

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE PÓS – GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

ANTÔNIO PEDRO SAID ALY DE PINA

**FUNDAMENTOS HIDROGEOQUÍMICOS APLICADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DE SANTA CRUZ, ILHA DE SANTIAGO – CABO VERDE, COMO INSTRUMENTO
PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.**

Orientador: Prof. Dr. George Satander Sá Freire – DEGEO/CC/UFC

Co- Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante – DEGEO/CC/UFC

**FORTALEZA – CEARÁ, BRASIL
DEZEMBRO/2011**

ANTÓNIO PEDRO SAID ALY DE PINA

**FUNDAMENTOS HIDROGEOQUÍMICOS APLICADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DE SANTA CRUZ, ILHA DE SANTIAGO – CABO VERDE, COMO INSTRUMENTO
PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, orientada pelos Professores Dr. George Satander Sá Freire e Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante, como preenchimento parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia, com área de concentração em Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- P714f Pina, Antonio Pedro Said Aly de.
Fundamentos hidrogeoquímicos aplicados na bacia hidrográfica de Santa Cruz, ilha de Santiago – Cabo Verde, como instrumento para a gestão de recursos hídricos / Antonio Pedro Said Aly de Pina. – 2011.
170 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2011.
Área de Concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.
Orientação: Prof. Dr. George Satander Sá Freire.
Coorientação: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.
1. Recursos hídricos – Gerenciamento. 2. Hidrogeologia. I. Título.

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geologia do curso de Pós-graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, com área de concentração em Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

A citação de qualquer trecho deste relatório é permitida desde que se faça de acordo com as normas da ética científica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Satander Sá Freire (Orientador)
Departamento de Geologia /CC/ Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (Co-Orientador)
Departamento de Geologia /CC/ Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Ceará

Doutor Márcio Luiz da Silva
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

“Assumir com convicção Valores, Missão e Objetivos e mais importante do que definir estes conceitos é acreditar neles!

Mais importante do que registá-los é colocá-los em prática!

Acredito que fazendo o bem, querendo sempre o melhor e guiado por valores como o respeito pelas pessoas, pelo Ambiente, a busca contínua de conhecimento e a excelência como meta, poderei alcançar o objetivo preconizado!”

ANTÓNIO PINA (*pai*)

DEDICATÓRIA

“Aos meus pais, António Pina e Salima Said Aly que, com certeza, gostariam muito de compartilhar este momento comigo. Agradeço todo amor, conhecimento, dedicação e sabedoria transmitida!

A minha esposa Evelise Ribeiro de Pina pelo apoio e principalmente, pelo tempo que era dela!

Aos meus filhos, Jayden, Kayden e Salymah, amo-vos de verdade!

Tudo o que sou, devo a vós!”

OBRIGADO!

AGRADECIMENTOS

À Deus que me concedeu a graça de concluir este trabalho!

Ao Professor Doutor George Satander Sá Freire, mais do que meu professor orientador, um familiar, um amigo: o meu reconhecimento e muito obrigado!

Ao Professor Doutor Itabaraci Nazareno Cavalcante, pela douta orientação e acompanhamento, permanente incentivo, amizade e paciência, a minha profunda gratidão.

A Professora Doutora Maria Helena Hessel, agradeço a generosidade com que forneceu conhecimentos relevantes e procedeu à leitura/revisão cuidadosa desta dissertação.

A Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP), que me concedeu a bolsa de mestrado para realização da pesquisa e apoio financeiro através da aprovação do Projeto pelo Edital MCT/CNPq 02/2006 – Universal.

Ao Doutor António Filipe Lobo de Pina, agradeço a cessão de imagens fotográficas das formações geológicas.

Agradeço aos professores, funcionários e colegas do Laboratório de Hidrogeologia, do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da UFC.

A Doutoranda Maria Conceição Rebelo o meu obrigado pelo apoio na concessão de mapas de zoneamento.

Agradeço ao Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos de Cabo Verde – INGRH, nas pessoas do Eng.º António Pedro Barbosa Borges e do Sr.º Luis Alfama pelo apoio prestado.

Finalmente, peço desculpas por alguma omissão possível, mas manifesto os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização do presente trabalho.

SUMÁRIO

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

Índice de Gráficos

Lista de Abreviaturas e Siglas

Resumo

Abstract

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

Capítulo 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Capítulo 3. METODOLOGIA DO TRABALHO

Capítulo 4. ENQUADRAMENTO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO

Capítulo 5. HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS

Capítulo 6. HIDROGEOQUÍMICA ISOTÓPICA

Capítulo 7. ESTRATÉGIA DE EXPLORAÇÃO E CONTROLE DOS AQUÍFEROS
COSTEIROS

Capítulo 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Capítulo 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	2
2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	5
2.1. Objetivo geral.....	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	8
3.1. Coleta de amostras.....	9
3.2. Controle dos resultados.....	14
3.2.1. Controle da qualidade externo.....	14
3.2.2. Controle da qualidade interno.....	15
3.2.2.1. Análise de duplicata.....	15
3.3. Amostragem para a análise isotópica.....	17
4. ENQUADRAMENTO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO.....	18
4.1. Enquadramento geográfico do arquipélago de Cabo Verde e da Ilha de Santiago..	19
4.2. Enquadramento da área de estudo - Ilha de Santiago.....	20
4.3. Enquadramento geológico da Ilha de Santiago.....	21
4.3.1. Geologia e Hidrogeologia.....	21
4.4. Geomorfologia da Ilha de Santiago.....	29
4.5. Solos e processos de salinização na Ilha de Santiago, Cabo Verde.....	31
4.6. Proporções relativas dos minerais nos solos da Ilha de Santiago Cabo Verde.....	36
4.7. Clima de Cabo Verde.....	38
4.8. Ventos dominantes no arquipélago de Cabo Verde.....	42
4.9. Caracterização física das bacias hidrográficas de Santa Cruz, Ilha de Santiago.....	43
4.9.1. A bacia hidrográfica da ribeira Seca, sub-bacia de Santa Cruz	45

5. HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS.....	47
5.1. Impurezas nas águas naturais.....	49
5.2. Caracterização e análise de dados obtidos.....	50
5.2.1. Propriedades físicas.....	50
5.2.1.1. Temperatura.....	50
5.2.1.2. pH.....	51
5.2.1.3. Condutividade Elétrica.....	55
5.2.1.4. Dureza.....	59
5.2.1.5. Alcalinidade.....	61
5.2.1.6. Bicarbonatos e Carbonatos.....	62
5.3. Principais constituintes iônicos.....	65
5.3.1. Bário.....	65
5.3.2. Cálcio.....	66
5.3.3. Cloretos.....	69
5.3.4. Ferro.....	72
5.3.5. Magnésio.....	74
5.3.6. Nitrato.....	75
5.3.7. Potássio.....	76
5.3.8. Sódio.....	76
5.3.9. Sulfato.....	81
5.4. Análise química da Água/Apresentação dos resultados analíticos.....	84
5.4.1. Técnicas gráficas para descrever a abundância dos constituintes.....	84
5.4.1.1. Coeficiente de Correlação de Pearson.....	84
5.4.1.2. Diagrama Piper.....	86
5.4.1.3. Diagrama do SAR.....	91
5.5. Qualidade da água da barragem de Poilão – fins agrícolas.....	93
5.6. Razões Iônicas.....	99

6. HIDROGEOQUÍMICA ISOTÓPICA NA COSTA LESTE DA ILHA.....	102
6.1. Introdução.....	103
6.2. Isótopos ambientais.....	105
6.3. Apresentação de resultados e discussões.....	109
7. ESTRATÉGIAS DE EXPLORAÇÃO E CONTROLE DOS AQUÍFEROS COSTEIROS.....	118
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	123
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
9. ANEXOS.....	141
ANEXO A: Pontos de Água: Localização, Geologia e Coordenadas.....	142
ANEXO B: Resultados das Análises Físico-Químicos.....	145
ANEXO C: Razões Iônicas.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.	Localização dos pontos de água coletados na costa leste da Ilha de Santiago	10
Figura 3.2.	Localização dos pontos de água coletados para a análise isotópica.....	17
Figura 4.1.	Arquipélago de Cabo Verde e sua localização na costa ocidental de África..	19
Figura 4.2.	Arquipélago de Cabo Verde e localização da Ilha de Santiago.....	20
Figura 4.3.	Carta geológica da Ilha de Santiago, Cabo Verde, digitalizada à partir de SERRALHEIRO (1976). Escala aproximada 1:100.000.....	23
Figura 4.4.	Esboço geológico da zona em estudo adaptado de A. SERRALHEIRO <i>et al</i> , in MATOS <i>et al</i> 1979.....	25
Figura 4.5.	Exemplo de chuva torrencial na bacia hidrográfica do Pico e Engenhos.....	26
Figura 4.6.	Precipitação mediana anual, Santiago (1965 – 1990) (CORREIA, 1998).....	27
Figura 4.7.	Precipitação média anual na fachada oriental da Ilha de Santiago.....	28
Figura 4.8.	Grandes unidades geomorfológicas da Ilha de Santiago (MARQUES, 1990).....	30
Figura 4.9.	Mapa de solos da Ilha de Santiago, Cabo Verde.....	33
Figura 4.10.	Processos de “Apanha da Areia” no interior da Ilha de Santiago. Ribeira da Barca, Charco, Cabo Verde.....	34
Figura 4.11.	Zona oriental da Ilha de Santiago. Ribeira de São Domingos, Cabo Verde...	35
Figura 4.12.	Balanço climático durante a estação das chuvas da Ilha de Santiago, Cabo Verde.....	38
Figura 4.13.	As diferentes classes de aridez da Ilha de Santiago, Cabo Verde.....	39
Figura 4.14.	Distribuição mensais e distribuição dos parâmetros da a) temperatura, b) humidade relativa c) insolação, d) intensidade do vento à 2 metros e e) evaporação nos cinco concelhos da Ilha de Santiago e para a média espacial da Ilha.....	41
Figura 4.15.	Distribuição mensais e distribuição dos parâmetros da a) temperatura, b) humidade relativa c) insolação, d) intensidade do vento à 2 metros e e) evaporação nos cinco concelhos da Ilha de Santiago e para a média espacial da Ilha.....	41

Figura 4.16. Arquipélago de Cabo Verde em relação aos ventos dominantes.....	42
Figura 4.17. Localização das bacias hidrográficas em estudo, da Ilha de Santiago.....	43
Figura 4.18. Localização da bacia hidrográfica da Ribeira Seca, Ilha de Santiago.....	45
Figura 5.1. Distribuição dos valores do pH nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	53
Figura 5.2. Distribuição dos valores do pH nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003	54
Figura 5.3. Evolução da C.E. em função da distância da linha da costa na ilha de Santiago	56
Figura 5.4. Distribuição dos valores da C.E., nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	57
Figura 5.5. Distribuição dos valores da C.E., nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003.....	58
Figura 5.6. Distribuição dos valores do bicarbonato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	63
Figura 5.7. Distribuição dos valores do bicarbonato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003.....	64
Figura 5.8. Distribuição dos valores do Cálcio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	67
Figura 5.9. Distribuição dos valores do Cálcio nas bacias em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003.....	68
Figura 5.10. Distribuição dos valores dos Cloretos nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	70
Figura 5.11. Distribuição dos valores dos Cloretos nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003.....	71
Figura 5.12. Distribuição dos valores do Potássio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	77
Figura 5.13. Distribuição dos valores do Potássio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003.....	78

Figura 5.14. Distribuição dos valores do Sódio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	79
Figura 5.15. Distribuição dos valores do Sódio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003	80
Figura 5.16. Distribuição dos valores do Sulfato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca, 2003.....	82
Figura 5.17. Distribuição dos valores do Sulfato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa, 2003	83
Figura 5.18. Distribuição das principais fácies hidroquímicas na bacia hidrográfica de S. Domingos. Ilha de Santiago.....	87
Figura 5.19. Distribuição das principais fácies hidroquímicas na bacia hidrográfica de Ribeira Seca. Ilha de Santiago.....	88
Figura 5.20. Classe das águas em função da salinidade na bacia hidrográfica da Ribeira Seca, S. Cruz.....	88
Figura 5.21. Distribuição das principais fácies hidroquímicas na bacia hidrográfica de S. Miguel. Ilha de Santiago.....	89
Figura 5.22. Concentração do Cl ⁻ <i>versus</i> C.E. na bacia hidrográfica de S. Domingos. Ilha de Santiago.....	90
Figura 5.23. Classe das águas em função da salinidade na bacia hidrográfica de S. Miguel. Ilha de Santiago.....	90
Figura 5.24. Apresentação do diagrama USSL, onde estão plotados os resultados das análises de água da Barragem de Poilão. (outubro, 2009).....	95
Figura 5.25. Concentração dos cátions <i>versus</i> C.E. nas bacias hidrográficas da parte oriental da Ilha de Santiago.....	101
Figura 5.26. Concentração dos ânions <i>versus</i> C.E. nas bacias hidrográficas da parte oriental da Ilha de Santiago.....	101

Figura 6.1. Representação esquemática do fracionamento isotópico em diversas etapas do ciclo hidrológico (adaptado de COPLEN <i>et al.</i> , 2001).....	105
Figura 6.2. Variação do teor de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação de acordo com um modelo de destilação de Rayleigh, partindo de um teor inicial de $\delta^{18}\text{O}_{\text{vapor}}=-11\%$, à temperatura de 25 °C. As linhas a tracejado estabelecem a ligação entre a composição isotópica da precipitação e as respetivas temperaturas de condensação. Adaptado de CLARK e FRITZ (1997).....	108
Figura 6.3. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ na água do mar em função da latitude dos locais de amostragem.....	110
Figura 6.4. Distribuição dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) nas águas subterrâneas da Ilha de Santiago.....	111
Figura 6.5. Mapa de isoletas da Ilha de Santiago, baseado na série pluviométrica de 1961-1990. Extraído de JICA e INGRH (1999).....	112
Figura 6.6. Projeção dos teores isotópicos das águas subterrâneas e da água do mar no diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ e comparação com a Reta Meteórica Global (RMG).....	113
Figura 6.7. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas em função da Longitude.....	114
Figura 6.8. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e dos valores de Condutividade Elétrica, C.E., das águas subterrâneas.....	115
Figura 6.9. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas em função da Latitude....	116

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros analisados, métodos e equipamentos de medida.....	11
Tabela 3.2. Classes e nível da qualidade da água.....	12
Tabela 3.3. Tabela de classificação por parâmetro.....	13
Tabela 4.1. Volume total de precipitação média anual nas bacias hidrográficas da ilha de Santiago.....	26
Tabela 4.2. Classificação dos solos na ilha de Santiago tendo como referência os estudos de FARIA (1970) e as classificações da FAO/UNESCO (1968) e USA Soil Taxonomy (1975).....	32
Tabela 5.1. Mobilidade de alguns elementos químicos em relação as condições ambientais.....	52
Tabela 5.2. pH de hidrólise para alguns elementos selecionados.....	52
Tabela 5.3. Coeficiente de correlação de Pearson, época seca, 2003.....	85
Tabela 5.4. Coeficiente de correlação de Pearson, época chuvosa, 2003.....	85
Tabela 5.5. Classificação da salinidade em função da CE, PST e do pH.....	92
Tabela 5.6. Classificação da água de irrigação quanto ao risco de Sodicidade.....	93
Tabela 5.7. Classificação da água de irrigação quanto ao risco de Salinidade.....	94
Tabela 5.8. Classificação do estado trófico em albufeiras.....	97
Tabela 5.9. Parâmetros analisados da amostra da água da Barragem de Poilão e resultados obtidos	97
Tabela 5.10. Principais razões iônicas e seus significados (HEM, 1985).....	99
Tabela 6.1. Características dos pontos de amostragem e respectivos resultados analíticos.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C.E.:	Condutividade Eléctrica
CQ_{int}:	Controlo de Qualidade Interno
CQ_{ext}:	Controlo de Qualidade Externo
CSR:	Carbonato Sódico Residual (índice)
DQO:	Demanda Química de Oxigênio
FAO:	Fundo Mundial para a Alimentação
IA:	Índice de Aridez
IET:	Índice do Estado Trófico
INERF:	Instituto Nacional de Engenharia Rural e Florestal de Cabo Verde
INGRH:	Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos de Cabo Verde
INMG:	Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
IUPAC:	International Union of Pure and Applied Chemistry
JICA:	Agência Japonesa de Cooperação Internacional
MRC:	Materiais de Referência Certificados
OMS:	Organização Mundial da Saúde
OD:	Oxigênio Dissolvido
PDH:	Plano de Desenvolvimento Hídrico
PTMA:	Procedimentos Técnicos de Métodos Analíticos
RMG:	Reta Meteórica Global
RMR:	Reta Meteórica Regional
SAR:	Razão de Absorção do Sódio
SNIRH:	Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos de Cabo Verde
SMOW:	Standard Mean Ocean Water
STD:	Sólidos Totais Dissolvidos
SST:	Sólidos Solúveis Totais
USDA:	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América
USSL:	Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos da América
VSMOW:	Vienna Standard Mean Ocean Water

RESUMO

A evolução da percepção dos problemas de qualidade da água não é exclusiva do último século. Alguns apontamentos históricos mostram como a sociedade olhou ao longo dos tempos para a problemática da qualidade de seus recursos hídricos. Já em 1489, Leonardo da Vinci constatou que ‘dos quatro elementos, a água é o segundo em peso e em mobilidade. Eleva-se facilmente por si própria pelo calor em sutil vapor através do ar. O frio fá-la gelar, e a imobilidade a corrompe. Assume todo o odor, cor e sabor, e de si, nada tem’. O projeto ‘Avaliação do Milénio, Estudos Desenvolvidos dos Ecossistemas’, lançado em junho de 2001 por iniciativa do Secretário-Geral das Nações Unidas, mostrou que são muitos os ecossistemas no mundo que estão ameaçados pela sobrexploração de águas subterrâneas, seja pela poluição tóxica e difusa que as afeta, seja pelo impacto direto e indireto na disponibilidade hídrica causados por alterações climáticas. As ações antropogênicas têm reflexos negativos na vitalidade dos ecossistemas e nos benefícios que eles prestam à humanidade, como é o caso particular dos ecossistemas dependentes de águas subterrâneas que garantem a biodiversidade fundamental para o equilíbrio do ecossistema terrestre como um todo. O grau de dependência da água subterrânea de cada ecossistema deve ser avaliado sob diversas óticas hidrogeológicas, como o caudal de escoamento subterrâneo, o nível potenciométrico e os descritores hidroquímicos para que possa ser preservado em sua integridade por longo tempo. O comportamento hidrogeoquímico da água subterrânea dos aquíferos costeiros na parte oriental da ilha de Santiago em Cabo Verde, onde se localiza a bacia hidrográfica da Ribeira Seca, é um exemplo de ecossistema que sofreu uma degradação significativa ao longo das duas últimas décadas por causa do rápido crescimento populacional associado à intensa exploração dos recursos hídricos, permitindo assim o avanço da água do mar para o interior do continente. A avaliação acurada deste ecossistema pode ser efetuada através da elaboração de cartas de vulnerabilidade baseadas nas características intrínsecas do aquífero e no tipo de poluente (vulnerabilidade específica) utilizando dois índices de natureza intrínseca (DRASTIC e GOD) e um de natureza específica (IS). Deste modo é possível selecionar os resultados mais próximos de realidade observada, servindo posteriormente como instrumento de apoio a órgãos gestores de recursos hídricos na definição de políticas públicas que visem à conservação e ao uso sustentável das águas subterrâneas. Todas estas preocupações surgem, mais do que nunca, como um imperativo ético, social e econômico em tudo o que diga respeito à proteção e sustentabilidade ambiental, cruciais para um desenvolvimento social e econômico que pretende ser integrado e harmonioso. A atribuição do Prêmio Nobel da Paz de 2007 a temáticas ambientais veio reforçar a importância da sustentabilidade ambiental para a paz no mundo. Saibamos, portanto, todos nós dar a nossa contribuição para corrigir o que sabemos que não é sustentável.

Palavras-chave: Qualidade da água, intrusão salina, hidroquímica.

ABSTRACT

The perception evolution of water quality problems is not exclusive of the last century. Some historical notes show how the society looked at water quality problems. Already in 1489, Leonardo of the Vinci evidenced that “of the four elements, the water is second in weight and mobility. It raises itself easily in proper vapour thru the air. The cold make it freezes, and the immobility corrupts it. It assumes all odour, colour and flavour, and itself nothing has”. The project 'Millennium Evaluation, Developed Studies of Ecosystems', developed in June of 2001, from initiative of the General Secretary of United Nations, showed that there are many ecosystems in the world that are threatened by sob exploitation of underground waters, either from topic or diffuse pollution that affect directly and indirectly the availability of water resources, caused by climatic changes. The anthropogenic actions have a negative consequence in the vitality of ecosystems and the benefits that they give to the humanity, as it is a particular case of dependent underground water ecosystems that guarantee basic biodiversity for a balance of terrestrial ecosystem as a whole. The degree of dependence of underground water of each ecosystem must be evaluated under different hydrological views, as volume of underground drained, piezometric level and hydro chemical parameters so that it can be preserved its integrity for a long time. The hydro chemical behaviour of underground water of coastal aquifers, in the eastern part of Santiago island in Cape Verde, where is located the hydrographical basin of Ribeira Seca, is an example of ecosystem that suffered a significant degradation from the last decades, because of fast population growth associate with the intensive exploration of water resources, thus allowing the advance of sea water to the interior of the continent. An accurate evaluation of this ecosystem can be effected through an elaboration of vulnerability based cards with intrinsic characteristics of an aquifer and a type of pollutant (specific vulnerability) using two indices of intrinsic nature (DRASTIC and GOD) and one of specific nature (IS). In this way, it is possible to select results next to observed reality, serving later as support instrument for managing agencies of water resources in the definition of public politics that they aim to conservation and sustainable use of underground waters. All these concerns appear, more than never, as ethical imperative, social and economic in everything that says respect to protection and sustainable environment crucial for a social and economic development that it intends to be integrated and harmonious. The attribution of the Nobel Prize in 2007, the environmental issues came to strengthen the importance of sustainable environment for peace in the world. Let's all of us give our contribution to correct, what we know, is not sustainable.

Key Words: Water quality, Saline Intrusion, Hydrochemistry.

1 – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

As reservas hídricas subterrâneas constituem importantes recursos de água doce em Cabo Verde e contribuem de forma relevante para o escoamento de base dos rios perenes alimentando importantes zonas úmidas. Assim, as águas subterrâneas apresentam potencialidades ímpares, devendo ser preservadas, não apenas do ponto de vista da quantidade, mas também da qualidade. Essas potencialidades resultam da sua resiliência a efeitos de flutuações climáticas sazonais e a processos de contaminação, apresentando uma forte estabilidade das reservas de água e da qualidade oferecida pelos processos naturais de purificação. Entretanto, a proteção das águas subterrâneas, tanto para as atuais como para as futuras gerações, carece de ações urgentes de preservação.

Não obstante, a natureza do processo de recarga de águas subterrâneas implica que haja, predominantemente, uma passagem da água da superfície através das camadas superficiais, pelo que o controle da sua quantidade e qualidade está intimamente ligado ao uso e à ocupação do solo e a todas as atividades humanas e pressões existentes na superfície, para além das características naturais do meio (HEM, J.D., 1985). As águas subterrâneas não são independentes das águas superficiais, e distribuem-se tão organizadamente quanto essas, em aquíferos de tamanhos variados e estruturadas em diferentes complexidades, tanto condutoras quanto essencialmente armazenadoras (REBOUÇAS, 1994).

Na ilha de Santiago, Cabo Verde, com a construção da barragem de Poilão no leito da Ribeira Seca, introduz, conseqüentemente, alterações ao nível da ocupação do solo e novos riscos de poluição dos recursos hídricos, importa avaliar as potenciais implicações no estado quantitativo e qualitativo das águas dos aquíferos subjacentes.

O Código da Água (Lei nº 41/II/84 de 18 de junho de 1984) de Cabo Verde, estabelece as bases gerais do regime jurídico de propriedade, proteção, conservação, desenvolvimento, administração e uso dos recursos hídricos, instrumento legal pioneiro na percepção da necessidade de encarar a gestão da água com um sentido estratégico e integrador. Ele foi transposto para a ordem jurídica nacional pelo Decreto nº 82/87 de 1º de agosto de 1987 e Decreto-Lei nº 75/99 de 30 de dezembro de 1999, que definem o regime jurídico de licenças ou concessões de utilização dos recursos naturais. Todos estes documentos têm como aspecto central estabelecer um enquadramento para a proteção e melhoria do estado das águas, e visa assegurar a provisão de água na quantidade e na qualidade necessárias para satisfazer o consumo humano e as atividades econômicas, de forma sustentável, equilibrada e equitativa, contemplando objetivos ambientais para se alcançar um bom estado das águas subterrâneas até 2015.

Para tanto, alguns objetivos deverão ser buscados pelas diversas instâncias da sociedade, como:

- Normas pelas quais se regem os serviços públicos de distribuição de água potável e esgotos,
- Normas de descarga das águas residuais provenientes de habitações isoladas, de aglomerados populacionais e de todos os setores de atividade humana, designadas por águas residuais domésticas, urbanas ou comunitárias, e,

- Normas e critérios de qualidade da água e sua classificação, bem como os sistemas de controle, regime sancionatório e medidas de salvaguarda e proteção do meio aquático, buscando melhorar a qualidade da água para o consumo humano.

A qualidade das águas subterrâneas deverá ainda ter uma composição química tal que as concentrações de poluentes não provoquem danos significativos nos ecossistemas terrestres diretamente dele dependentes. As medidas de proteção especial dos recursos hídricos devem ser aplicadas, tal como previstas no Código da Água, que incluem por exemplo, os perímetros de proteção de captações e as zonas de infiltração máxima, sendo condicionadas, restringidas ou interditas as atuações e utilizações susceptíveis de perturbar os seus objetivos específicos.

O trabalho enfoca os aspectos da hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas, da hidrogeoquímica isotópica, da poluição e contaminação, dos processos de salinização, das proporções relativas dos minerais nos solos, discutindo, disponibilizando dados, gerando informações na tentativa de diagnosticar estratégias de exploração e de controle dos aquíferos costeiros na costa leste da ilha de Santiago em Cabo Verde.

CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS DO TRABALHO

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS DO TRABALHO

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

A exploração intensiva e prolongada em captações muito próximas do mar, na ilha de Santiago, onde não existe uma fonte de compensação destas extrações por recarga natural ou artificial do aquífero, provoca o avanço da interface água-doce água-salgada para as terras emersas, observável nos furos de prospeção aquífera, com posterior contaminação. No entanto, estudos realizados demonstraram que o processo de intrusão salina em aquíferos costeiros pode ser previsto através de modelagem matemático computacional e pelo controle do balanço hídrico. Assim, a principal motivação deste trabalho reside na importância de se aperfeiçoarem métodos para a gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos, nomeadamente em zonas áridas ou semi-áridas, onde a escassez de recursos hídricos de superfície é reconhecida.

De uma forma generalizada, no passado, os recursos hídricos subterrâneos estiveram deixados à própria sorte. Os que dependiam de tais recursos para atender ao abastecimento de água potável não tomaram nenhuma medida significativa para assegurar a qualidade da água bruta, nem empenharam esforços adequados para avaliar o perigo da contaminação potencial.

2.1. Objetivo geral

Avaliar os perigos de contaminação do aquífero, a necessidade da sua definição, de forma clara e as ações requeridas para proteger a qualidade da água subterrânea na costa leste da ilha de Santiago no arquipélago de Cabo Verde, com base em fundamentos do perímetro de proteção, para que possa servir como ferramenta de apoio aos órgãos de regulamentação.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar qualitativa e quantitativa alguns aquíferos costeiros na costa leste da ilha de Santiago, nos diversos usos múltiplos, utilizada, que consiste na realização parâmetro a parâmetro, correspondente à classificação da qualidade proposta pelo laboratório do INGRH, completada com os valores constantes da classificação do mesmo tipo utilizado pela OMS, Tabela 3.3.

Estruturados em duas etapas:

Etapa 1: Estado e evolução dos aquíferos na costa leste da ilha de Santiago.

- Identificar as características de qualidade ambiental de alguns aquíferos costeiros,
- Caracterizar qualitativa e quantitativamente alguns aquíferos costeiros, recorrendo aos íons dominantes,

- Desenvolver uma base pública de dados relativa aos aquíferos costeiros,
- Classificar os problemas de qualidade da água subterrânea; tipo de problema, causa subjacente e principais contaminantes, com estudos de razões iônicas,
- Classificar o estado trófico da água da barragem de Poilão para fins agrícolas, concentrações de fosfatos e de clorofila *a*, da C.E. e a RAS, e,
- Utilizar o *software* Qualigraf, desenvolvido pelo hidrogeólogo Gilberto Mobus, da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, para gerar gráficos qualitativos das análises de água dos cinquenta e dois (52) pontos selecionados.

Etapa 2: Procedimentos para a gestão integrada de aquíferos da zona costeira.

- Desenvolver modelos de gestão e otimização da exploração de águas subterrâneas, e,
- Desenvolver métodos e critérios para o estabelecimento de programas de monitorização de variáveis e indicadores ambientais em função dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DO TRABALHO

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DO TRABALHO

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

Os métodos empregados neste trabalho consistiram preliminarmente na realização de uma revisão bibliográfica do meio físico da região, levantamentos de trabalhos anteriores, e estudo dos métodos que seriam empregados para a obtenção dos dados.

Muitas informações referentes à hidrogeologia da área foram obtidas junto aos órgãos governamentais cabo-verdiana, com destaque para o INGRH, que cedeu dados dos seus cadastros dos furos, e de poços, com informações para a caracterização do aquífero da costa leste da ilha de Santiago. Também foram obtidos dados de diversos furos e de poços da região, perfurados pelo INERF. Do INMG, a confiabilidade suficiente dos dados de precipitação e na análise de consistência de séries pluviométricas.

Os dados não disponíveis no INGRH deverão ser introduzidos em ficheiros em formato texto, compatíveis com a aplicação EXCEL, e cedidos a instituição para posterior integração no SNIRH.

A avaliação qualitativa foi desenvolvida, numa fase prévia, com base nas informações disponíveis, e, numa fase posterior, incluindo o monitoramento de uma rede de pontos de água. Neste último caso, o objetivo era avaliar a situação atual dos aquíferos costeiros utilizando a caracterização da fácies hidrogeoquímica das águas subterrâneas e de suas propriedades, gerando gráficos qualitativos de Piper, de Stiff, de tal modo que permita avaliar a qualidade da água para fins agrícolas e prever o perigo de salinização dos solos utilizando o índice de SAR (Razão de Adsorção Sódica). É importante a identificação de casos que violam os valores paramétricos definidos nas normas legais, e sua evolução sazonal, considerando a periodicidade de amostragem (época alta e época baixa). Com base nos gráficos obtidos, foi efetuada a caracterização e predominância das águas como também o ambiente de deposição.

Com os aspectos geoambientais avaliados, base de dados georeferêncidos, com a ajuda do software Arcview® GIS 9.2, e recorrendo a Krigagem que é um método de regressão usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados, foi possível uma análise sistemática dos principais elementos temáticos apresentando zonas com maior ou menor sensibilidade à contaminação. A principal finalidade destes mapas é servir de instrumentos na definição de políticas públicas tanto no planeamento do uso e ocupação do solo como no gerenciamento das águas subterrâneas.

3.1. Coleta de amostras

A coleta apropriada das amostras é um dos passos mais importantes para a caracterização da qualidade da água. São necessárias todas as preocupações possíveis para evitar qualquer forma de contaminação ou perda. A coleta da amostra é, com frequência, a maior fonte de erro num programa de monitoramento de águas subterrâneas, (NETTO, 1966).

Os problemas potenciais que podem causar modificações na composição da amostra original e, como consequência, alterar a representatividade dos dados químicos são: contaminação das amostras com materiais do poço, alteração da amostra durante a coleta por mudança das condições de temperatura, pressão e concentração dos gases; intervalo de tempo entre a coleta e a análise; e, colonização por bactérias, (MESTRINHO, 1994).

No controle da qualidade das águas subterrâneas, as amostras foram obtidas em poços produtores e/ou de monitoramento, que penetram na zona saturada. Foram coletadas à saída da boca do poço e armazenadas em frascos do tipo PET, previamente esterilizados e, posteriormente, transportadas ao laboratório onde permaneceram mantidas sob refrigeração até o momento das análises.

Foram coletadas 52 amostras semestrais de água no mesmo ponto em períodos distintos, 3 (três) no período seco (junho) e dois (2) no período após chuva (Anexo B) sendo: 37 furos (poços tubulares), 10 poços (cacimbas) e 5 nascentes com profundidades compreendidas entre 4,44 e 124 metros, Fig. 3.1, nos anos de 2003 e de 2005 (Anexo A) tendo, sempre presente, o registo de dados existentes no INGRH origem das águas, diversidade dos fertilizantes utilizados, natureza dos solos e variedade de culturas (Fig. 3.1).

A razão de selecionar os resultados dos anos de 2003 e de 2005 simplesmente resulta do facto da participação do laboratório do INGRH em ensaios interlaboratoriais com o laboratório do Instituto Ricardo Jorge de Portugal, delegação norte dando maior credibilidade e confiança nos resultados obtidos.

No campo foram medidos os seguintes parâmetros; temperatura, pH, C.E., STD, turbidez e oxigênio dissolvido.

As análises químicas foram feitas no menor prazo possível evitando assim, modificações na concentração dos constituintes, tais como; alterações no pH; perdas de gases dissolvidos (O_2 , CO_2 , H_2S , Cl_2) ou absorção de gases (O_2 , CO_2) da atmosfera e mudanças no estado de oxidação de elementos, Fe^{2+} e Mn^{2+} de águas anaeróbicas, nas medidas de Eh e na atividade microbiana.

Definem-se como bactérias coliformes as que à temperatura de 37°C formam colónias características no meio de agar lactosado biliado com cristal violeta e vermelho neutro. Definem-se como bactérias coliformes termotolerantes as que à temperatura de 44 °C formam colónias características no meio de agar lactosado biliado com cristal violeta e vermelho neutro.

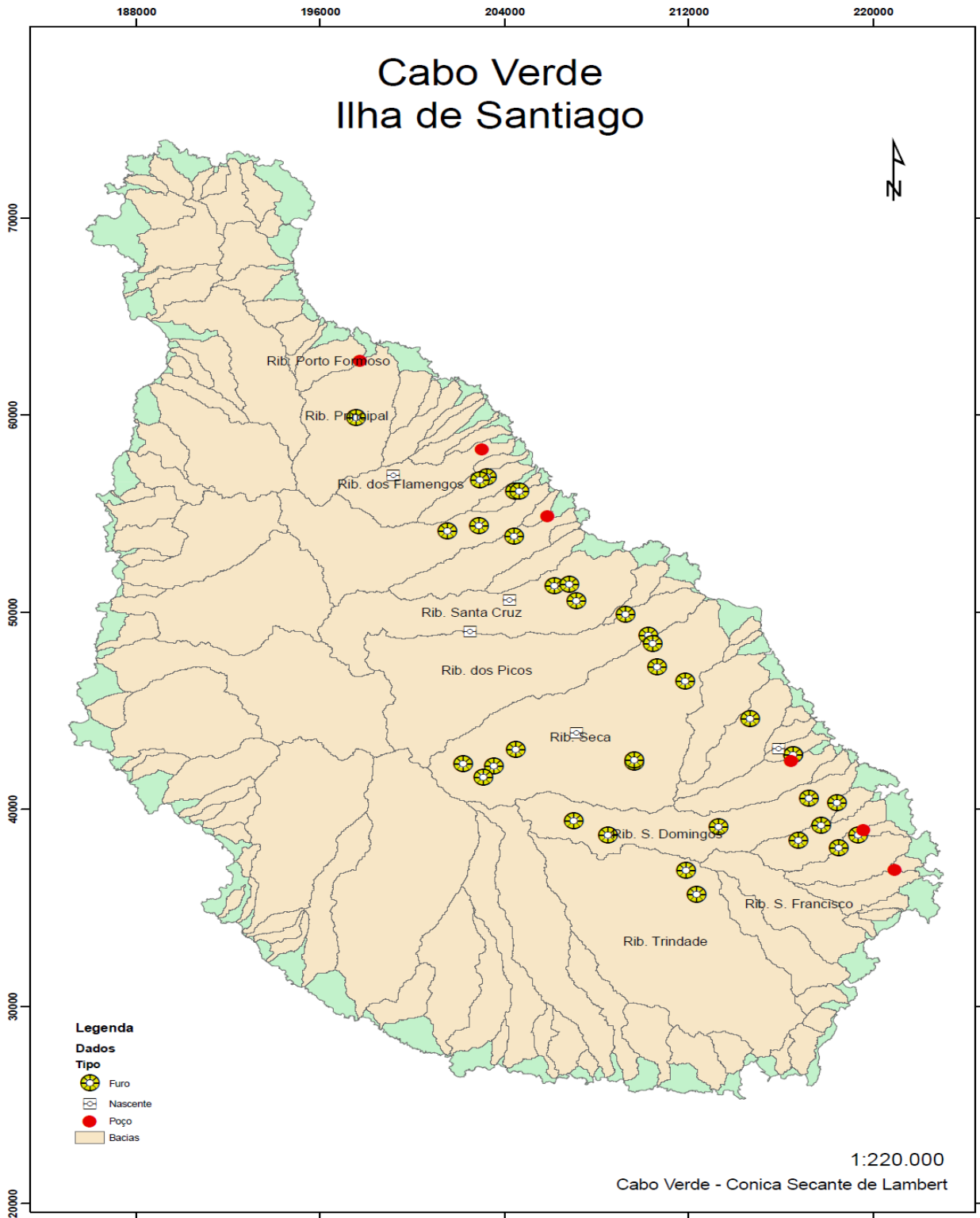


Figura 3.1. Localização dos pontos de água coletados na área de estudo. Coste leste da Ilha de Santiago. (2003 e 2005).

A classificação da qualidade para fins múltiplos dá informação sobre usos que potencialmente se podem considerar para a massa de água classificada. A qualidade da água refere-se à composição de uma amostra, cuja classificação, a depender do objetivo a ser alcançado, é feita utilizando-se vários critérios. Uma simples classificação, relacionando a concentração de alguns constituintes presentes, pode ser suficiente para avaliar a qualidade para determinado uso. Entretanto, considerar as interações geoquímicas naturais, é fundamental para a interpretação dos processos que controlam o quimismo da água.

A Tabela 3.1. apresenta os parâmetros possíveis de serem analisados no laboratório do INGRH e os métodos analíticos seguidos. Os resultados das análises físico-químicas estão apresentados no Anexo B.

Foram utilizados, para a determinação dos parâmetros físicos e químicos os procedimentos descritos em “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 20^a e 21^a Edição.

Tabela 3.1. Parâmetros analisados, métodos e equipamentos de medida.

Parâmetros	Métodos Analítico	Equipamentos de medida
Turbidez (UNT)	Formazina	E.A. Molecular, HACH DR/820
pH (escala de Sorrensen a 25°C)	Electrometria	Sension 1 HACH - pHmeter
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C)	Electrometria	Sension 1 HACH - Condutivímetro
Cloretos ($\text{mg}/\text{L Cl}^-$)	Método de Mohr	Volumetria (AgNO_3 e K_2CrO_4)
Sulfatos ($\text{mg}/\text{L SO}_4^{2-}$)	Turbidimétrico, $\lambda=680\text{nm}$	E.A. Molecular, HACH DR/820
Dureza Total ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$)	EDTA, tampão pH=10 (negro-eriocromo T)	Volumetria
Alcalinidade Total ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$)	(H_2SO_4)=0,02N fenolftaleína	Volumetria
Bicarbonatos ($\text{mg}/\text{L HCO}_3^-$)	Cálculo	Cálculo (HCO_3^- e CO_3^{2-})
Nitratos ($\text{mg}/\text{L NO}_3^-$)	Redução de Cadmio, $\lambda=400\text{nm}$	E.A. Molecular, HACH DR/820
Nitritos ($\text{mg}/\text{L NO}_2^-$)	Diazotização, $\lambda=507\text{nm}$	E.A. Molecular, HACH DR/820
Azoto amoniacal ($\text{mg}/\text{L NH}_4^+$)	Nessler, $\lambda=425\text{nm}$	E.A. Molecular, HACH DR/820
Oxidabilidade ($\text{mg}/\text{L O}_2$)	Ebulição meio ácido	KMnO_4
Sódio ($\text{mg}/\text{L Na}^+$)	Emissão de radiação até ao estado fundamental	Fotómetro de Chama
Potássio ($\text{mg}/\text{L K}^+$)	Emissão de radiação até ao estado fundamental	Fotómetro de Chama
Cálcio ($\text{mg}/\text{L Ca}^{+2}$)	EDTA, tampão pH=12 (Indicador - Murexida)	Volumetria
Magnésio ($\text{mg}/\text{L Mg}^{+2}$)	Cálculo	$D_T = D_{Ca} + D_{Mg}$
Fósforo ($\text{mg}/\text{L P}_2\text{O}_5$)	Teste em tubos, $\lambda=890\text{nm}$ Phosfo Ver 3	E.A. Molecular, HACH DR/820
Ferro ($\text{mg}/\text{L Fe}$)	Ortofenantrolina ($\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$)	Ebulição em meio ácido (Fe^{2+})
Sílica ($\text{mg}/\text{L SiO}_2$)	Molibdosilicato de amônio	Analysar, modelo 910
Bário ($\text{mg}/\text{L Ba}^{+2}$)	Espectrofotómetro $\lambda=400\text{nm}$	Analysar, modelo 910
Coliformes Totais (/100ml)	Contagem de colónias obtidas	Incubação a 37 °C meio de cultura.
Coliformes Fecais (/100ml)	Contagem de colónias obtidas	Incubação a 44 °C meio de cultura.

O conceito de potabilidade é utilizado para definir o padrão de qualidade da água para o consumo humano. Os padrões de potabilidade ou de água potável são as quantidades limite, fixadas para as características físicas, químicas e organolépticas, componentes orgânicos e inorgânicos, que podem ser toleradas nas águas de abastecimento.

Em Cabo Verde, as normas e padrões estão a serem atualizados pelo INGRH e pelo Ministério da Saúde, recorrendo a base os critérios adotados pelo órgão internacional, OMS.

A classificação INGRH/OMS (Tabela 3.2) materializa-se em 5 classes, que tem, quanto à qualidade, o seguinte significado:

Tabela 3.2. Classes e nível de qualidade da água, (INGRH/OMS - 2002).

CLASSE	NÍVEL DE QUALIDADE
A- Sem poluição	Águas consideradas como isentas de poluição, aptas a satisfazer potencialmente as utilizações mais exigentes em termos de qualidade.
B- Fracamente Poluído	Águas com qualidade ligeiramente inferior à classe A, mas podendo também satisfazer potencialmente todas as utilizações.
C- Poluído	Águas com qualidade “aceitável”, suficiente para a irrigação, para usos industriais e produção de água potável após tratamento rigoroso. Permite a existência de vida piscícola (espécies menos exigentes), mas com reprodução aleatória; apta para recreio sem contato direto.
D- Muito Poluído	Águas com qualidade “mediocre” apenas potencialmente aptas para a irrigação, arrefecimento e navegação. A vida piscícola pode subsistir, mas de forma aleatória.
E- Extremamente Poluído	Águas ultrapassando o valor máximo da Classe D para um ou mais parâmetros. São consideradas como inadequadas para a maioria dos usos e podem ser uma ameaça para a saúde pública e ambiental.

A classificação por parâmetros enumerados na Tabela 3.3 em simultâneo com as da Tabela 3.2, constituem ferramentas de apoio bastante utilizado no laboratório do INGRH, para a interpretação e avaliação dos perigos de poluição nas águas.

Tabela 3.3. Tabela de classificação por parâmetro, OMS- 2002.

CLASSE PARÂMETRO	A (sem poluição)	B (fracamente poluído)	C (poluído)	D (muito poluído)	E (extremamente poluído)
pH	6,5 – 8,5*	-	6,0 – 9,0	5,5 – 9,5	-
Temperatura (°C)	≤ 20	21-25	26-28	29-30	>30
Condutividade (μS/cm)	≤ 750	751-1000	1001-1500	1501-3000	>3000
SST (mg/l)	≤ 25,0	25,1-30	30,1-40,0	40,1-80,0	>80,0
Sat OD (%)	≥ 90	89-70	69-50	49-30	<30
CBO ₅ (mg O ₂ /l)	≤ 3,0	3,1-5,0	5,1-8,0	8,1-20,0	>20,0
CQO (mg O ₂ /l)	≤ 10,0	10,1-20,0	20,1-40,0	40,1-80,0	>80,0
Oxidabilidade (mg O ₂ /l)	≤ 3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	10,1-25,0	>25,0
Azoto Amoniacal	≤ 0,10	0,11-1,00	1,10-2,00	2,01-5,00	>5,00
Nitratos (mg/l)	≤ 5,0	5,0-25,0	25,1-50,0	50,1-80,0	>80,00
Fosfatos (mg/l P ₂ O ₅)	< 0,54	-	<0,94	>0,94	-
Coliformes Totais**	≤ 50	51-5000	5001-50000	>50000	-
Coliformes Fecais**	≤ 20	21-2000	2001-20000	>20000	-
Estreptococos Fecais**	≤ 20	21-2000	2001-20000	>20000	-
Ferro (mg/l)	≤ 0,50	0,51-1,00	1,10-1,50	1,50-2,00	>2,00
Manganês (mg/l)	≤ 0, 10	0,11-0,25	0,26-0,50	0,51-1,00	>1,00
Zinco (mg/l)	≤ 0,30	0,31-1,00	1,10-5,00	-	>5,00
Cobre (mg/l)	≤ 0,020	0,021-0,05	0,051-1,00	-	>1,00
Crómio (mg/l)	≤ 0,05	-	-	-	>0,05
Selénio (mg/l)	≤ 0,01	-	-	-	>0,01
Cádmio (mg/l)	≤ 0,0010	-	<0,0050	-	>0,0050
Chumbo (mg/l)	≤ 0,050	-	0,051-0,100	-	>0,100
Mercúrio (mg/l)	≤ 0,00050	-	<0,0001	-	>0,001
Arsénio (mg/l)	≤ 0,010	0,011-0,050	-	0,051-0,100	>0,100
Cianetos (mg/l)	≤ 0,010	-	0,011-0,050	-	>0,050
Fenóis (mg/l)	≤ 0,0010	0,0011-0,0050	<0,010	0,011-0,100	>0,100
Agentes Tensiotavos(*)	≤ 0,2	-	0,21-0,50	-	>0,50

* O pH, sendo um parâmetro muito dependente de características geomorfológicas, pode apresentar valores fora deste intervalo, sem contudo significar alterações de qualidade devidas à poluição.

** (/100ml)

(*) Las-mg/l)

3.2. Controle dos resultados laboratoriais

No Laboratório do INGRH, o controle (em rotina) dos resultados obtidos é feito pelo método de ensaio que visa garantir a manutenção das condições que conduziram à sua validação, constituindo o controle da qualidade desse método. Distinguem-se dois tipos de controle: Controle da Qualidade Externo (CQ_{EXT}) e Controle da Qualidade Interno (CQ_{INT}). A periodicidade das ações de controle e os critérios de aceitação dos resultados estão definidos para cada método no respetivo Procedimento Técnico de Métodos Analíticos, (PTMA).

3.2.1. Controle da Qualidade Externo

As ações de CQ_{EXT} visam controlar a exatidão dos resultados através da utilização de Materiais de Referência Certificados (MRC) ou padrões equivalentes e da participação em ensaios interlaboratoriais (Instituto Drº Ricardo Jorge – Delegação Porto) de aptidão com periodicidade mínima recomendada, anual. Para este tipo de controle é preciso.

- a) Analisar o MRC ou a amostra proveniente do ensaio interlaboratorial, nas condições do ensaio.
- b) Calcular o erro relativo, segundo a Equação (1):

$$Er(\%) = \frac{|X_V - X_{lab}|}{X_V} \cdot 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

em que:

X_V – valor considerado verdadeiro (valor certificado do MRC ou o valor estabelecido no ensaio interlaboratorial), e,

X_{lab} - valor obtido pelo laboratório.

- c) Aceitar um erro relativo até 5%. No caso de este ser superior procurar as causas e tentar corrigi-las ou aceitá-las.
- d) Calcular o fator de desempenho (Z), através da Equação (2):

$$Z = \frac{X_{lab} - X_V}{s} \quad \text{Eq. (2)}$$

em que:

s - desvio padrão (sr e/ou sR) ou a incerteza do MRC ou o desvio padrão do valor médio obtido no ensaio interlaboratorial

e) Avaliar o desempenho da seguinte forma:

$$\begin{aligned} 0 < |Z| \leq 2 & - \text{Satisfatório} \\ 2 < |Z| \leq 3 & - \text{Questionável} \\ |Z| > 3 & - \text{Incorreto} \end{aligned}$$

f) Aplicar ações corretivas nos métodos de ensaio se o desempenho for questionável ou incorreto.

3.2.2. Controle da Qualidade Interno

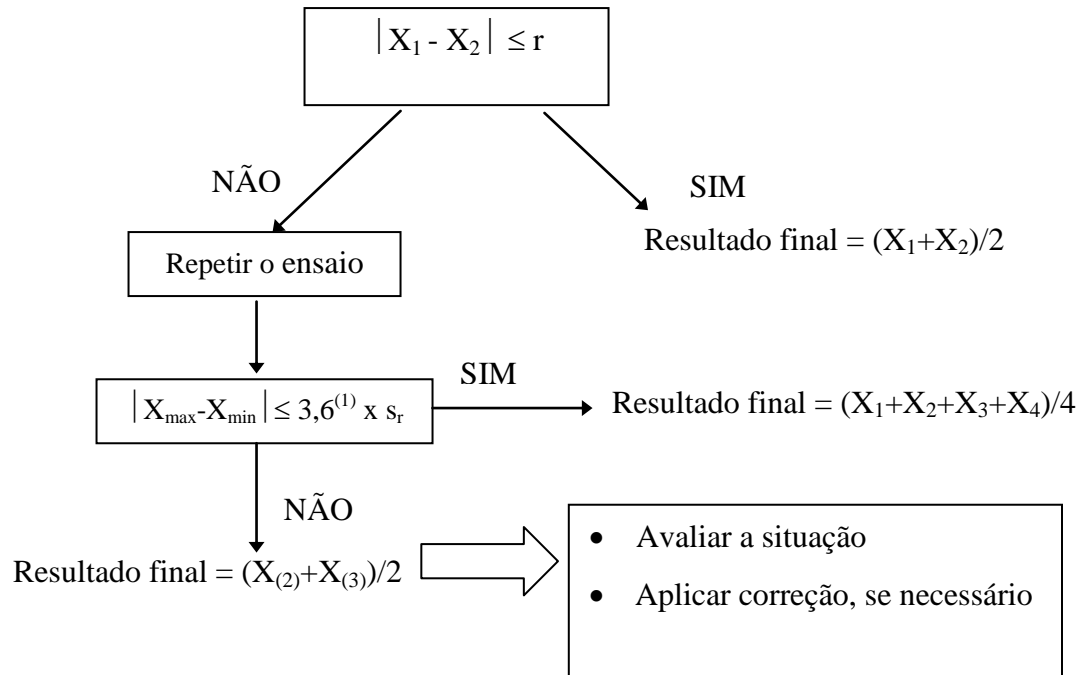
Visa controlar a precisão dos resultados e/ou falhas de execução do método e inclui várias ações, cuja aplicação depende do método. A seguir descrevem-se aquelas que se consideram indispensáveis.

3.2.2.1. Análise de duplicata

A análise em duplicata tem como objetivo a deteção de erros acidentais, servindo também como controle da repetibilidade ou da precisão intermédia.

a) Métodos de ensaio realizados em duplicata - condições de repetibilidade

- Proceder de acordo com o Fluxograma 1.



Fluxograma 1

em que:

$X_{(2)}$ – segundo valor mais baixo (do conjunto dos 4)

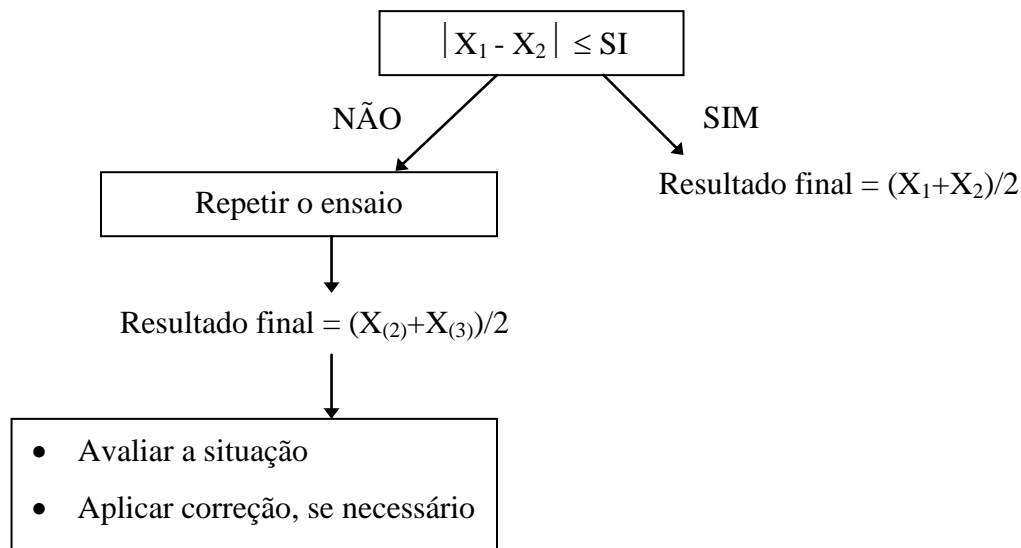
$X_{(3)}$ – terceiro valor mais baixo (do conjunto dos 4)

r – limite de repetibilidade

s_r – desvio padrão de repetibilidade

⁽¹⁾ fator crítico para $n = 4$ (ISO 5725 – PART 6)

b) Métodos de ensaio realizados em duplicata - condições de precisão intermédia
 Proceder de acordo com o Fluxograma 2



Fluxograma 2

em que:

$X_{(2)}$ – segundo valor mais baixo (do conjunto dos 4)

$X_{(3)}$ – terceiro valor mais baixo (do conjunto dos 4)

SI – precisão intermédia

b) Métodos de ensaio realizados sem réplicas - Pesquisa e identificação de *Salmonella*

- Analisar mensalmente uma amostra em duplicata e aplicar os critérios definidos no PTMA correspondente (PTMA/MIC 02)

Finalmente, são elaboradas cartas de controle com solução padrão de concentração conhecida, analisadas a periodicidade definidas no PTMA de cada método de ensaio e avaliada a situação de acordo com a norma ISO 8258 aplicando correção se necessário.

3.3. Amostragem para a análise Isotópica

Foram coletados, entre os dias 3 e 12 de dezembro de 2007, 21 amostras de águas subterrâneas que se incidiu essencialmente sobre captações do INGRH localizadas em diversos pontos (Figura 3.2) e 4 amostras de água do mar da ilha de Santiago, em Cabo Verde.

Em cada ponto de amostragem foram medidos os parâmetros físico-químicos; C.E., e pH a 25°C, TDS, temperatura e o potencial redox (Eh). As amostras posteriormente foram enviadas para o “Environmental Isotope Laboratory” do Departamento de Geociências da Universidade do Arizona (EUA), onde foram submetidas a determinações analíticas dos isótopos estáveis da molécula de água ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$). A precisão analítica é de 0,08‰, para o $\delta^{18}\text{O}$, e 0,9‰, para o $\delta^2\text{H}$.

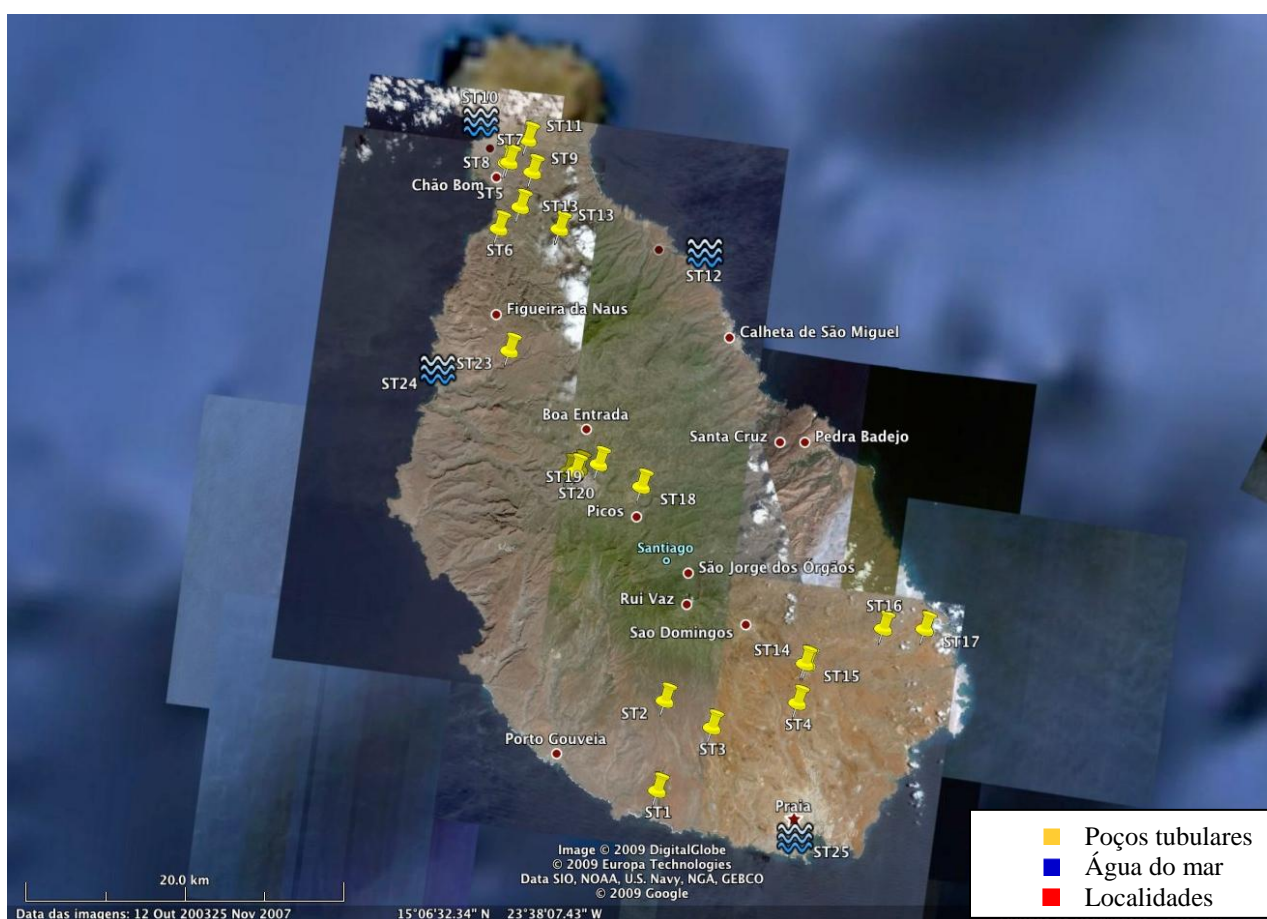


Figura 3.2. Localização dos pontos de água coletados na ilha de Santiago para a análise isotópica (PINA, 2007).

CAPÍTULO 4 – ENQUADRAMENTO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO

CAPÍTULO 4

ENQUADRAMENTO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO

CAPÍTULO 4 – ENQUADRAMENTO GERAL DA ILHA DE SANTIAGO

4.1. Enquadramento geográfico do arquipélago de Cabo Verde e da Ilha de Santiago

O arquipélago de Cabo Verde localiza-se na margem oriental do Oceano Atlântico, a cerca de 500 km a Oeste de Cabo Verde do Senegal, na costa ocidental africana, de onde provém o nome do arquipélago, entre as latitudes de 17° 13' N (Ilha de Santo Antão) e 14° 48' N (Ilha Brava) e as longitudes 22° 42' W (Ilha da Boavista) e 25° 22' Oeste (Ilha de Santo Antão) (Figura 4.1). É constituído por 10 ilhas (Figura 4.1), nove das quais habitadas, com áreas que variam desde os 35 km² (ilha de Santa Luzia, desabitada) até aos 991 km² (ilha de Santiago). O arquipélago contém ainda treze ilhéus desabitados, totalizando uma área de 4 033 km². Mais de metade da população de Cabo Verde vive na ilha de Santiago (INE, 2000).

As ilhas de Cabo Verde localizam-se na região da Macaronésia, a qual se estende entre as latitudes de 39° 45' e 14° 49' N e as longitudes de 31° 17' e 13° 20' W e apresenta uma área aproximada de 14 743 km², agregando, além Cabo Verde, as ilhas Canárias, Açores, Madeira e Selvagens (LOSADA-LIMA 1987-88).

As ilhas de origem vulcânica apresentam, para além de dimensões e configurações diversas, características geológicas e geomorfológicas que as diferenciam.

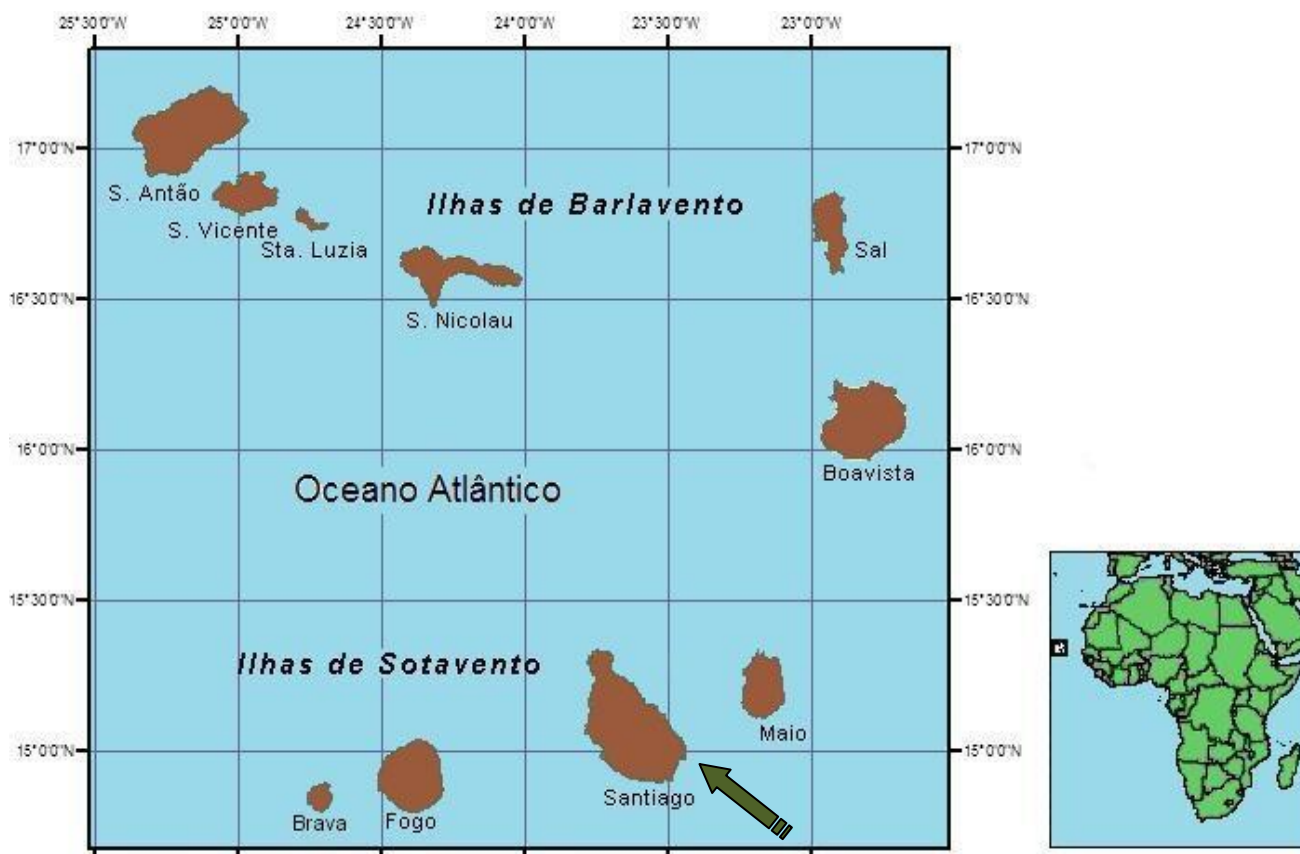


Figura 4.1. Arquipélago de Cabo Verde e sua localização na costa ocidental de África.

4.2. Enquadramento da área de estudo - Ilha de Santiago

Santiago situa-se na parte Sul do Arquipélago, entre os paralelos 15° 20' e 14° 50' de latitude Norte e os meridianos 23° 50' e 23° 20' de longitude Oeste do meridiano de Greenwich (Figura 4.2). Apresenta forma adelgada na direção norte-sul, com um comprimento máximo de 54,9 km entre a Ponta Moreia, a Norte, e a ponta Mulher Branca, a Sul, com uma largura máxima de 29 km entre a ponta Janela, a Oeste, e a ponta Praia Baixo, a Leste, e tendo como ponto culminante, 1392 m de altitude. Pertence ao grupo das ilhas de Sotavento e ao das ilhas altas ou montanhosas, com uma altitude máxima de 1 394 m de altitude (SERRALHEIRO, 1976). Possui 991 km², representando cerca de 30% da área total do arquipélago.

A ilha de Santiago é fundamentalmente constituída por rochas vulcânicas. A pequena cobertura vegetal e espessura do solo constituem um ecossistema frágil cujas características físico-ambientais reduzem substancialmente o seu potencial produtivo. A reduzida disponibilidade de água superficial, aliada à baixa e irregular pluviosidade, explica a grande dependência dos habitantes em relação à água subterrânea, mesmo sendo essa, de modo geral, uma alternativa pouco promissora pela reduzida vocação hidrogeológica das rochas vulcânicas.

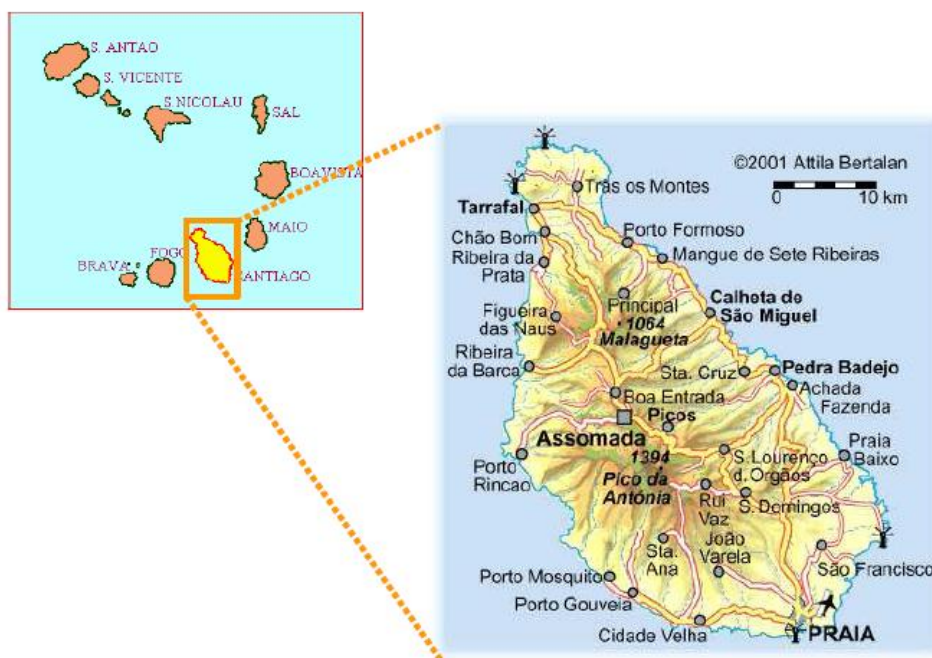


Figura 4.2. Arquipélago de Cabo Verde e localização da ilha de Santiago.

Tratando-se de uma ilha, os aquíferos de água doce em Santiago mantêm um equilíbrio delicado com a água do mar, expresso pelo avanço e recuo da interface água doce-água salgada. A gestão e a exploração racional dos aquíferos existentes implica no conhecimento da evolução desta interface, quer do ponto de vista espacial quer temporal. Esta importância acresce devido a elevada concentração populacional ao longo da costa, aumentando significativamente a procura de água.

4.3. Enquadramento geológico da Ilha de Santiago

Para o melhor conhecimento do comportamento das formações aquíferas das ilhas vulcânicas e devido a sua complexidade, estudos geológicos, hidrogeológicos e geofísicos requererem uma integração conjunta de resultados obtidos.

4.3.1. Geologia e Hidrogeologia

A geologia da ilha é caracterizada fundamentalmente por rochas vulcânicas, com basaltos alcalinos e os inerentes produtos lávicos e piroclásticos (brechas e tufos) derramados pela cratera do vulcão principal, situada no maciço do Pico da Antónia (FARIA, 1970; ALVES *et al.*, 1979). Na generalidade poucas zonas planas podem ser observadas na ilha, com realce para o planalto de Santa Catarina (zona centro) e as plataformas de abrasão que se localizam na zona Norte e Sul da ilha e ainda em algumas encostas.

A pouca cobertura vegetal e a pequena espessura do solo constituem um ecossistema frágil cujas características físico-ambientais reduzem substancialmente o seu potencial produtivo.

As rochas eruptivas constituem a quase totalidade da parte emersa da ilha, tanto em superfície como em volume, distribuindo-se por vários tipos e formações geológicas de idades muito diferentes (SERRALHEIRO, 1976). De modo geral, as rochas mais antigas encontram-se nos fundos dos vales, em áreas desnudadas. Os produtos de origem vulcânica explosiva formaram os derrames da maior parte da ilha, enquanto que as rochas faneríticas ocupam áreas mais restritas.

Segundo SERRALHEIRO (1976), (Figura 4.3.), as unidades geológicas que compõem a ilha de Santiago podem ser reunidas em quatro grupos principais, da mais antiga para a mais recente:

- Pré-miocênicas: Complexo Eruptivo Interno (embasamento),
- Miocênicas: Formação dos Flamengos e Formação dos Órgãos,
- Pliocênicas: complexo eruptivo do Pico da Antónia e Formação da Assomada, e,
- Quaternárias: Formação de Monte Vacas.

De realçar que as formações geológicas ora caracterizadas, com a excepção da mais antiga, isto é, a do Complexo Eruptivo Interno Antigo só com formação de fácies terrestre, em todas as restantes foram identificados ambientes de formação de fácies terrestre e marinha.

Estudos hidrogeológicos realizados na ilha de Santiago, com base no estudo das formações geológicas e tendo como suporte as perfurações, ensaios de bombagem e inventários de pontos de água, tornaram possível o estabelecimento do modelo hidrogeológico conceptual da ilha de Santiago, subdividido pelas unidades de Base, Intermédia e Recente.

- **Unidade de Base** – é constituída principalmente pelo Complexo Eruptivo Interno Antigo (CA), a Formação dos Flamengos ($\rho\lambda$) e a Formação dos Órgãos (CB). Esta unidade é caracterizada por um grau elevado de compacidade, uma forte alteração dos afloramentos, tornando-a assim com baixa permeabilidade relativamente às formações geológicas mais recentes.

- **Unidade Intermédia** – é constituída pelas Formações do Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA) e da Assomada (A).

- A Formação do Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA) é a unidade geológica mais extensa e espessa da ilha e apresenta uma permeabilidade muito superior à série de base, tornando-se assim o aquífero principal da ilha. Nesta formação quando predominam as *pillow lavas*, fácies submarina, podem obter-se caudais acima da média da ilha, como por exemplo, 40 m³/h, com uma exploração média de 12 horas por dia e por vezes chegando a atingir 20 horas por dia.

- A Formação da Assomada (A) é constituída por mantos basálticos subaéreos e piroclastos, atingindo por vezes espessuras de dezenas de metros, na parte central, que se localiza no planalto da Assomada ladeada pelos dois principais maciços da ilha, o Pico da Antónia e a Serra Malagueta. O caudal médio de exploração ronda em média 20-25 m³/h, com uma exploração média de 10-12 horas/dia com um rebaixamento pouco significativo. A transmissividade identificada é de 1.10^{-4} a 5.10^{-4} m²/s.

- **Unidade Recente** – Constituída pela Formação do Monte das Vacas (MV) e Aluviões (a).

- A Formação do Monte das Vacas (MV) é formada principalmente por cones de piroclastos basálticos. Associados a alguns cones podem observar-se pequenos derrames. Esta Formação é muito permeável, por isso, não permite a retenção das águas, que se infiltram, privilegiadamente, em direção ao aquífero principal.

- As Aluviões (a), compostas por clastos de granulometria grossa com elevada permeabilidade, atingem a profundidade de 30 m, constituindo um dreno natural nas formações vulcânicas permeáveis, como os depósitos de *pillow-lavas*.

Assim, quando espessas, grosseiras e isentas de argila, possuem muita porosidade e permeabilidade, pelo que permitem furos de grande produtividade, como se pode observar na parte terminal da Ribeira dos Flamengos, Achada Baleia, Ribeira Seca e na Ribeira dos Picos, chegando a atingir caudais médios de exploração de 40 m³/h, com uma exploração média de 12 horas por dia (Figura, 4.4).

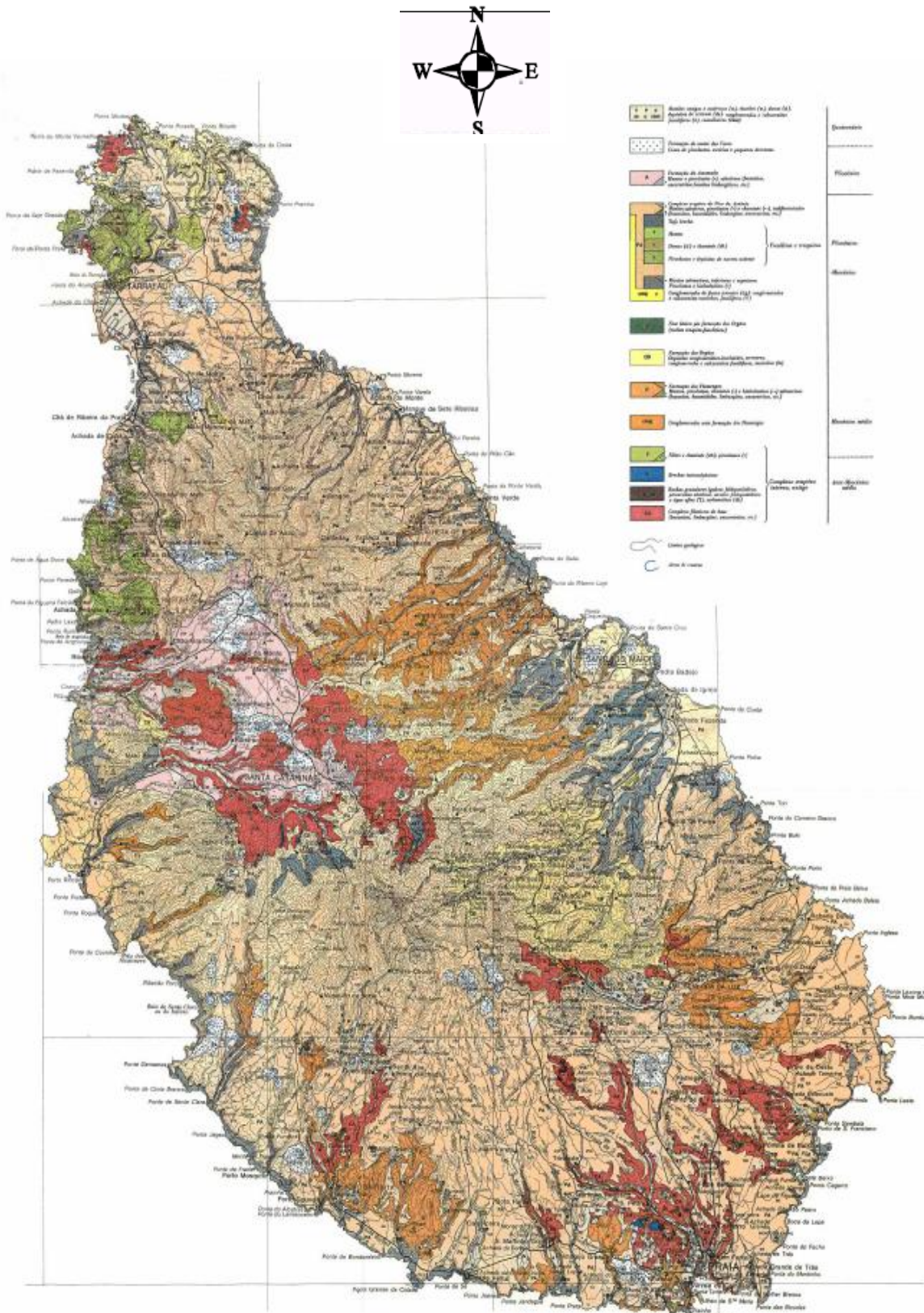
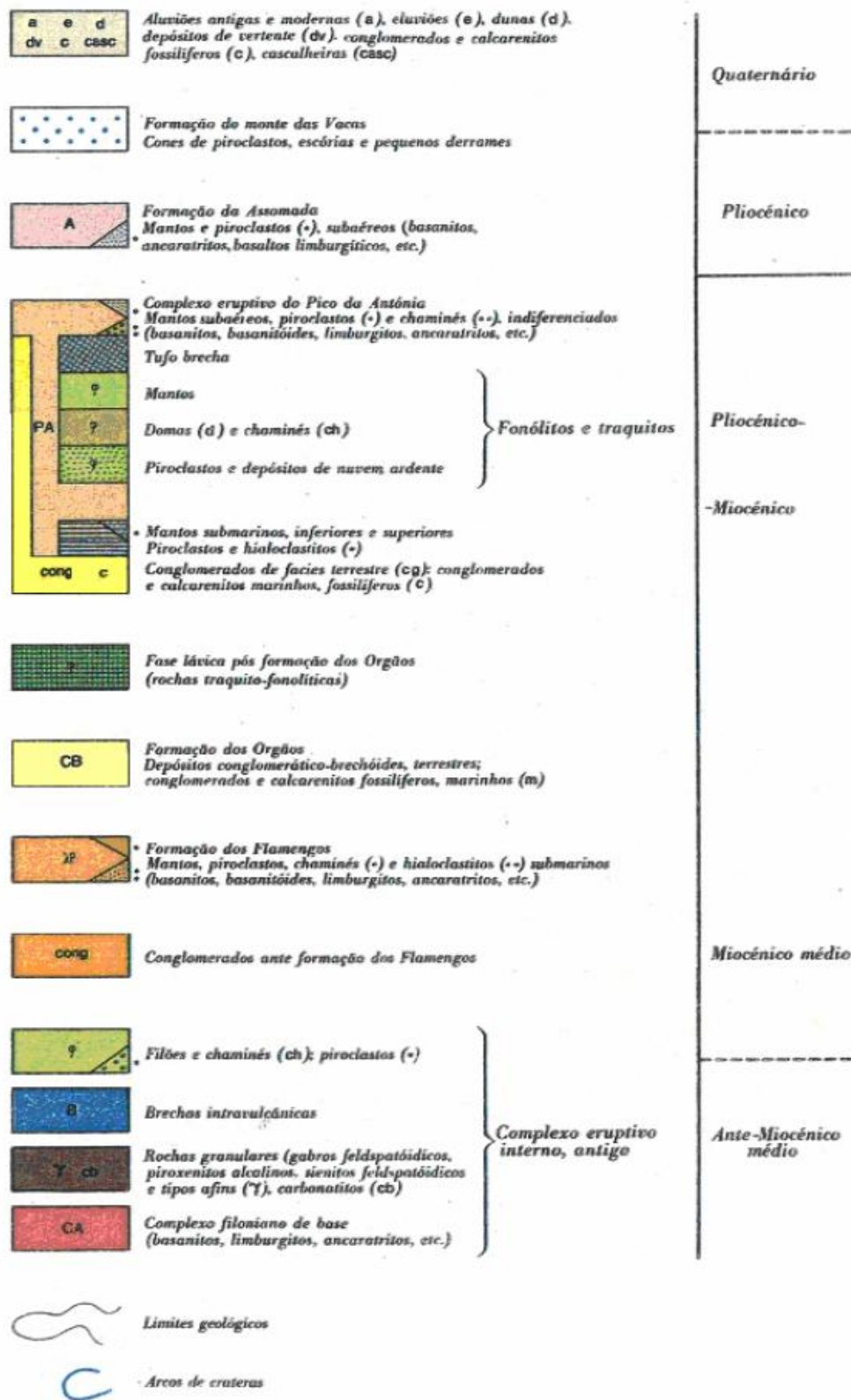


Figura 4.3. Carta Geológica da ilha de Santiago, Cabo Verde, digitalizada à partir de Serralheiro (1976). Escala aproximada 1:100.000

PINA, A.P.S.A. – 2011. Fundamentos Hidrogeológicos aplicados na bacia hidrográfica de Santa Cruz, ilha de Santiago – Cabo Verde, como instrumentos para a gestão de recursos hídricos.



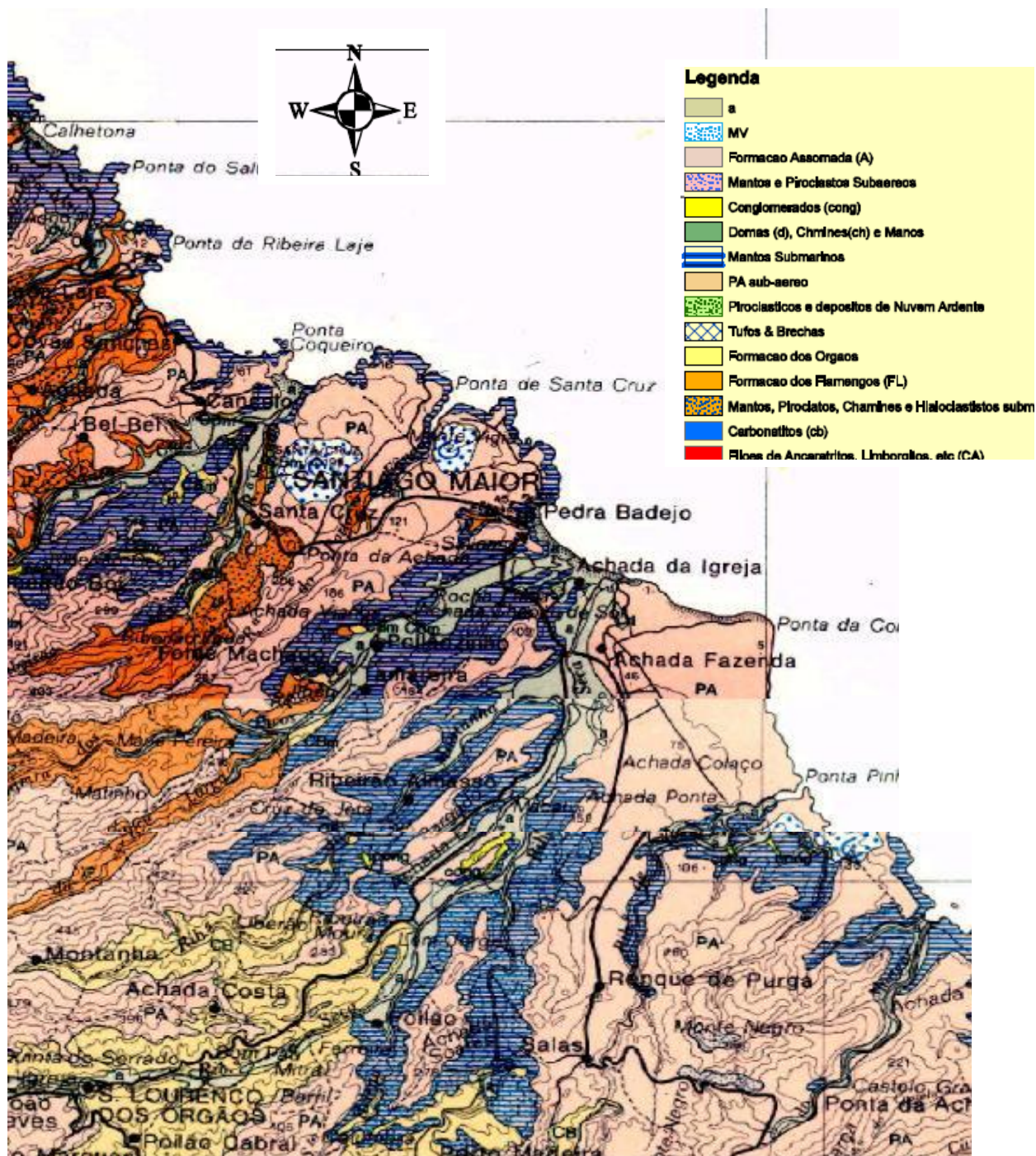


Fig. 4.4. Esboço geológico da zona em estudo adaptado de A. Serralheiro et al, in Matos Alves *et al* 1979.

A pequena disponibilidade de água superficial e a ausência de mecanismos para a sua retenção, aliada à baixa e irregular pluviosidade, explica a grande dependência dos habitantes da região em relação à água subterrânea, mesmo sendo essa, na maior parte, uma alternativa fraca pela reduzida vocação hidrogeológica das rochas vulcânicas.

As ilhas do arquipélago de Cabo Verde estão localizadas na mesma faixa climática do deserto norteafricano, junto à zona de transição para o clima tropical, onde a chuva é escassa e cai somente durante o verão.

A ilha de Santiago, é dividida em 5 (cinco) bacias hidrogeológicas (JICA-INGRH, 1999), baseadas nas características topográficas e hidrogeológicas, Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Volume total de precipitação média anual nas bacias hidrográficas da ilha (Fonte: JICA, 1999).

Bacias da Ilha de Santiago	Volume Total Pluviométrico	Pluviosidade Média Anual
Tarrafal (188 Km ²)	55,97 milhões de m ³	270 mm
Santa Cruz (355 Km²)	114,97 milhões de m³	330 mm
Santa Catarina (128 Km ²)	32,20 milhões de m ³	260 mm
S. João Baptista (155 Km ²)	28,48 milhões de m ³	180 mm
Praia (179 Km ²)	38,20 milhões de m ³	210 mm

A precipitação total é, em regra, diminuta (270 mm nos últimos 40 anos) na ilha de Santiago e crescem com a altitude (Figura 4.6.). O número de dias de chuva é também muito pequeno (cerca de 90 dias). Segundo COSTA (1996), o número de dias de chuva não ultrapassa anualmente os 4% no litoral meridional e 9% no setor a montante da bacia da Ribeira Seca e no norte da ilha.

As poucas chuvas costumam ser bastante fortes, causando frequentes enxurradas, pois na sua maioria são do tipo aguaceiro de forte intensidade, quando, num curto espaço de tempo, há intenso escoamento superficial e transporte de materiais sólidos (Figura 4. 5.), contribuindo para uma elevada erosão hídrica. Este tipo de precipitação pluvial dificilmente contribui para a recarga dos aquíferos, motivo pelo qual existe a agricultura irrigada.



Figura 4.5. Exemplo de chuva torrencial na bacia hidrográfica do Pico de Engenho (Foto: BARRY, 2007).

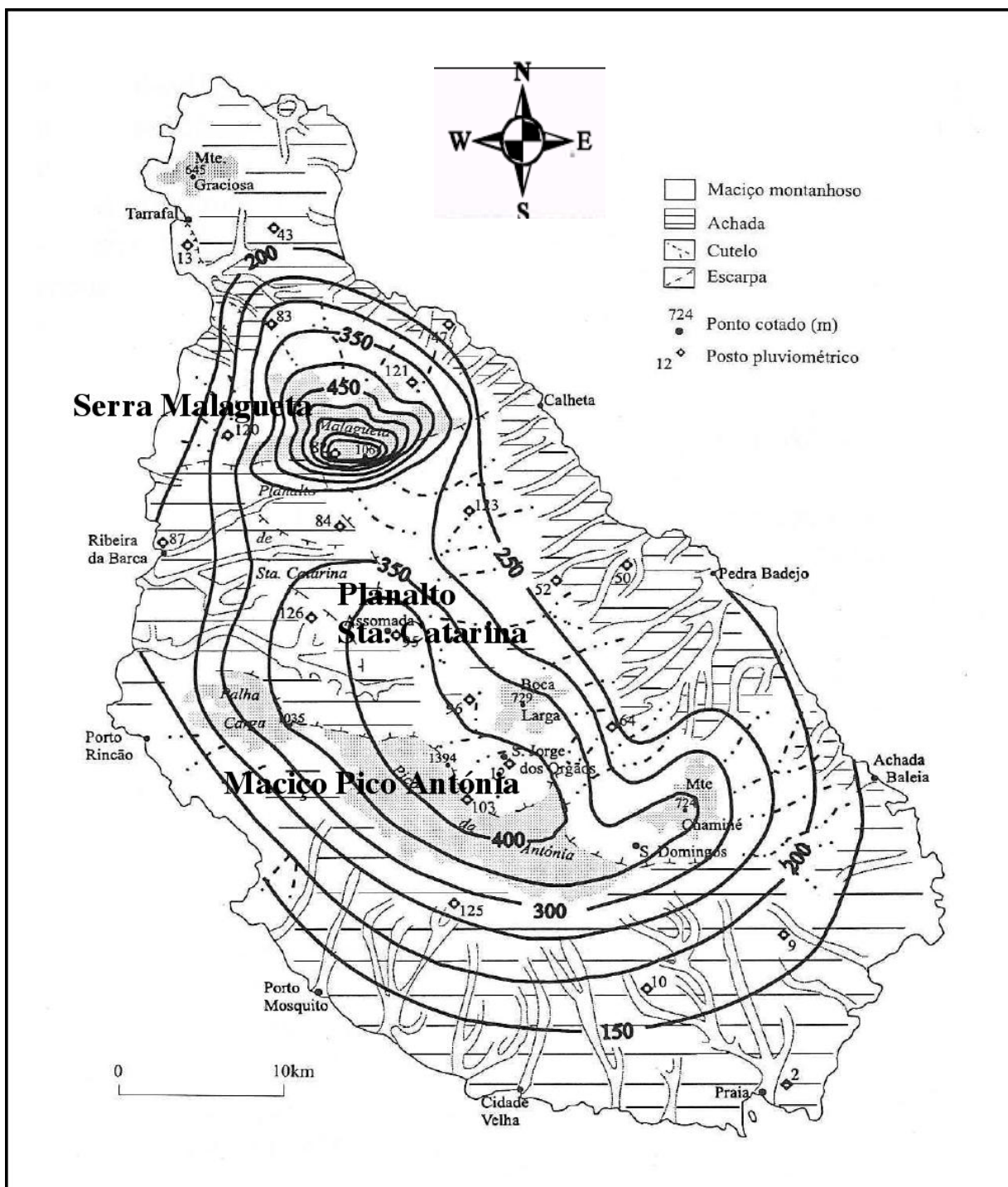


Figura 4.6. Precipitação mediana anual, Santiago (1965-1990) (CORREIA, 1998).

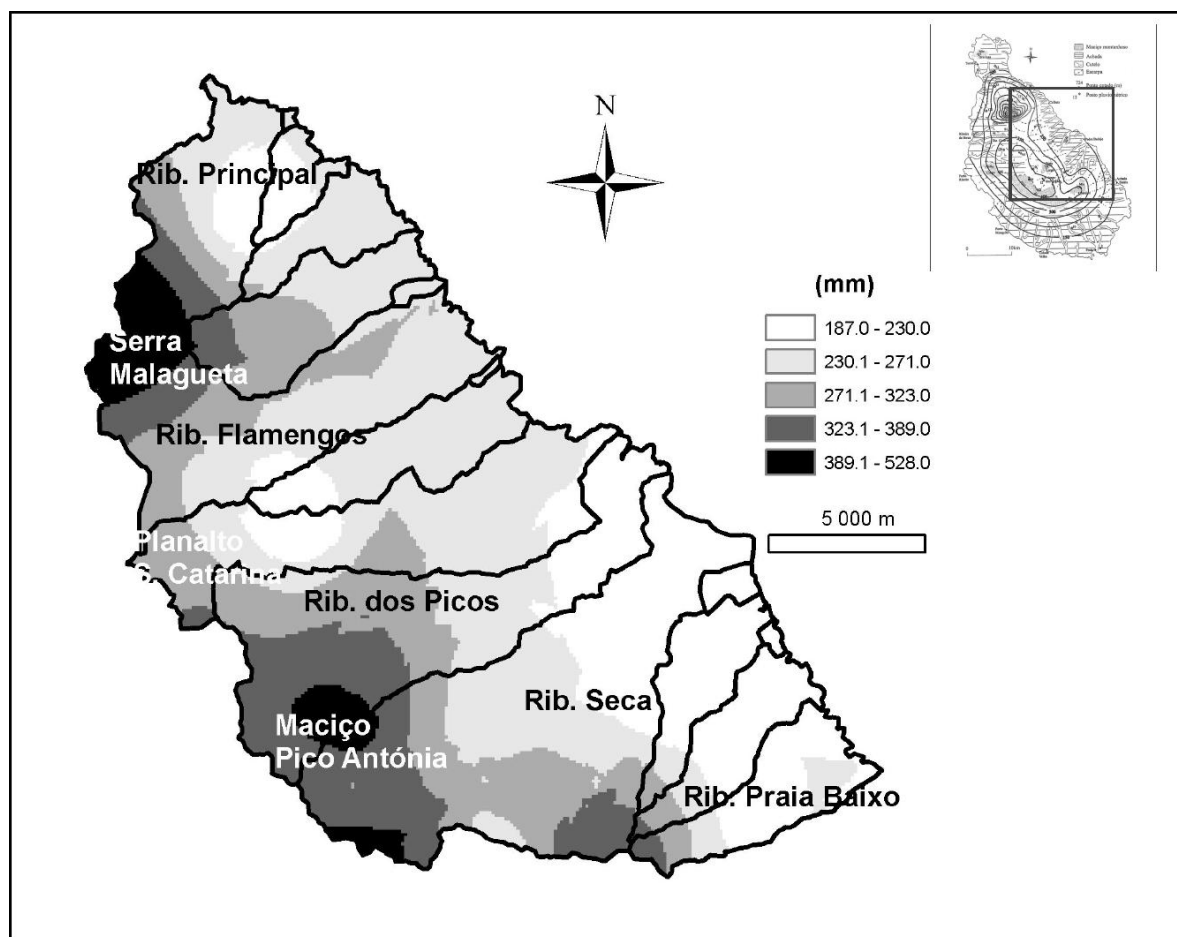


Figura 4.7. Precipitação média anual na fachada oriental da Ilha de Santiago (1977-1997), (COSTA, 1996).

4.4. Geomorfologia da Ilha de Santiago

Na ilha de Santiago destacam-se dois maciços montanhosos com altitudes superiores a 1000 metros, a Serra do Pico da Antónia (com o ponto mais alto da ilha a uma altitude de 1392 m) e a Serra da Malagueta (com uma altitude máxima de 1063 m), separados por uma região planáltica, a Assomada, com uma altitude média de 550 metros. A ilha de Santiago caracteriza-se por formas de relevo muito irregulares, com extensas áreas planas nas zonas litorais até altíssimas encostas separadas por desfiladeiros, com profundos vales de vertentes quase verticais, em grande parte da ilha, sobretudo na parte oeste, dispostos segundo as geratrizes do cone principal (PINTO, 2010).

O clima seco e árido, sujeito a chuvadas torrenciais, provocam forte erosão hídrica, originando vales profundos que se prolongam até ao mar, e podem apresentar perfis transversais em “V” (vales abertos), quando são escavados em formações antigas e alteradas, com alguma argila na sua constituição e ravinas quando são escavados em formações mais recentes, principalmente em mantos basálticos do Complexo Eruptivo Principal. A morfologia destes vales ravinados está relacionada com a disjunção colunar dos mantos subaéreos (SERRALHEIRO, 1976).

Em Santiago distinguem-se sete unidades geomorfológicas (Amaral, 1964; Marques, 1990): Achadas Meridionais (I), Maciço Montanhoso do Pico da Antónia (II), Planalto de Santa Catarina (III), Flanco Oriental (IV), Maciço Montanhoso da Malagueta (V), Tarrafal (VI), e Flanco Ocidental (VII) (Figura 4.8.).

As Achadas Meridionais (I) têm altitudes abaixo dos 500 metros. São superfícies estruturais e/ou subestruturais com declives de 2% a 12% na direcção do mar (Marques, 1983), formadas por escoadas basálticas intercaladas com tufos, do Complexo Eruptivo do Pico da Antónia (PA). No fundo dos seus vales afloram frequentemente as rochas do Complexo Eruptivo Interno Antigo (CA), sob as formações do PA.

O Maciço Montanhoso do Pico da Antónia (II) eleva-se acima dos 600 metros de altitude e atinge os 1392 metros. Tem direcção principal de NW-SE e apresenta-se fortemente erodida cumeadas pontiagudas.

O Flanco Oriental (IV), área do estudo, é uma região exposta aos ventos alísios, muito erodida, com grande variabilidade das formas de relevo e de declives acentuados, com elevada densidade populacional, de encostas preenchidas com cultura de sequeiro, a qual exige várias mobilizações do solo ao longo dos seus ciclos vegetativos, em função das precipitações.

A pouca densidade de coberto vegetal, a exposição aos ventos alísios e a forte precipitação promovem também a erosão dos solos. Litologicamente, predominam os tufos e tufos-brechas alternando com escoadas lávicas pouco espessas do Complexo do Pico da Antónia.

No fundo dos vales ocorre uma densa rede filoniana que pertence ao Complexo Eruptivo Interno Antigo (SERRALHEIRO, 1976), e sobre estas repousa a Formação dos Flamengos, Formação dos Órgãos e por último o Complexo Eruptivo do Pico da Antónia.

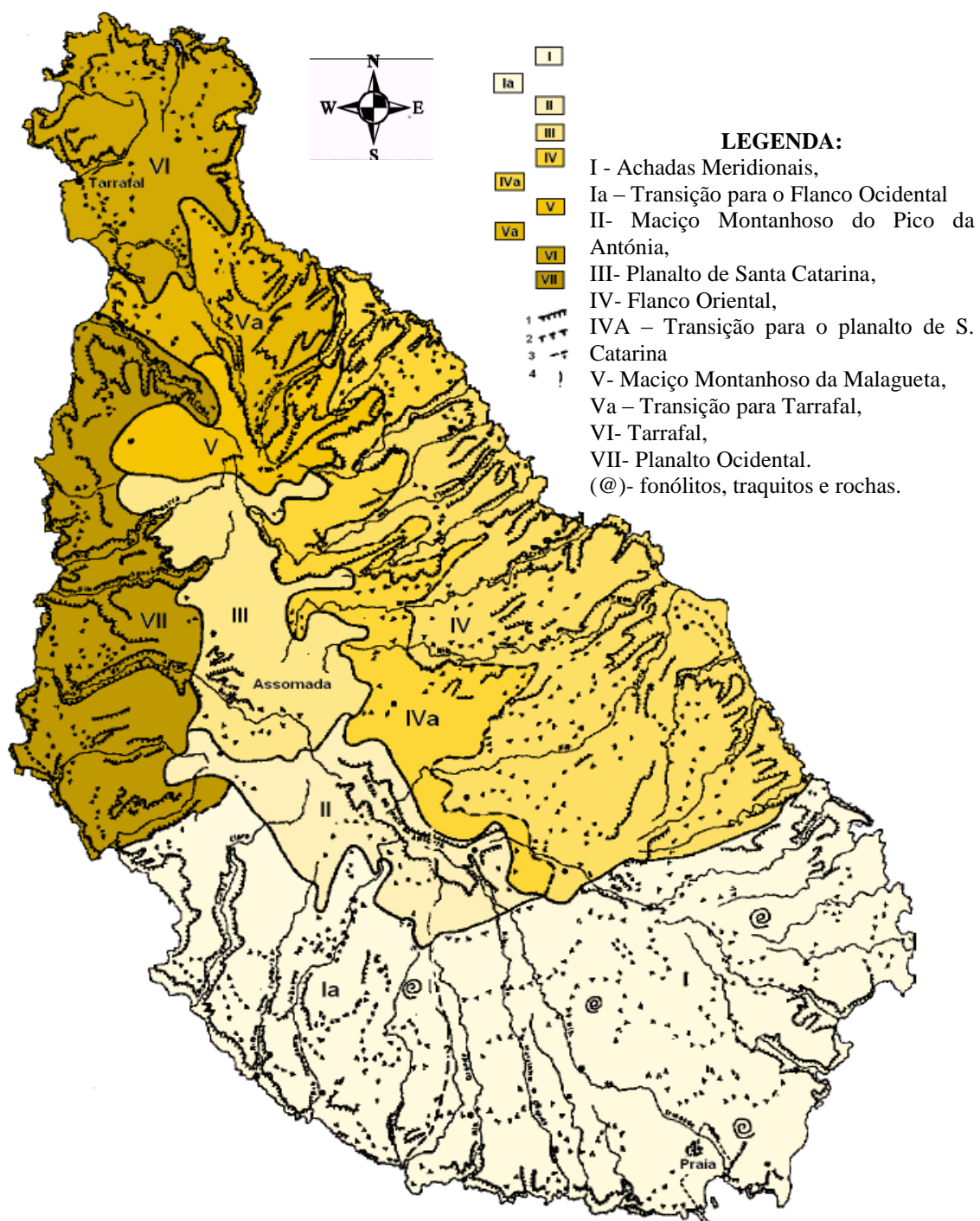


Figura 4.8. Grandes unidades geomorfológicas da ilha de Santiago, (MARQUES, 1990).

- 1 - Vertentes e/ou encostas com abruptos contínuos
- 2 - Superfície declivosa com transições bruscas,
- 3 - Superfície declivosa com transições suaves, e,
- 4 - Ação eólica intensa.

4.5. Solos e processos de salinização da Ilha de Santiago - Cabo Verde

O solo, como um sistema aberto dinâmico e em constante interação com a atmosfera, hidrosfera e biosfera, depende da intensidade em que atuam, apresentando assim características diferenciadas que definem suas potencialidades de exploração pelo ser humano.

Em Cabo Verde, os problemas de salinidade na agricultura frequentemente têm ocorrido devido à elevação do nível do lençol freático (PINA, 2007).

A gênese de solos salinos (holomórficos) está fortemente relacionada à formação geológica e à drenagem. Durante o processo de intermediação das rochas, dependendo da geomorfologia da região, os sais podem ser carreados por percolação para os horizontes inferiores ou levados a locais distantes por escoamento superficial, indo depositar-se e acumular-se em rios, barragens e mares (SILVA, 1994). Os sais das águas subsuperficiais podem, por capilaridade, acumularem-se na superfície do solo na medida em que a água for evaporada ou consumida pelos vegetais. Em regiões úmidas e por serem zonas de elevada precipitação, os sais são lixiviados até o nível estático (lençol freático) ou com maior frequência, eliminados através das águas superficiais, (TEIXEIRA, 1958).

Embora a fonte principal e direta de todos os sais presentes no solo seja as rochas (RICHARDS, 1954), são raros os exemplos em que estas fontes tenham provocado diretamente problemas de salinidade excessiva. A salinização por este processo é denominada de *salinização primária*. A salinização resultante devido à ação antrópica é conhecida como *salinização secundária*. Neste caso, a salinidade do solo resulta da qualidade da água usada na irrigação, da eficiência de lixiviação dos sais, da drenagem e da intensidade do uso.

Em determinadas situações, a salinização do solo ocorre devido ao transporte de partículas de sais pelos ventos que sopram dos mares para os continentes. Quando as ondas do mar se chocam com barreiras ou rochas, a água pulveriza-se no ar, podendo ser transportada a lugares muito distantes, dependendo da direção e velocidade do vento. Esse fato pode ser verificado, por exemplo, quando se determina a quantidade de sais na água da chuva em diferentes distâncias do mar (RHOADES, 1992).

Em áreas áridas, onde a evaporação é intensa e suplanta a precipitação, pode ocorrer a inversão sazonal da infiltração, quando parte da água subterrânea tem movimento ascendente por capilaridade, atravessando a zona subsaturada para alimentar a evaporação da superfície do solo. Este processo é responsável pela mineralização de horizontes superficiais, quando sais dissolvidos na água subterrânea cimentam os grãos e endurecem o solo de áreas semi-áridas a árida por precipitação de carbonato de cálcio pelas águas ascendentes. Nestas regiões e nos trópicos úmidos, a profundidade crítica do nível das águas subterrâneas condiciona a ascensão capilar, que varia de 2 à 2,5 m, dependendo da textura, do clima, da concentração de sais e do manejo da irrigação (RHOADES, 1992).

Em Santiago, as argilas presentes são do grupo dos silicatos. Já o grupo dos óxidos ocorre com maior frequência em regiões de intemperismo acentuado, onde os processos de percolação de águas são muito atuantes durante a formação do solo, (ALVES, *et al* 1971).

Na ilha de Santiago ocorrem oito grupos distintos de solos (DINIZ & MATOS, 1986), (Tabela 4.2.): Litossolos (LT), Regossolos (RG), Fluviolosos (FL), Cambissolos (CM), Castanozemes (K), Xerossolos (X), Vertissolos (VR) e Luviolosos (LV) (Faria, 1970) correspondência com as unidades da Legenda da FAO/UNESCO (1974).

Um mapa de solos na ilha está mostrada na Figura 4.9.

Tabela 4.2. Classificação dos solos da ilha de Santiago tendo como referência os estudos de Faria (1970) e as classificações da FAO/UNESCO (1988) e USA Soil Taxonomy (1975).

Classificações de solos		
Faria (1970)	USA Soil Taxonomy (1975)	FAO (1988)
Ordem	Subordem	
Solos incipientes (<i>entisols</i>)	Litossolos (<i>ortents</i>) - E Regossolos (<i>psaments</i>) - RG Aluviolosos modernos (<i>fluvents</i>)	Litossolos - LT Regossolos - RG Fluviolosos êutricos - FL Cambissolos - CM
Solos pouco evoluídos (<i>inceptisols</i>)	Litólicos (<i>umbrepts</i>) - L Litólicos (<i>ochrepts</i>) - L	Cambissolos - CM Cambissolos - CM
Solos isoúmicos (<i>molisols</i>)	Solos castanhos (<i>xerolls</i>) - Cn, Ca, Cv	Castanozemes - K
Solos isoúmicos (<i>aridisols</i>)	Solos pardos sub-áridos (<i>orthids</i>) - Pn, Pa, Pv, Pc	Xerossolos - X
Vertissolos (<i>vertisols</i>)	<i>xererts</i> - V	Vertissolos - VR
Paraferalíticos (<i>alfisols</i>)	Solos pardos-vermelhos (<i>xeralfs</i>) - PF	Luviolosos - LV

As principais características pedológicas referenciadas no PDH da bacia hidrográfica da Ribeira Seca, parte oriental da ilha de Santiago, em junho de 2001, são as seguintes:

- **vertissolos:** apresentam características da rocha-mãe (basalto), sendo particularmente ricos em bases. São solos minerais sem contato lítico nos primeiros 50 cm, apresentando, até esta profundidade, teores de argila superiores a 30%. Bastante estruturados, castanhos, castanho-escuros a pretos, no estado úmido, de acordo com o seu teor de matéria orgânica. Os vertissolos ocorrem em topografias planas a levemente onduladas, na generalidade dos casos, sujeitos a uma deficiente drenagem durante a estação chuvosa. São solos que resultam da alteração de rochas eruptivas básicas e lávicas, contendo elevado teor de Ca^{2+} e Mg^{2+} . O tempo seco promove a acumulação de carbonatos nas fendas.
- **solos pouco evoluídos sobre aluviões:** são caracterizados por grande heterogeneidade textural e pouca evolução, contendo materiais provenientes da rocha mãe recente que são constantemente removidos e transportados pelas águas das cheias,
- **solos pouco evoluídos sobre coluviões de encostas:** formados sobre materiais diversos resultantes da acumulação de resíduos de alteração mecânica e de rochas vizinhas,
- **solos isohúmicos de cor cinzenta (*sierozens*):** formados em zonas áridas e semiáridas caracterizados por rápida mineralização da matéria orgânica profundamente incorporada no perfil,
- **solos isohúmicos de cor castanha:** com estrutura poliédrica bem individualizada e textura média a fina, e,
- **solos fersialíticos de cor vermelha:** localizando-se em zonas áridas e semi-áridas, traduzem o alto teor em óxido de ferro, com um pH ligeiramente inferior a neutralidade.

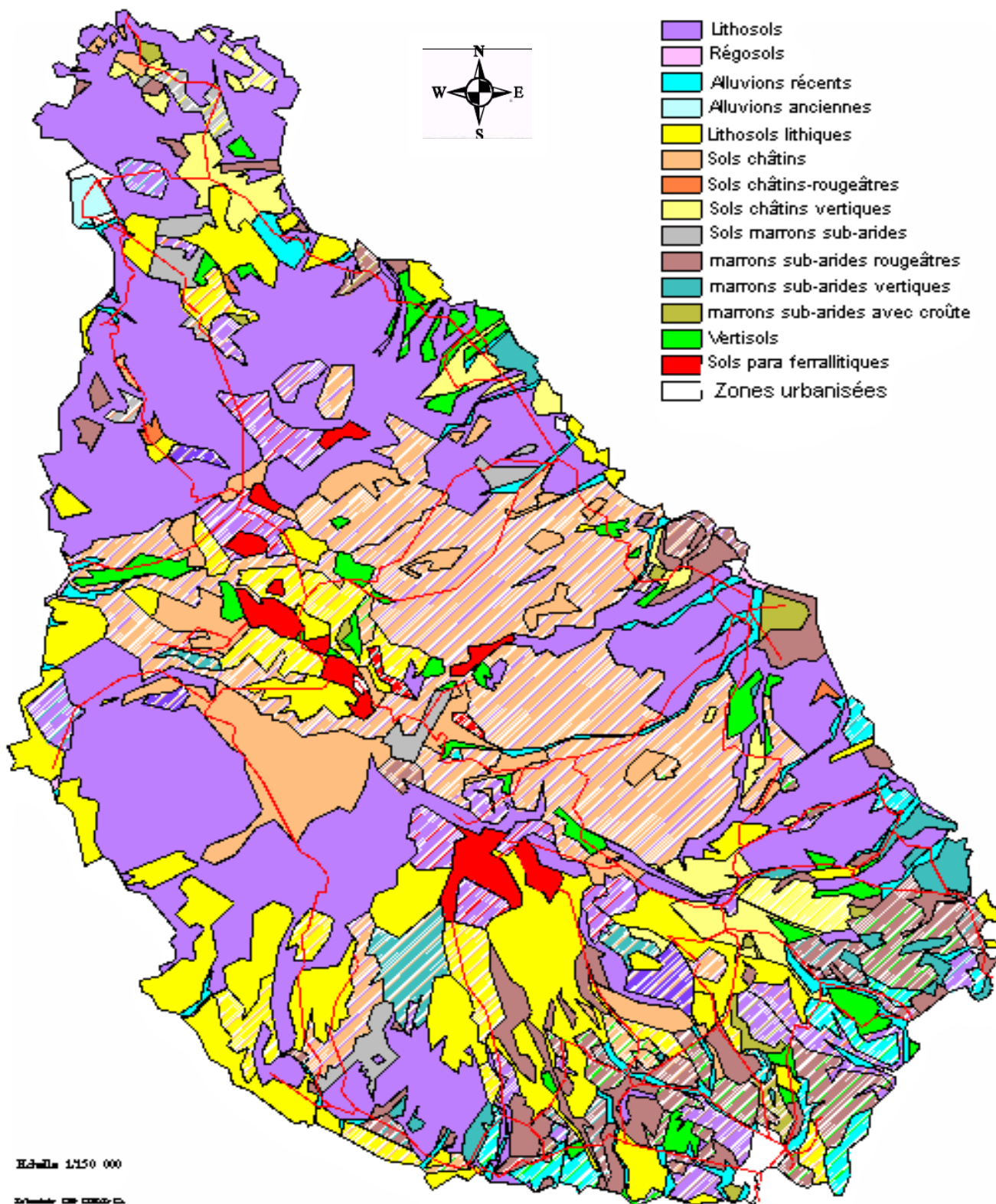


Figura 4.9. Solos da Ilha de Santiago, Cabo Verde. (Fonte: Faria (1970) e FAO/UNESCO (1974)).

A maioria dos solos da ilha está sujeita à degradação por salinização, em consequência principalmente da utilização de água salobra usada na irrigação e agricultura, da erosão e da extração de areia nos leitos das ribeiras (Figura 4.10.).



Figura 4.10. Processo de “Apanha da Areia” no interior da Ilha de Santiago. Ribeira da Barca Charco, Cabo Verde (PINA, 2007).

A ocorrência de elevada evapotranspiração, a reduzida precipitação anual e a fraca drenagem também contribuem para a salinização dos solos, formando um lençol freático salino relativamente próximo da superfície e acumulando sais ao longo da estrutura do solo.

Os mares e oceanos se constituem em depósitos naturais de sais que são carreados pelas águas escoadas da superfície terrestre. Por serem excessivamente salinas, é provável que as águas que rodeiam a ilha de Santiago tenham sido a principal fonte de sais em solos provenientes dos depósitos marinhos miocênicos. As periódicas inundações marinhas nas marés-altas constituem a principal fonte de sais em áreas de baixa cota como, por exemplo, na Ribeira de São Domingos e Ribeira Seca, (PINA, 2007) (Figura, 4.11-a). Estudos publicados no Plano de Desenvolvimento Hídrico da Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca (INGRH, 2001) revelaram que uma intrusão salina foi detetada em poços (cacimbas) 2 km da costa. Outra fonte de salinização por águas do mar advém das pororocas, quando as águas marinhas invadem o leito dos rios a 2 ou 3 km de distância, transbordando em suas margens. Quando as pororocas retrocedem, muita água transbordada não acompanha a volta, ficando depositada em depressões, aumentando assim a concentração salina em áreas localizadas nas margens dos rios, (PINA, 2007) (Figura 4.11-b).

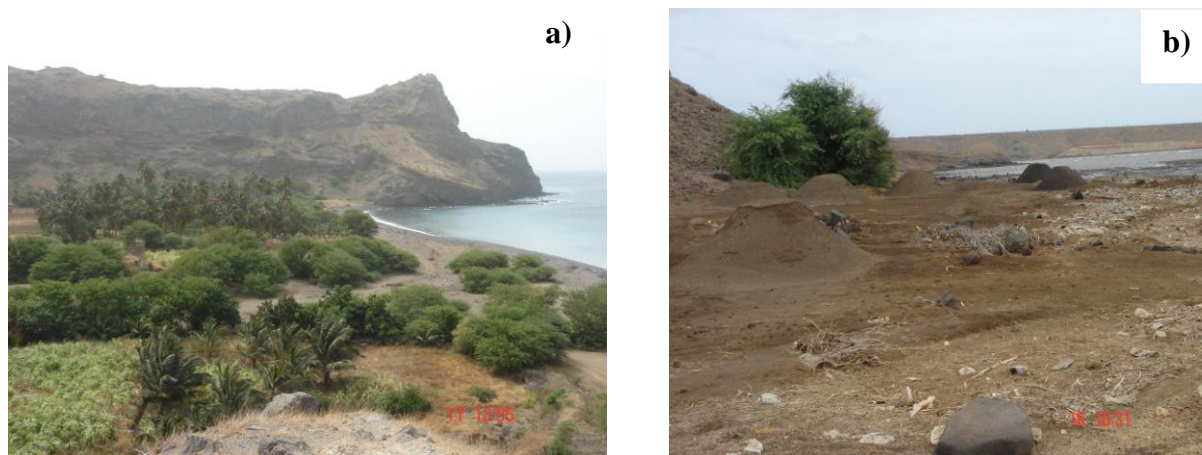


Figura 4.11. Zona oriental da Ilha de Santiago. Ribeira de S. Domingos, Cabo Verde (PINA, 2007).

Nem todos os sais incorporados pelas águas ficam no solo. Mesmo em regiões áridas ou semi-áridas, uma parte pode ser eliminada por percolação de águas vindas da irrigação ou de chuvas, alguma parte pode tornar-se insolúvel mediante a precipitação, quer por reações químicas ou por atingir os limites de solubilidade na solução do solo e, outra parte, embora em quantidade pequena, pode ser absorvida pelas plantas. Para que a agricultura irrigada seja sustentável, o nível de concentração de sais no solo, em condições de equilíbrio, deverá ser inferior ao limite de tolerância das culturas à salinidade.

Os solos de regiões áridas ou semi-áridas com boa drenagem predominam os cátions de Ca^{2+} , Mg^{2+} . Porém, quando há uma drenagem inadequada ou o nível estático se encontra muito próximo da superfície, esses cátions, durante o processo de concentração de sais por evaporação ou evapotranspiração, são precipitados na forma de carbonato de cálcio, visto serem estes os compostos de menor solubilidade entre os acumulados, aumentando assim a proporção relativa de sódio solúvel na solução do solo (BLETRÁN, 1999).

O fenômeno de acumulação de sais no solo é denominado salinização, ao aumento gradual de sódio trocável se denomina sodificação. De modo geral, a sodificação é um processo posterior à salinização. Porém eles podem ocorrer simultaneamente quando se tem, na solução do solo, sais exclusivos ou predominantemente de sódio (difícil de ocorrer, pois a rocha normalmente contém um conjunto de compostos químicos), (CAMPOS, *et al*, 2004).

A água das chuvas, quase pura ao cair e penetrar no solo, solubiliza e arrasta os íons de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ , bem como os radicais CO_3^{-2} , HCO_3^- , SO_4^{-2} e outros, transformando-se então numa solução, que flui para rios e lagos. Ao se irrigar um solo de drenabilidade deficiente ou nula, situado em regiões de baixa precipitação média anual e alto déficit hídrico, caso concreto, ilha de Santiago, este se torna salino num período bastante curto, porque as plantas removem basicamente água do solo, enquanto que a maior parte dos sais fica retida. Nestas condições, o solo tende a se tornar salino caso não seja drenado artificialmente, (CABRAL, *et al*, 2004).

4.6. Proporções relativas de minerais nos solos da Ilha de Santiago - Cabo Verde

Os solos associados ao Complexo Eruptivo Antigo (CA) são bastante enriquecidos em feldspatos potássico, quando comparados com os solos desenvolvidos nas restantes formações vulcânicas. As rochas do CA são as mais ricas em alcalis (Na_2O e K_2O). Estes solos possuem também piroxênios, filossilicatos (esmectita e, em menor quantidade, caulinita e serpentina), quartzo, hematita, calcita e outros minerais (zeólitos, dolomita, larnite, siderita, magnetita, titanomagnetita, esfena, zircão, cromita, raras leucitas, apatita) e olivina. O enriquecimento em feldspato, dolomita e calcita, característica que os distingue dos outros solos em rochas vulcânicas, é consequência da presença de rochas de texturas granulares, sieníticas e gabróicas, de rochas traquíticas-fonolíticas, dos carbonatitos, e do fato das rochas desta formação se apresentarem muito alteradas e com veios de carbonatos e zeólitos, (AMARAL, 1974).

Os solos que ocorrem sobre a Formação dos Flamengos (FL) são constituídos por quartzo, plagioclásio e feldspato potássico, piroxênio, filossilicatos (esmectita, serpentina e rara caulinita), hematita, olivina e outros minerais representados por zeólitos, esfena, cromita, magnetita, granada, pouca dolomita). Estes solos não possuem calcita, contudo nestas rochas também ocorrem alguns veios de carbonatos e zeólitos. Dentre o conjunto de solos amostrados, estes são os mais ricos em filossilicatos e os mais pobres em hematita, o que está de acordo com o fato das rochas da Formação dos Flamengos serem pobres em Fe_2O_3 (T) dentre as rochas basaníticas (ALVES, *e tal*, 1971).

Os solos que ocorrem sobre a Formação dos Órgãos (CB) são os mais ricos em piroxênios, e possuem também plagioclásios e feldspato potássico, filossilicatos (esmectita, serpentina e rara caulinita), quartzo, hematita e, em menores quantidades, ocorre olivina e calcita, além de magnetita, cromita, larnita, siderita, granada, zeólitos, nefelina, dolomita, clorita, granada e brucita. A composição química das rochas desta formação é muito semelhante à das rochas de Flamengos, mas as proporções mineralógicas são distintas nos solos de ambas as Formações. A ocorrência de larnita, granada e brucita, indica que as rochas vulcanoclásticas que constituem a Formação dos Órgãos sofreram metamorfismo de contato provocado pela implantação das lavas do Pico da Antónia, que as cobriram, (AMARAL, 1974).

Os solos derivados da Formação do Pico da Antónia (PA) são constituídos essencialmente por quartzo, plagioclásio e feldspato potássico, piroxênios, filossilicatos (esmectita mais interstratificados, mica/ilita, serpentina e pouca caulinita), hematita, calcita, olivina e outros minerais (larnita, siderita, dolomita, zeólitos, nefelina, magnetita, esfena, zircão).

Os solos que ocorrem associados à Formação da Assomada (A) são constituídos fundamentalmente por quartzo, filossilicatos, plagioclásio, feldspato potássico e hematita. Ocorre também, nestes solos, piroxênios e outros minerais onde se destaca a presença de (titano) magnetita, zeólitos, zircão, granada, nefelina, larnite e siderita, barita, esfena e olivina. Estes solos possuem a maior proporção de filossilicatos e a menor de piroxênios, olivina e também, com exceção dos solos da Formação do Monte das Vacas (MV), a maior proporção de hematita. As rochas destas duas formações são as que possuem os teores médios de Fe_2O_3 (T) mais elevados. As rochas da Formação da Assomada apresentam-se com muita frequência bastante

alteradas e, por isso, os solos nesta formação possuem maiores proporções de filossilicatos e menores de piroxênios e olivina do que os solos desenvolvidos sobre as outras formações.

Os solos desenvolvidos sobre a Formação Monte das Vacas (MV) caracterizam-se pela presença de quartzo, hematita, e (titano) magnetita, plagioclásio e feldspato potássico, piroxênio, filossilicatos e olivina. O enriquecimento em hematita e (titano) magnetita pode dever-se ao fato desta formação corresponder aos depósitos piroclásticos formados à superfície e ao fato das suas rochas serem as que apresentam teores mais elevados em $Fe_2O_3(T)$, são os solos mais enriquecidos em olivina, (ASSUNÇÃO, *et al*, 1969 - 1970).

O mineral existente em maior proporção relativa nos solos da ilha de Santiago é o quartzo, com exceção dos solos no Complexo Antigo e da Formação dos Órgãos onde o principal mineral é o feldspato e o piroxênio, respetivamente. O quartzo resulta do transporte eólico e da alteração dos minerais silicatados das rochas, pois as rochas possuem olivina ou nefelina e como tal não possuem quartzo, (AMARAL, 1974).

O segundo mineral em termos de proporção relativa nos solos é o feldspato, com exceção dos solos que se desenvolvem sobre a Formação dos Órgãos (CB), onde é o piroxênio o mineral dominante, e dos solos que se desenvolvem sobre a Formação da Assomada onde são os filossilicatos os minerais dominantes. A existência de grande proporção de feldspato nas amostras deve-se ao fato de estarmos em presença de um clima árido a semi-árido e ainda ao seu relevo elevado, fatores que inibem a meteorização dos feldspatos. Estes mesmos fatores também permitem que o piroxênio e a olivina permaneçam nos solos. Os solos que contêm mais olivina são os que se desenvolvem sobre a Formação do Monte das Vacas, que é a mais recente e, portanto, onde a meteorização também é mais jovem.

O piroxênio é o mineral que ocorre em maior proporção relativa nos solos associados à Formação dos Órgãos (CB) e em menor proporção nos associados à Formação de Assomada (A). Os solos associados a Formação do Monte das Vacas (MV) são caracterizados por possuírem a maior proporção relativa de olivina, hematita, (titano) magnetita e cromita. A olivina é um mineral muito instável em ambiente superficial e a sua alta proporção nestes solos indica que a meteorização dos piroclastos que constituem esta formação é pouco intensa, (ALVES, *e tal*, 1971).

As proporções mineralógicas relativas observadas nestes solos refletem essencialmente a mineralogia da rocha-mãe (feldspato, piroxênio e olivina). As proporções observadas também refletem o efeito das condições climáticas tais como a precipitação, temperatura e direção dos ventos e que condicionam os processos de meteorização e transporte/deposição, promovendo um enriquecimento em quartzo, filossilicatos, hematita e calcita.

De todos os solos de Santiago, os desenvolvidos sobre as rochas da Formação da Assomada são os que possuem maior proporção de minerais de alteração e menores em piroxênio e olivina, já que as suas rochas se encontram geralmente muito alteradas, (AMARAL, 1974).

4.7. Clima de Cabo Verde

O arquipélago de Cabo Verde, pela sua situação geográfica, assim como pelas altas pressões do Atlântico (Açores ao norte e Santa Helena o sul), integra o *Sahel* (Faixa ao sul do Saara), caracterizado por um clima tropical seco, onde há duas estações climáticas bem distintas: a seca (de novembro a julho) e a úmida (de agosto a outubro) (AMARAL, 1974). O Sistema da Circulação Intertropical gerada pelos anticiclones dos Açores e de Santa Helena, a localização geográfica do arquipélago de Cabo Verde e as flutuações zonais da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) explicam a influência determinante desses centros de ação na caracterização destas duas estações climáticas.

A estação chuvosa é geralmente marcada pela ocorrência de intensas precipitações (Figura 4.12.), e operações culturais, tais como as sementeiras das principais culturas praticadas em regime de sequeiro, nomeadamente do milho e feijões. Durante esse período, a nebulosidade é intensa, a amplitude térmica é pequena, e a temperatura e a umidade relativa do ar são mais elevadas. Esta estação é também caracterizada por precipitações aleatórias de má distribuição espaço-temporal, o que condiciona fortemente a produção de culturas pluviais ou irrigadas.

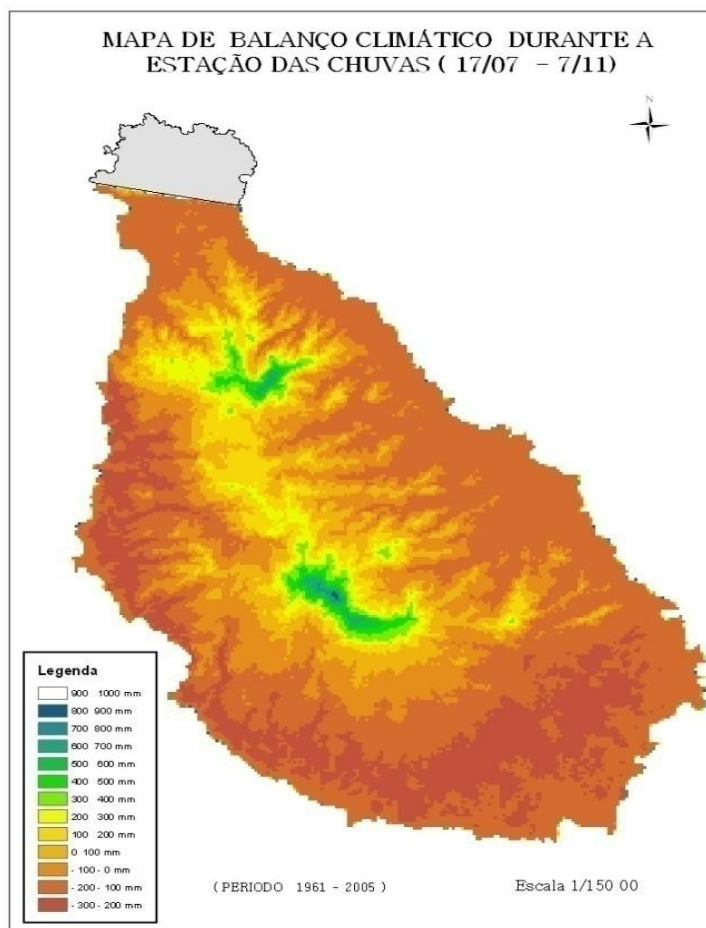


Figura 4.12. Balanço climático durante a estação das chuvas da Ilha de Santiago, Fonte: INMG, 2005.

A estação seca, cobre um período de quase nove meses e é marcada pela ausência quase total de precipitações, associada a uma elevada taxa de evaporação agravada pela insolação (dada a fraca nebulosidade) e frequente ocorrência de ventos secos de nordeste. Os meses mais áridos são os de abril e maio, e a variação diurna de temperatura e umidade é mais acentuada do que na estação úmida. Em função da altitude, a aridez (secura, esterilidade) se distribui em três classes principais (Figura 4.13.).

- **zona bastante árida:** do litoral até a altitude de 200 metros no centro da ilha,
- **zona semi-árida:** do interior da ilha, com altitude intermediária (300 à 500 m), e,
- **zona sub-húmida:** de altitude superior a 500 metros.

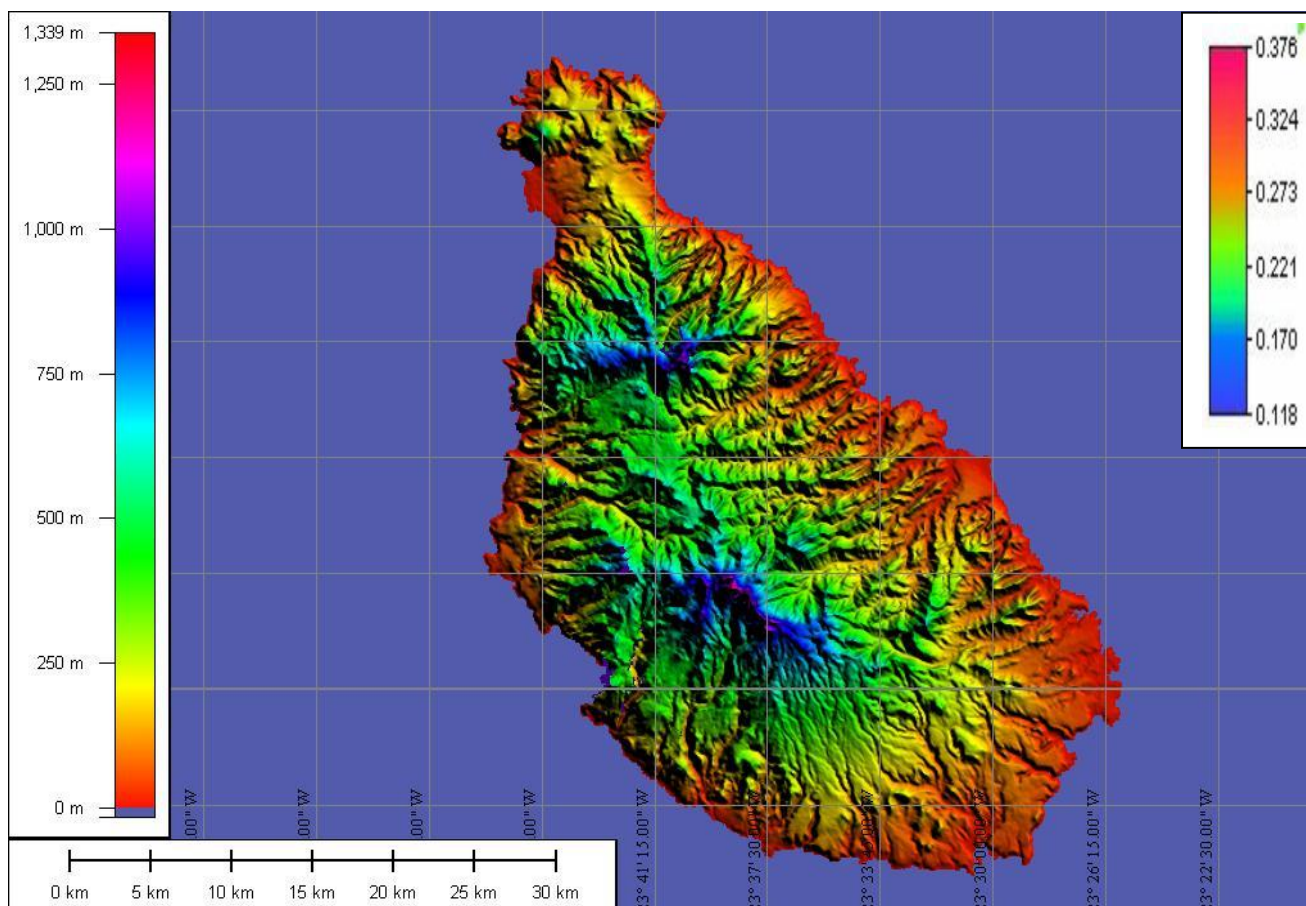


Figura 4.13. As diferentes classes de aridez da Ilha de Santiago, Cabo Verde. Fonte: INMG, 2005.

As figuras 4.12 e 4.13 acima mostram o mapa de isovalores do índice de aridez médio, calculado segundo a definição da ONU, para diversos postos pluviométricos da ilha de Santiago. Os valores médios foram calculados, com base nos anos de 1962 a 2005.

A classificação do Índice de Aridez (IA) sugeridas pela ONU:

- < 20 ÁRIDO
- 20 < IA < 50 SEMI-ÁRIDO
- 50 < IA < 65 SUB-ÚMIDO SECO
- 65 < IA < 100 SUB-ÚMIDO ÚMIDO
- > 100 ÚMIDO

Segundo definição das Nações Unidas, o IA pode ser escrito através da Equação (3):

$$IA = 100 \times \frac{Pr}{ET_0} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde Pr é a precipitação e ET_0 é a evapotranspiração potencial.

Traços marcantes do clima são os frequentes episódios de seca provocados pela grande variabilidade espaço-temporal das precipitações e a presença de microclimas condicionados pela orografia das ilhas e exposição aos ventos dominantes, evidenciados pelo marcante contraste da paisagem agrícola de uma ilha a outra. Essas feições estão na base da identificação das zonas agroclimáticas de Cabo Verde, onde uma vasta região árida cobre uma superfície considerável das ilhas. Entre as zonas representativas do arquipélago, a zona semi-árida é a que predomina no conjunto das ilhas, muito embora possam ser encontradas zonas onde as características e a ocorrência de determinados fenômenos climáticos condicionam sua classificação em zona sub-úmida e de transição para zona úmida.

As Figuras 4.14 e 4.15., apresentam dados mensais da temperatura, humidade relativa, insolação, intensidade do vento a 2 metros e da evaporação, registados nos cinco concelhos da ilha de Santiago e para a média espacial da ilha, (INMG, 2005).

Nestas figuras podem ser observadas as seguintes características:

- o ciclo anual da temperatura tem uma amplitude pequena (aproximadamente 4 °C) em qualquer das estações; a média das cinco estações aumenta de janeiro (21,3 °C) a setembro (25,6 °C) voltando a diminuir até a janeiro; sendo a média anual da ilha de 23,6 °C,
- a variação mensal da temperatura não difere muito de estação para estação, durante todo o ciclo anual,
- o ciclo anual da humidade relativa segue, a grosso modo, o ciclo da temperatura. A correlação entre ambas é de 0,89, significativa a um nível de significância de 1%. Os valores máximos acontecem também em Setembro, mas os mínimos registam-se só em Março, e,
- as médias de insolação são máximas de Abril a Maio, e mínimas entre Julho e Agosto, conforme a estação.

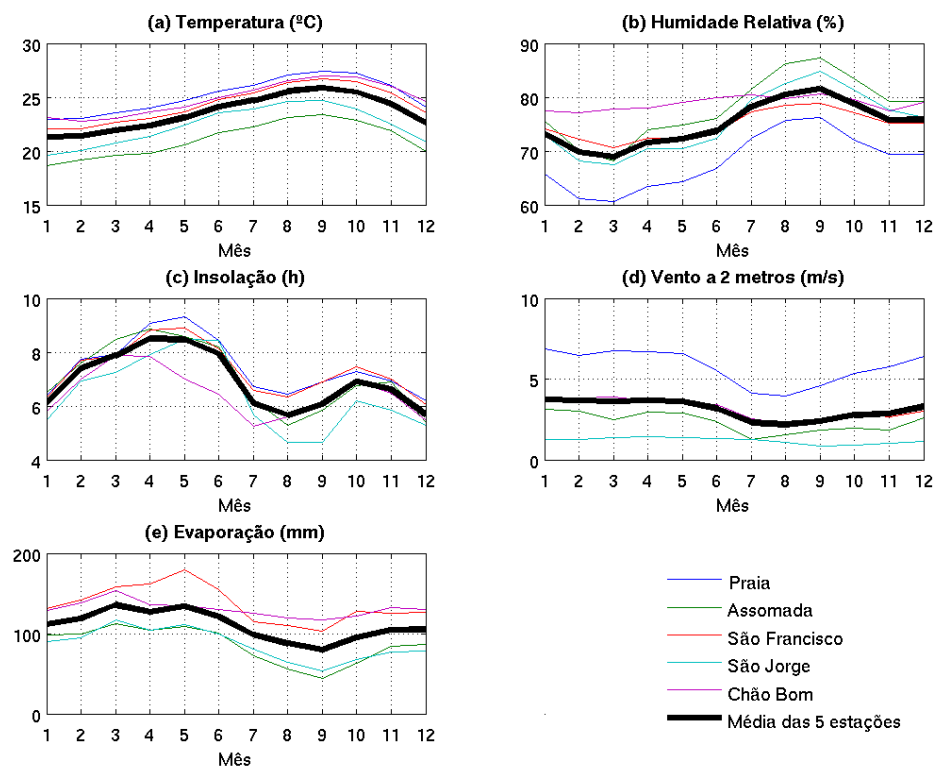


Figura 4.14. Dados mensais e distribuição espacial dos parâmetros da (a) temperatura, (b) humidade relativa, (c) insolação, (d) intensidade do vento a 2 metros e da (e) evaporação, nos cinco concelhos da ilha de Santiago e para a média espacial da ilha.

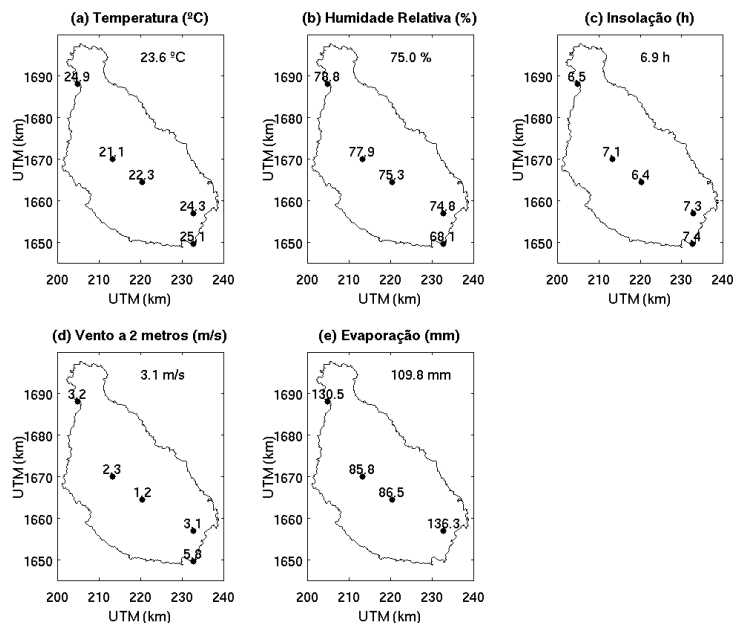


Figura 4.15. Dados mensais e distribuição espacial dos parâmetros da (a) temperatura, (b) humidade relativa, (c) insolação, (d) intensidade do vento a 2 metros e da (e) evaporação, nos cinco concelhos da ilha de Santiago e para a média espacial da ilha.

4.8. Ventos dominantes no arquipélago de Cabo Verde

No arquipélago de Cabo Verde, os ventos predominantes são os alísios provenientes do nordeste, ao norte, as ilhas de Barlavento, que sopram quase ao longo do ano todo, e com maior frequência durante a estação seca e parte da estação úmida. Há também ventos suaves e locais, conhecidos como brisas, que são originários das zonas costeiras, formados pela diferença de temperatura entre a superfície das ilhas e a das águas oceânicas, tendo um papel moderador do clima.

De modo geral, o arquipélago está sob a influência de três fortes massas de ar com diferentes características, cujo regime varia consoante com a intensidade dos centros anticiclônicos:

- **alísios marítimos:** massas de ar marítimo originário do anticiclone dos Açores, que no seu trajeto conservam certa umidade e ao atingirem o arquipélago, sobretudo nas ilhas montanhosas, originam algumas precipitações;
- **alísios continentais (harmatão ou lestada):** massas de ar tropical continental, quente e seco, proveniente do Leste e do Nordeste do Saara, carregadas de poeira que, ao atingirem o arquipélago, provocam a redução da visibilidade (conhecida como ‘bruma seca’) e aumentam a secura do ar, prejudicando o desenvolvimento de culturas em fase de crescimento.
- **monções:** massas de ar úmido de caráter instável que, associadas às flutuações da Zona de Convergência Intertropical, são as principais responsáveis pelas precipitações da estação úmida.

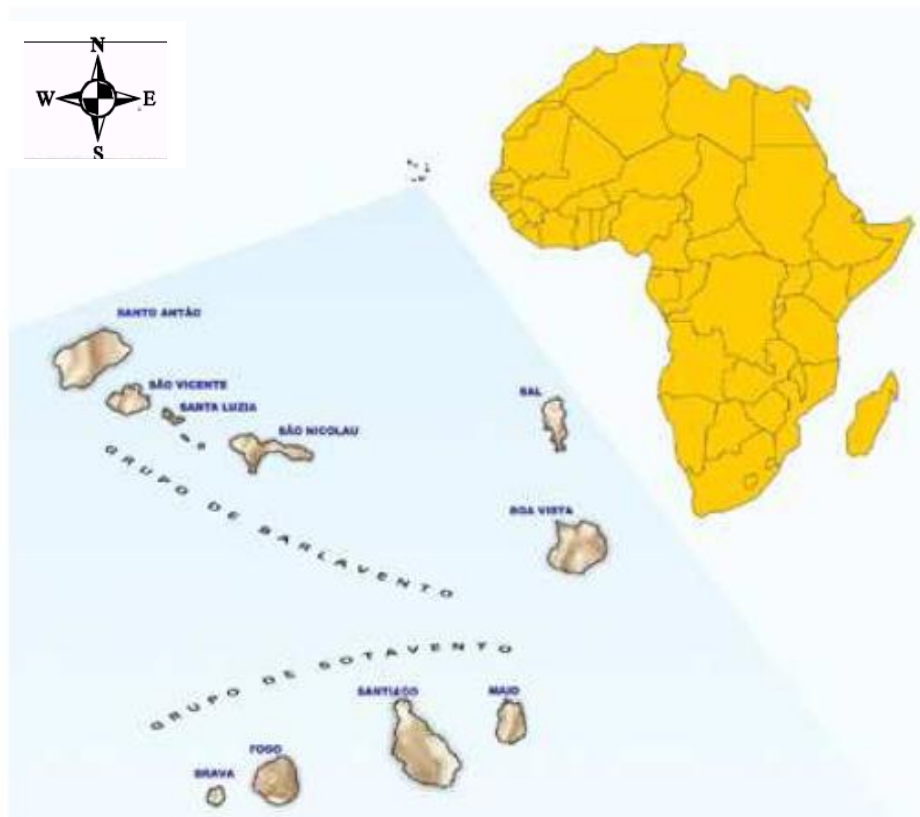


Figura 4.16. Arquipélago de Cabo Verde em relação aos ventos dominantes. Fonte: INMG, 2005.

4.9. Caracterização física das bacias hidrográficas de Santa Cruz, Ilha de Santiago

As Bacias Hidrográficas da Ribeira dos Picos, da Ribeira dos Saltos e da Ribeira de Santa Cruz, estão localizadas na face Nordeste da serra do Pico de Antónia. A de Santa Cruz, é dividida em 3 sub-bacias; Ribeira de Montanha com uma área de 12,5 km², Ribeira de Mendes Faleiro Cabral/São Cristóvão com uma área de 25,5 km² e Ribeira Seca que é o leito principal da bacia com uma área de 33,5 km², Figura 4.17.

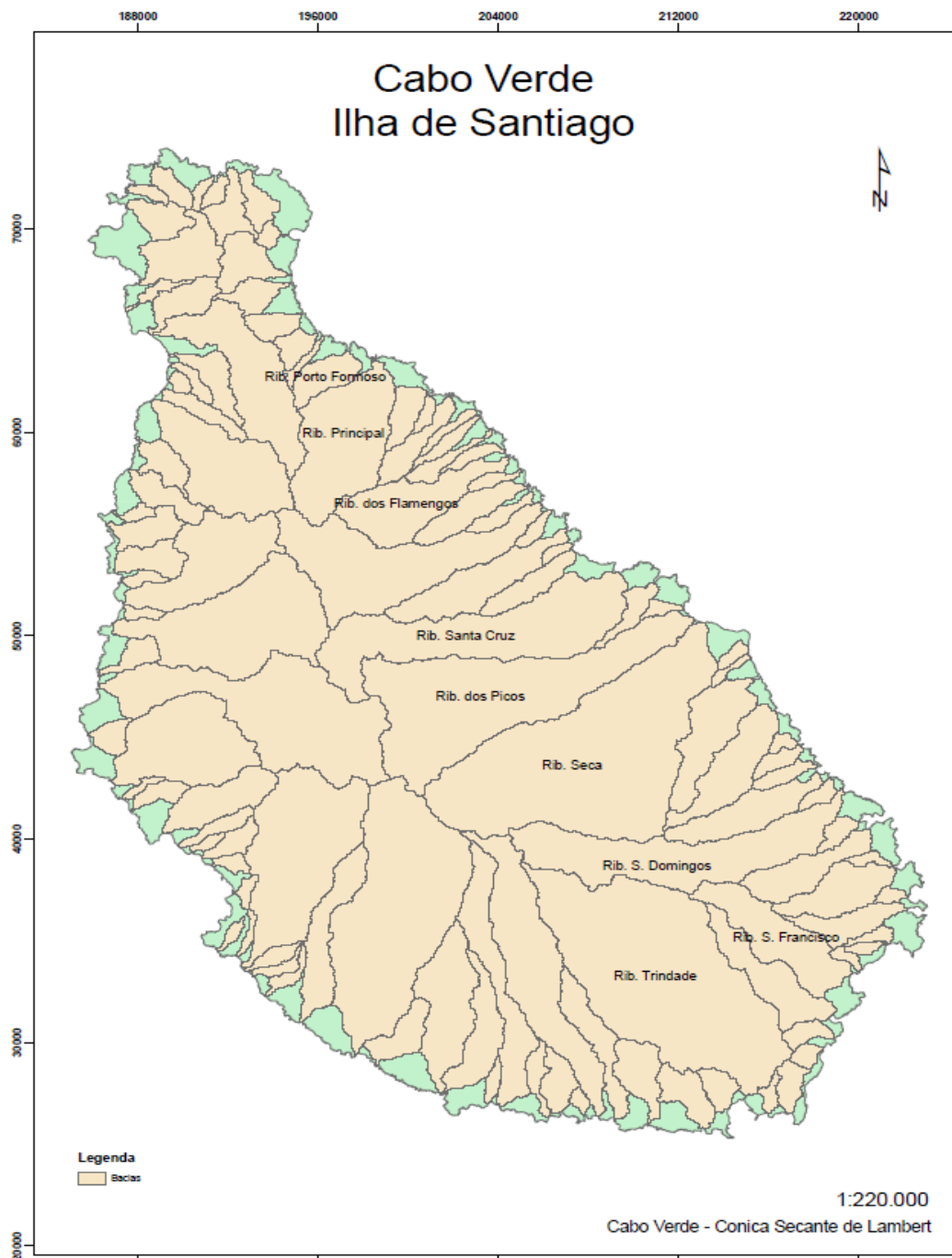


Figura 4.17. Localização das Bacias Hidrográficas em estudo, da Ilha de Santiago.

PINA, A.P.S.A. – 2011. Fundamentos Hidrogeoquímicos aplicados na bacia hidrográfica de Santa Cruz, ilha de Santiago – Cabo Verde, como instrumentos para a gestão de recursos hídricos.

As Bacias Hidrográficas de Santa Cruz, caracteriza-se por terem altitudes de 200 a 400 m, topos convexos, alongados, estreitos e inclinados e vertentes de perfil e de traçado rectilíneos, com declives frequentemente acima dos 20 %.

As Achadas do setor nordeste, abaixo dos 200 m de altitude, correspondem a planaltos sub-estruturais, com topos limitados por cornijas de basalto e vertentes regularizadas por cascalheiras, com declives que suavizam para a base, perfis rectilíneo-côncavos e traçados rectilíneos predominantes.

A grande diversidade das formas de relevo, os declives acentuados das vertentes e a instabilidade acentuada do solo, pelo seu remeximento antrópico para fins agrícolas, permitem uma dinâmica das vertentes muito ativa, acentuada pelas condições de clima semi-árido.

Os tipos de processos erosivos predominantes em cada unidade de relevo dependem das suas condições de erodibilidade, profundamente relacionadas com a morfologia e a litologia (COSTA, 1996 e 2002).

Os processos erosivos resultantes da ação da gravidade, típicos da longa estação seca, afetam setores bem definidos pelas condições lito-estruturais locais das rochas do substrato. Neles se incluem os desabamentos que afetam essencialmente vertentes talhadas em basaltos fragmentados e/ou com rebordos rochosos, casos das Achadas orientais ou do Maciço do Pico da Antónia (COSTA, 2006). Integram também, as escoadas que ocorrem a seco, mais frequentemente na unidade de Cutelos.

Os processos erosivos sob a ação do escoamento ocorrem no período úmido, quando a intensa atividade agrícola torna o solo mais vulnerável (COSTA & RAPOSO, 2005). Afetam de forma generalizada todas as unidades de relevo, embora se acentuem nos Cutelos, onde se formam os sulcos e as ravinas mais extensos, largos e profundos e com uma maior densidade. Nesta mesma unidade existem os testemunhos mais marcados do escoamento elementar e, como a lavagem superficial de elementos finos, evidenciado pelo rebaixamento topográfico, bem como do escoamento organizado, com o entalhe particularmente ativo de valeiros (COSTA, 2004). Nas Achadas são comuns os ravinamentos, sendo pouco marcados os processos de sulcagem e lavagem de elementos finos, devido à frequente cobertura por cascalheiras (COSTA, 2002).

4.9.1. A Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca – sub bacia de Santa Cruz.

A Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca é a maior da ilha de Santiago, com uma área aproximada de 70 Km², e desenvolve-se na sua fachada oriental, mais pluviosa, entre o maciço do Pico da Antónia (1350 m) e a costa leste a sul de Pedra Badejo (Figura 4.18.).

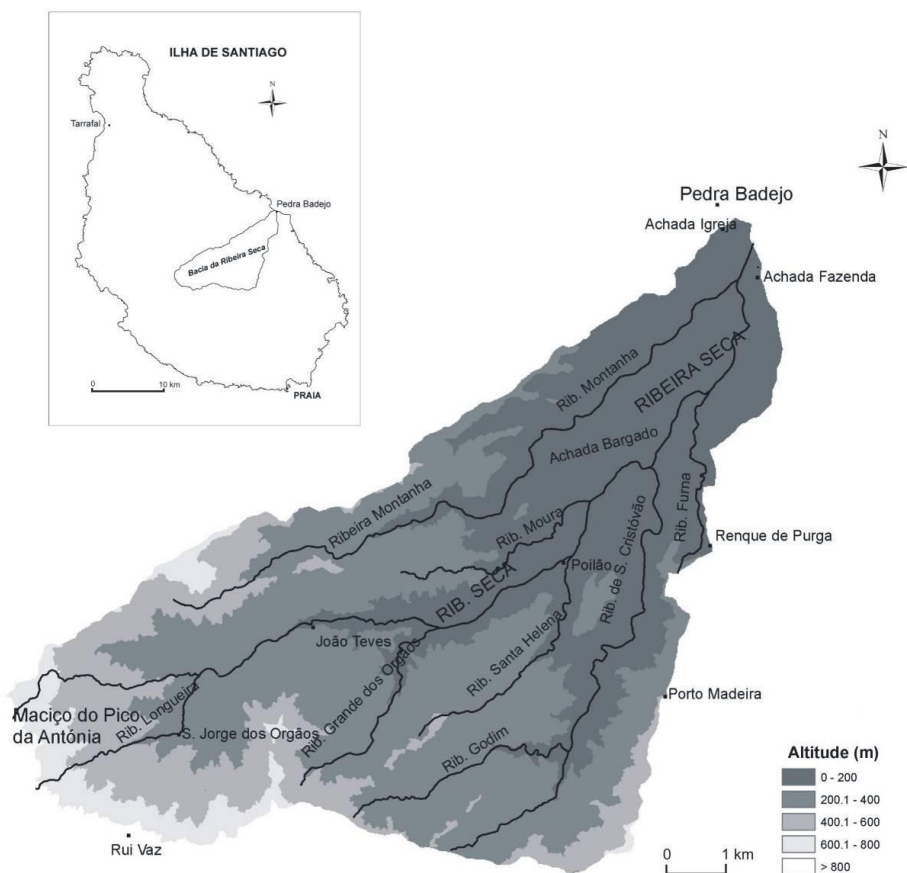


Figura 4.18. Localização da Bacia Hidrográfica de Ribeira Seca, ilha de Santiago.

Apresenta uma grande diversidade de condições geomorfológicas, litológicas, pedológicas, hidrográficas, pluviométricas e de cobertura vegetal, sendo uma das bacias da ilha mais relevantes do ponto de vista de produção agrícola. A cultura praticada nesta bacia é principalmente a do milho, quase sempre associada à cultura de feijões, batatas e mandioca. Essas duas últimas são geralmente cultivadas em zonas úmidas de altitude ou zonas sub-úmidas, quando há precipitação abundante. Anualmente há grande pressão para a adoção da agricultura de sequeiro, dificultando a determinação exata das áreas realmente cultivadas, cujos valores variam de acordo com volume e a distribuição das precipitações anuais. Dados do PDH indicam que a área ocupada pela agricultura na bacia é de 5 120 ha. A agricultura de regadio também é praticada como uma alternativa, sendo as principais culturas irrigadas a do tomate (dominante), da cana de açúcar, mandioca, banana, batata doce, batata inglesa, côco, árvores frutíferas e hortaliças.

CAPÍTULO 5 – HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS

CAPÍTULO 5

HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS

5. HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS

Apesar da água ser tão familiar e reconhecidamente um componente essencial da estrutura e do metabolismo de todos os seres vivos, parece paradoxal que ela não seja o elemento melhor conhecido do Universo.

Para Aristóteles (384-322 a.C.), um dos maiores e mais influentes pensadores gregos, fogo, ar, terra e água seriam os quatro elementos fundamentais formadores do Universo. Até o século XVIII, a água era considerada como um corpo simples. Em 1781, o químico e teólogo inglês Joseph Priestley realizou, por combustão, a síntese do hidrogênio. Quase no mesmo período, os químicos Lavoisier (1743-1794) e Cavendish (1731-1810) verificaram que a molécula da água era composta por hidrogênio e oxigênio, principalmente. Sabe-se, hoje, que uma gota de água é composta por milhões de partículas muito pequenas, chamadas de moléculas. Em 1805, Gay-Lussac (1778-1850) e Humboldt (1769-1859) determinaram que na molécula da água a relação hidrogênio/oxigênio era de 2 para 1, isto é, de dois átomos de hidrogênio para um átomo de oxigênio, conduzindo a sua fórmula molecular, atualmente conhecida H_2O .

A água é na verdade combinação de muitas substâncias. Sabe-se, hoje, que até a mais pura das águas contém outros elementos além dos átomos do hidrogênio e do oxigênio. A molécula da água pode conter porções ínfimas de deutério, um átomo de hidrogênio que pesa mais do que um átomo ordinário do hidrogênio. A água formada por uma combinação de deutério e oxigênio é chamada de água pesada.

A água pura é um líquido incolor, inodoro, insípido e transparente. Entretanto, por ser um ótimo solvente, nunca é encontrada em estado de absoluta pureza, contendo várias impurezas que vão desde alguns miligramas por litro na água da chuva a mais de 30 mil miligramas por litro na água do mar.

A qualidade da água é definida pela sua composição química, física e bacteriológica. As características desejáveis da água dependem da sua utilização. Para o consumo humano, há necessidade de água pura e saudável, isto é, livre de matéria suspensa visível, cor, gosto e odor, de quaisquer organismos capazes de provocar enfermidades e de quaisquer substâncias orgânicas ou inorgânicas que possam produzir efeitos fisiológicos prejudiciais.

A qualidade da água varia com o tempo, exigindo para o seu controle a realização de análises em diferentes épocas do ano, e só sua repetição poderá reduzir o efeito da variação dos resultados. O erro mais comum em projetos de instalações de tratamento de águas é, o de basear os estudos nos resultados de uma única análise da água (NETTO, 1966).

Muitas das vezes, no caso das grandes nascentes com vários aproveitamentos, pode-se recorrer à experiência obtida em outros pontos de utilização, à montante ou à jusante.

Para se conhecer as condições de um manancial de superfície não bastam os resultados de exames e análises da água: a inspeção sanitária da bacia hidrográfica é medida sempre recomendável.

As características químicas das águas subterrâneas refletem os meios por onde percolam, guardando uma estreita relação com os tipos de rochas drenados e com os produtos das atividades humanas adquiridos ao longo de seu trajeto. Em áreas industrializadas encontra-se uma forte marca das atividades humanas na qualidade química das águas. Esta relação é em particular marcante onde predominam os aquíferos do tipo fissural, passíveis de serem facilmente influenciados pelas atividades humanas (FETTER, 1993). Nas proximidades dos grandes centros urbanos temos problemas associados às seguintes descargas de poluentes: efluentes líquidos industriais e domésticos, chorumes provenientes de depósitos de lixo doméstico e de material particulado lançado na atmosfera pelos veículos.

Nas áreas onde se desenvolve algum tipo de agricultura, a química da água pode estar fortemente influenciada pelos produtos utilizados: inseticidas, herbicidas, adubos químicos, cálcario, entre outros, (PINA, 2005).

O tratamento da água deverá ser adotado e realizado apenas depois de demonstrada sua necessidade e, sempre que a purificação for necessária, compreender somente os processos imprescindíveis à obtenção da qualidade que se deseja, com custo mínimo.

A necessidade de tratamento e os processos exigidos deverão ser determinados com base nas inspeções sanitárias e nos resultados representativos de exames e análises, cobrindo um determinado período de tempo.

Resultados de uma única análise ou de algumas análises que não cubram um período suficiente em relação às estações do ano podem levar a erros grosseiros (PINA, 2003).

5.1. Impurezas das águas naturais

Não há água pura na natureza devido a seu alto poder de dissolução de gases, corantes, colóides, sais, etc. Este poder químico faz com que a água seja denominada de solvente universal. Devido a esta efetiva propriedade de solvência e ao seu alto poder de transportar partículas no seu meio, podem ser encontradas diversas impurezas que normalmente definem sua qualidade (HEM, 1985).

Estas impurezas podem ser agrupadas da seguinte forma:

- **Em suspensão:** algas, protozoários, fungos e vírus; vermes e larvas; areia, argila e silte; resíduos industriais e domésticos,
- **Estado coloidal:** corantes vegetais, sílica e vírus,
- **Em dissolução:** sais de cálcio e magnésio (bicarbonatos, carbonatos, sulfatos ou cloretos), sais de sódio (bicarbonatos, carbonatos, sulfatos fluoretos e cloretos), óxidos de ferro e manganês, chumbo, cobre, zinco, arsénico, selénio e boro, iodo, flúor e compostos fenólicos,
- **Substâncias albuminoides:** nitratos e nitritos, gases (O_2 , CO_2 , H_2S , N).

Estas impurezas, de uma forma conceitual mais ampla, conferem a água características químicas, físicas e bacteriológicas, que informam os parâmetros de qualidade da água. As características químicas são conferidas através da presença em maior ou menor intensidade tanto de matéria orgânica como de inorgânica, enquanto que as físicas são consequência da presença de sólidos, que podem estar em suspensão (exemplo silte e argila), dissolvidos (exemplo colóides) ou em solução (exemplo sais e corantes). As características biológicas são inerentes a presença de seres vivos ou mortos, principalmente de vida microscópica animal e vegetal, protozoários e vírus.

5.2. Caracterização e análise de dados obtidos

Na avaliação da qualidade de uma água, as impurezas presentes são retratadas por suas características físicas, químicas e biológicas, que são traduzidas em termos de parâmetros que permitem classificar a água por seu conteúdo mineral, caracterizar a sua potabilidade e apontar anomalias de substâncias tóxicas. De um modo geral as seguintes características são avaliadas.

5.2.1. Propriedades Físicas

As águas subterrâneas têm sua qualidade afetada pelas condições naturais do solo, em função da incorporação de impurezas ocorridas durante a precipitação, ao longo do escoamento superficial e no processo de infiltração e percolação, mesmo que as condições naturais das bacias hidrográficas sejam as mais preservadas possíveis ou mesmo inexploradas. Os principais fatores de influência são a cobertura e a composição do solo.

5.2.1.1. Temperatura

As águas subterrâneas têm uma amplitude térmica pequena; isto é, sua temperatura não é influenciada pelas mudanças da temperatura atmosférica. Exceções são os aquíferos freáticos pouco profundos. Em profundidades maiores, a temperatura da água é influenciada pelo grau geotérmico local (em média 1°C a cada 30 m) (HEM, 1985).

Na parte oriental da ilha de Santiago, nos aquíferos são comuns temperaturas de 22 aos 30°C em maiores profundidades.

Como a velocidade das reações químicas varia por regra diretamente com a temperatura, as concentrações das espécies variam também, uma vez que os equilíbrios químicos são afetados. A temperatura é, assim, um parâmetro que influencia todos os aspectos relacionados com a produção da água potável.

Os aspetos físicos, químicos e microbiológicos mais relevantes, são:

- O aumento da temperatura diminui o sabor da água e aumenta o cheiro,
- O aumento da temperatura faz variar o pH ótimo de coagulação, influenciando a eficácia da mesma e, indiretamente, a turbidez e a cor,
- O abaixamento da temperatura aumenta a viscosidade da água, provocando diminuições nas velocidades de sedimentação e filtração; logo, indiretamente, a diminuição de eficácia na eliminação da cor e da turbidez,
- A temperatura condiciona a sobrevivência e o crescimento dos microrganismos, sendo a desinfecção favorecida por temperaturas na faixa dos 20 à 25°C, não só porque a eficiência da operação é elevada mas também porque o grau de sobrevivência dos microrganismos, nomeadamente bactérias e vírus, é mais baixo àquelas temperaturas,
- O aumento da temperatura aumenta a corrosão.

5.2.1.2. pH

O pH traduz o comportamento ácido ou básico de uma solução, ou seja, mede o equilíbrio ácido base entre os diversos componentes presentes; exprime, concretamente, a concentração em íons de hidrogênio.

Justifica-se então que, na maior parte das águas naturais, sendo o equilíbrio do ácido carbônico o mais importante, o pH depende fortemente desse equilíbrio e, obviamente, da distribuição dos carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e dióxido de carbono (CO_2), situando-se em média, entre 6,5 e 8,5 (HEM, 1985).

De um modo geral, águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais (o zinco e o alumínio e, com menor probabilidade, o aço, por exemplo), como também, as paredes e superfícies de cimento amianto. Contudo, o pH da água natural não atinge, geralmente, os valores necessários para haver corrosão alcalina. Enquanto águas com valor alto de pH tendem a formar incrustações.

Embora o pH não seja um parâmetro que diretamente determina efeitos negativos na qualidade da água, a sua relação e influência nos outros parâmetros define-o como fundamental na apreciação da qualidade da água (NETTO, 1996).

O valor do pH determina a solubilidade de muitos solutos. Somente alguns íons como o cloreto, potássio e nitrato sofrem poucas variações de solubilidade em toda a faixa de pH.

Poder-se-á ainda afirmar que, a medida em que o pH influencia a eficiência das operações e processos de tratamento destinados à remoção de bactérias, vírus e outros organismos nocivos, ele atua indiretamente na saúde humana.

O pH é um dos fatores mais importantes na mobilidade e na mobilização dos elementos em solução (Tabela 5.1.). Isto porque, alguns elementos são móveis em ambientes alcalinos, como em áreas de rochas carbonatadas, quando comparadas com ambientes ácidos, constituindo, uns dos mecanismos de acumulação de elementos-traço em sedimentos de drenagem; à medida que às águas subterrâneas ou de fontes se misturam com outras águas com valores de pH diferentes, ou quando as águas ácidas reagem com as rochas, o pH delas tende a neutralizar, precipitando os metais-traço da solução.

A ampla faixa de variação do pH e de hidrólise para vários elementos mostrados na (Tabela 5.2.) destaca a mobilidade do Cu, Pb, e Zn apenas em condições ácidas, constituem mecanismos de apoio para estudos em prospeção geoquímica.

O medidor de pH utilizado no laboratório do INGRH é calibrado diariamente com as soluções padrões de pH 4, 7 e 10 recorrendo ao manual antes das leituras. Quando não está em uso, o eletrodo, fica mergulhado numa solução de cloreto de prata (AgCl) ou de cloreto de potássio (KCl) de acordo as instruções do aparelho.

Na costa leste da ilha de Santiago os valores obtidos se aproximam da neutralidade, 6,6 -7,3. As águas contêm geralmente íons de bicarbonatos, HCO_3^- e de CO_2 livre em pequenas quantidades. As Figuras 5.1. e 5.2, apresentam a distribuição dos valores de pH na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

Tabela 5.1. Mobilidade de alguns elementos químicos em relação às condições ambientais. Seg. ROSE, HAWKES e WEBB (1979).

Mobilidade relativa	Condições Ambientais		
	pH 5 - 8	pH<4	Redutoras
Altamente móveis	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, B	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, B	Cl, Br, I, Rn, He
Moderadamente móveis	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, U, As, Sr, Hg	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, U, As, Sr, Hg, Cu, Co, Cd, Ni, P,	Ca, Na, Mg, Li, F, Mn, Ag, Ba
Pouco móveis	K, Ba, Mn, Si, P, Pb, Cu, Ni, Co, (Cd, Ra)	K, Ba, Si, P, Pb,	K, Fe, Si, P
Mobilidade ínfima	Fe, Al, Au, Cr, Ga, Sc, Ti, Zr, Platinóides	Fe, Al, Au, Cr, Ga, Sc, Ti, Zr, Platinóides	Fe, Al, Au, Cr, Ga, Sc, Ti, Zr, Platinóides

Tabela 5.2. pH de hidrólise para alguns elementos selecionados. Seg. Britton, 1955 (em ROSE, HAWKES e WEBB (1979)).

Elemento	pH	Elemento	pH	Elemento	pH	Elemento	pH
Fe ³⁺	2,0	Al ³⁺	4,1	Cd ²⁺	6,7	Pr ³⁺	7,1
Zr ⁴⁺	2,0	U ⁶⁺	4,2	Ni ²⁺	6,7	Hg ²⁺	7,3
Sn ²⁺	2,0	Cr ³⁺	5,3	Co ²⁺	6,8	Ce ³⁺	7,4
Ce ⁴⁺	2,7	Cu ²⁺	5,3	Y ³⁺	6,8	La ³⁺	8,4
Hg ¹⁺	3,0	Fe ²⁺	5,5	Sm ³⁺	6,8	Ag ¹⁺	7,5/8,0
In ³⁺	3,4	Be ²⁺	5,7	Zn ²⁺	7,0	Mn ²⁺	8,5/8,8
Ta ⁴⁺	3,5	Pb ²⁺	6,0	Nd ³⁺	7,0	Mg ²⁺	10,5

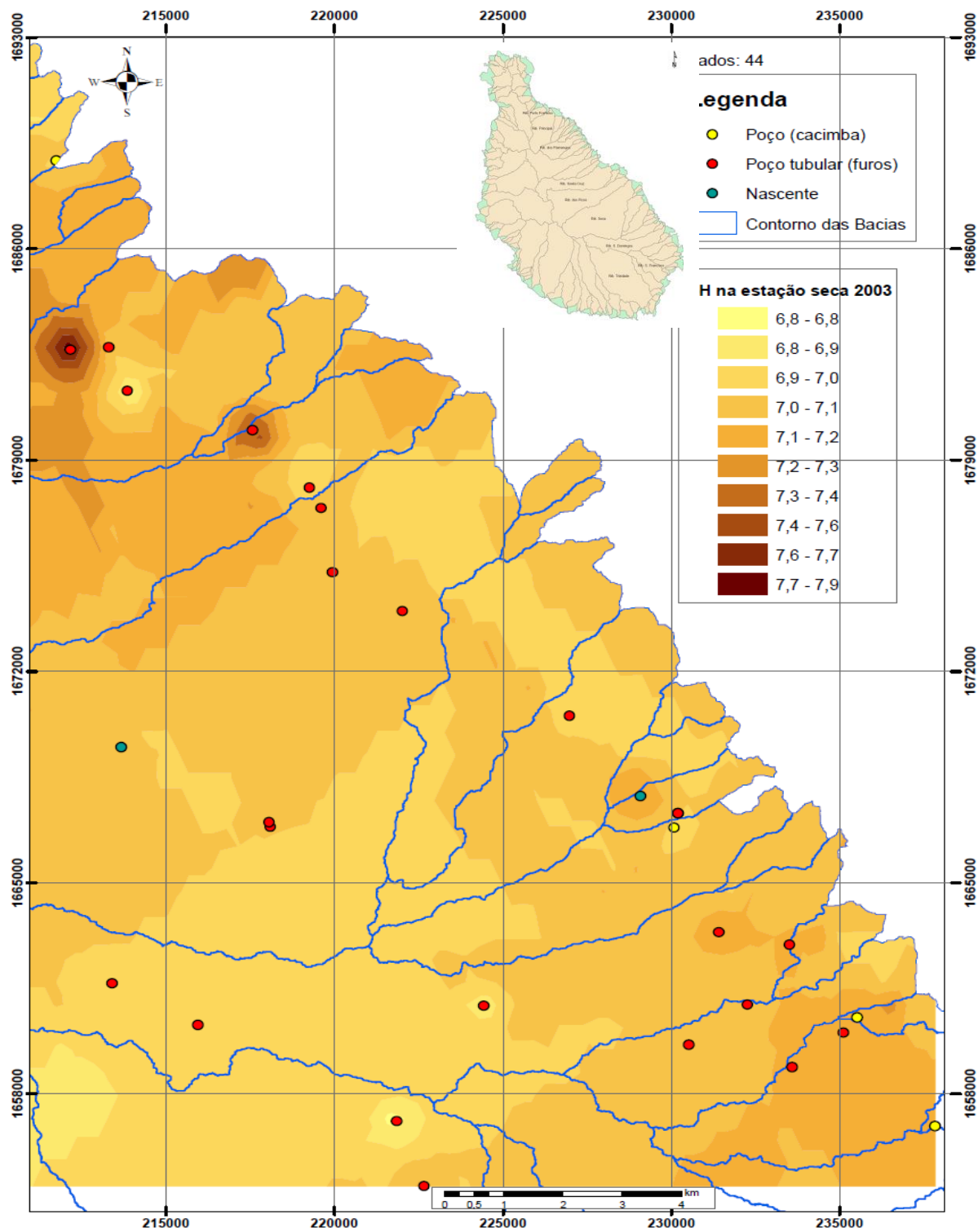


Figura 5.1. Distribuição dos valores do pH nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

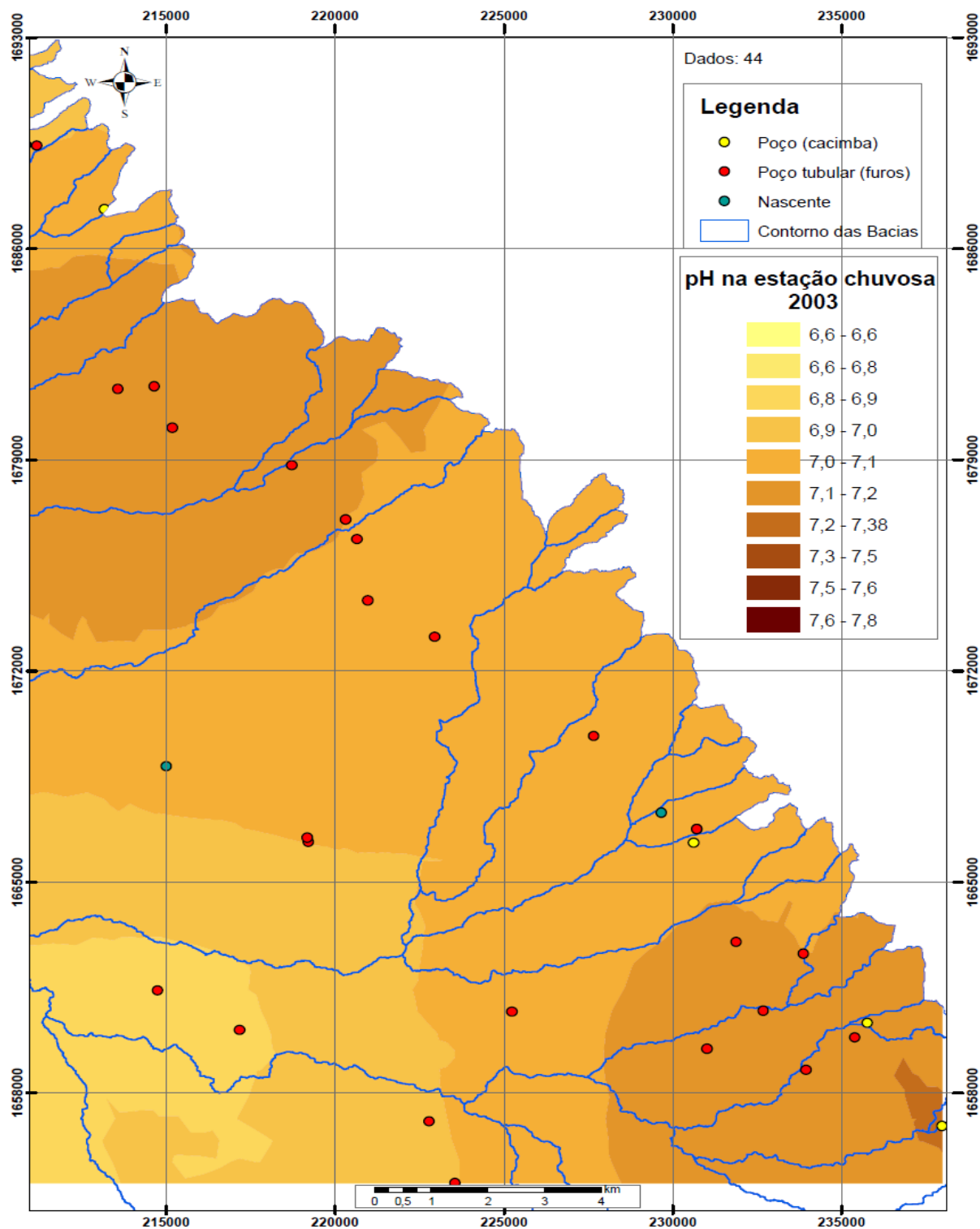


Figura 5.2. Distribuição dos valores do pH nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

5.2.1.3. Condutividade Elétrica

Os sais dissolvidos e ionizados presentes na água transformam-na no eletrólito capaz de conduzir a corrente elétrica. Assim sendo, STD é a soma dos teores de todos os constituintes minerais presentes na água. O limite de potabilidade da OMS, na água, é de 1000 mg/L. Como há uma relação de proporcionalidade entre o teor de sais dissolvidos e a CE, podemos estimar o teor de sais pela medida de condutividade de uma água. Essa capacidade depende da presença de íons, da sua concentração, mobilidade e valência, e da temperatura de medição (NETTO, 1966).

Soluções de compostos inorgânicos são relativamente boas condutoras, enquanto que moléculas de compostos orgânicos que não se dissociam em solução aquosa são maus condutores. A sua determinação permite obter uma estimativa do conteúdo de sólidos de uma amostra, estabelece o grau de mineralização para relacionar com o efeito da total concentração de íons no equilíbrio químico, o efeito fisiológico em plantas ou em animais e da velocidade de corrosão.

Na parte oriental da ilha de Santiago, uma boa estimativa do valor dos STD da água subterrânea pode ser obtido pelo produto da CE por 0,63 (PINA, 2005).

A importância da condutividade elétrica prende-se com o efeito de corrosão da água e depende da temperatura; permite detetar a infiltração da água do mar num dado aquífero. O seu aumento pode ser resultante de processos que se desenvolvem na superfície da Terra e que consistem na fragmentação e decomposição dos minerais e dos processos de poluição pontual ou difusa (FETH, 1965).

Resultados das análises realizadas independentes da época do ano, chuvosa ou seca, mostram que os valores mais baixos da C.E. são observados nos pontos de água afastados da costa por exemplo, nos furos; FBE-53, PT-31, FBE-156, FBE-188 e na nascente 51-201.

Os valores mais elevados são verificados nas sondagens mais próximas do mar. Exemplo, nos furos de exploração: FT-109, FT-44, FT-78, SP-12 e PT-29. O valor mais alto foi encontrado nas nascentes: 55-42 e 56-88, demonstrando contudo, a presença de água salgada em todos os poços (cacimbas) das ribeiras junto a linha da costa e com profundidade abaixo da superfície próxima de 30 m.

De modo geral, constata-se uma evolução da C.E. com a distância à costa na ilha de Santiago diminuindo para o interior da ilha com o aumento da altitude, Figura 5.3. As variações devem, ao incremento das necessidades de água, consequência direta do aumento demográfico, industrial e agrícola que são verificadas.

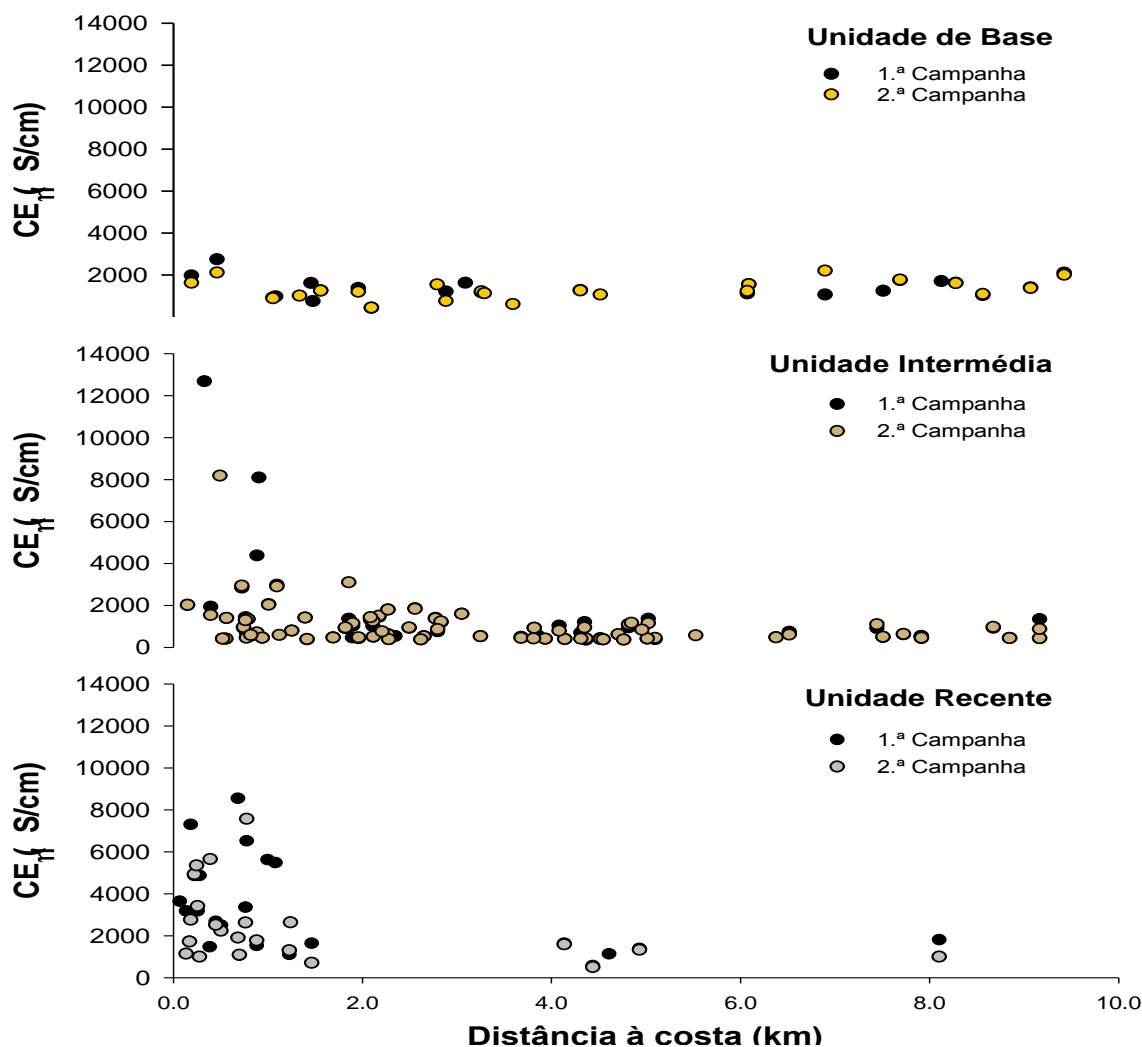


Figura 5.3. Evolução da C.E. em função da distância da linha de costa na Ilha de Santiago.

A exploração intensiva e prolongada em captações muito próximas do mar, (a altitudes inferiores a 10 metros em relação ao nível do mar) onde não existe uma fonte de compensação destas extrações por recarga natural ou artificial do aquífero, provoca o avanço da interface água doce – água salgada no sentido dos furos e a sua posterior contaminação.

As Figuras 5.4. e 5.5, apresentam a distribuição dos valores da C.E. na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

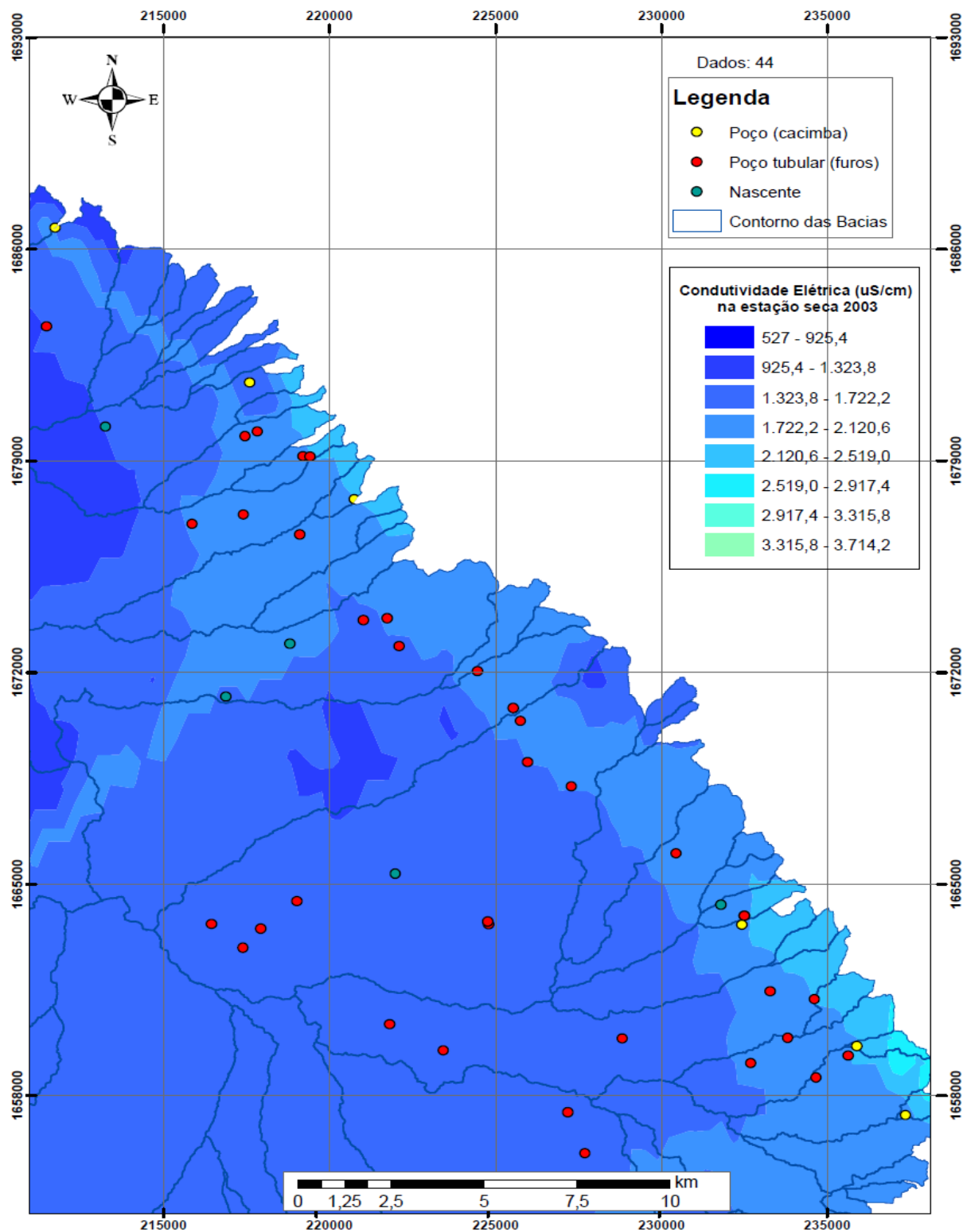


Figura 5.4. Distribuição dos valores da C.E. nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

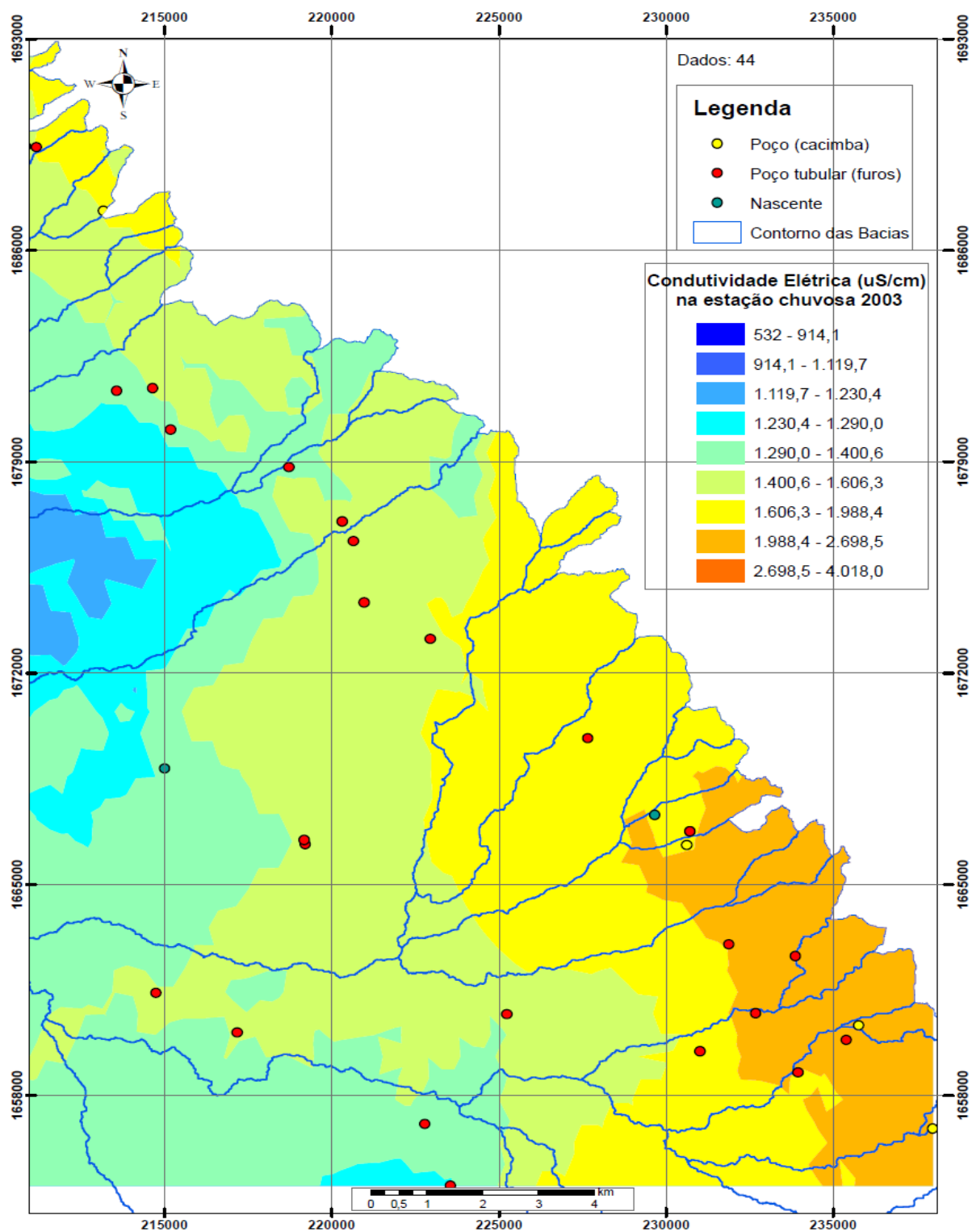


Figura 5.5. Distribuição dos valores da C.E. nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

5.2.1.4. Dureza

A dureza é uma característica conferida à água pela presença de alguns íons metálicos, principalmente aos de Cálcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}) e, em menor grau, aos íons Ferrosos (Fe^{2+}) e do Estrôncio (S^{2+}) (NETTO, 1966).

A dureza é reconhecida pela sua propriedade de impedir a formação de espuma como sabão. Além disso, produz incrustações nos sistemas de água quente.

A dureza é expressa em mg/L de CaCO_3 , e pode ser classificada de duas maneiras:

- Pelos íons metálicos, e,
- Pelos íons associados com íons metálicos.

Na primeira, distingue-se a dureza do cálcio e do magnésio. Na segunda, a dureza é classificada em dureza de carbonatos e bicarbonatos.

As águas podem ser classificadas em termos do grau de dureza em:

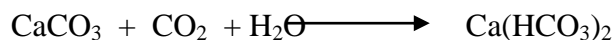
- Moles ----- dureza inferior à 50 mg/L de CaCO_3
- Dureza moderada ----- dureza entre 50 à 150 mg/L de CaCO_3
- Duras ----- dureza entre 150 à 300 mg/L de CaCO_3
- Muito Duras ----- dureza superior à 300 mg/L de CaCO_3

Na visão de saúde pública, não há objeções do consumo de águas duras. Pelo contrário, alguns pesquisadores tem encontrado uma correlação entre águas moles e certas doenças cardíacas tendo sido verificado que há um maior número de pessoas com problemas cardiovasculares em áreas de águas moles do que em áreas de águas duras (NETTO, 1966).

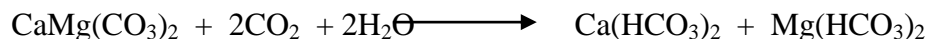
As fontes mais comuns de ocorrência de íons de cálcio, magnésio e bicarbonatos são os minerais calcário (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), enquanto os íons de cálcio e sulfato provêm de anidrita (CaSO_4) e gipsita (gesso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). As águas naturais, com alto teor de CO_2 em contato com rochas calcárias e dolomíticas, têm a propriedade de dissolvê-las, convertendo-as em bicarbonato de Ca ou Mg solúveis (NETTO, 1966).

✚ Reações na Natureza envolvendo Cálcio e Magnésio (FENZEL, 1998).

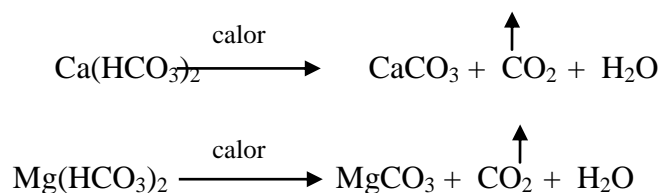
Cálcário: o dióxido de carbono dissolvido na água converte carbonato de cálcio em bicarbonato de cálcio solúvel na água.



Dolomita:



Formação de incrustações:



A concentração iônica das águas subterrâneas aumenta ou diminui basicamente devido:

- Dissolução e/ou hidrólise: processos químicos que envolvem diretamente os materiais aquíferos (rochas/sedimentos), e,
- Evaporação e congelamento: processos devidos à variação climática.

Nas proximidades de aterros sanitários, a água de cacimbas pode se tornar mais dura devido à lixiviação do aterro com água da chuva. Esta lixiviação pode ocorrer por duas maneiras: por serem os compostos de cálcio e magnésio diretamente dissolvidos pela água, ou devido à água de chuva dissolver o CO_2 proveniente da decomposição de materiais orgânicos depositados no aterro sanitário e dissolver os componentes do solo que contém carbonatos causadores da dureza.

5.2.1.5. Alcalinidade

Nas águas naturais, a alcalinidade é devida à presença de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) ou hidróxidos (OH^-) dos elementos cálcio, magnésio, potássio e sódio. Com maior frequência, a alcalinidade das águas é devida a bicarbonatos, produzidos pela ação do gás carbônico dissolvido na água sobre as rochas calcária. Os carbonatos e hidróxidos podem ser significantes quando a atividade de algas é alta em reservatórios de água e também em certas águas industriais e efluentes, tal como água de caldeira (FENZEL, 1998).

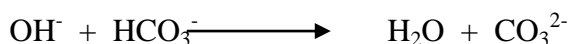
Os íons de sais de ácidos fracos, como fosfatos, silicatos, boratos e amônia podem também contribuir para a alcalinidade; porém, com pouca influência. A alcalinidade é expressa em mg/L de CaCO_3 .

É uma das determinações mais importantes no controle da água, estando relacionada com a coagulação, redução da dureza e prevenção da corrosão nas canalizações de ferro fundido da rede de distribuição. Apresenta pouca importância sanitária, exceto em concentrações elevadas. Somente dois tipos de alcalinidade podem estar presentes simultaneamente numa amostra da água, posto que haveria uma reação entre hidróxidos e bicarbonatos, reduzindo estes à forma de bicarbonatos (NETTO, 1966).

A quantidade de um ácido adicionada até se atingir determinado valor do pH, mede a alcalinidade existente na amostra da água (NETTO, 1966).

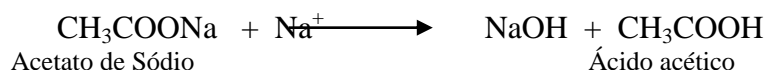
Os altos níveis de alcalinidade indicam a presença de efluentes industriais fortemente alcalinos. Em águas poluídas em estado anaeróbio, pode haver formação de sais de ácido acético, ácido propiônico e sulfeto de hidrogênio (H_2S) de contribuição ínfima.

As fontes de alcalinidade nas águas naturais originam-se do dióxido de carbono (CO_2) dissolvido, proveniente da atmosfera ou de processos de decomposição de material orgânico, e da interação deste com calcário (CaCO_3) e dolomita (CaCO_3 , MgCO_3).



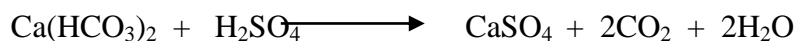
Em função do pH, podem estar presentes na água os seguintes tipos de alcalinidade:

- **pH 11,0 – 9,4** alcalinidade do hidróxido entra na natureza por poluição industrial e com a dissociação de sais de ácidos fracos e bases fortes.



- **pH 9,4 – 8,3** alcalinidade de carbonatos e bicarbonatos. Se o hidróxido estiver presente, titula-se até ao pH 8,3 (alcalinidade de hidróxidos e de bicarbonatos), mais uma metade do carbonato. Continuando a titulação até o pH 4,5, completa-se a conversão do carbonato, e todo o bicarbonato presente, em ácido carbônico. Este valor é chamado alcalinidade total.

- $$2\text{CO}_3^{-2} + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$$
- **pH 9,4 - 8,3** alcalinidade de carbonatos e bicarbonatos.
 - **pH <8,3 >4,6** alcalinidade de bicarbonatos.



- **pH 4,6 - 3,0** ácidos minerais.

5.2.1.6. Bicarbonatos e Carbonatos

A maioria dos íons bicarbonatos (HCO_3^-) e carbonatos (CO_3^{-2}) em águas subterrâneas são derivados do CO_2 na atmosfera e no solo, e de soluções de rochas carbonatadas. Águas bicarbonatadas sódicas podem ser concentradas nos solos produzidos por evaporação. Na presença de bastante cálcio, o bicarbonato é retirado da água através da precipitação de CaCO_3 (NETO, 1966).

A concentração de HCO_3^- em águas subterrâneas varia de 10 a 800mg/L, sendo mais comuns, encontrados na costa leste da ilha de Santiago, valores entre 100 a 661mg/L.

Existe forte relação entre o pH da água e a concentração do gás carbônico, dos bicarbonatos e dos carbonatos (pH <8,3, ausência de CO_3^{-2}). Outra relação existente é com a dureza total (NETO, 1966).

- **Dureza total > alcalinidade total:** a água contém dureza de HCO_3^- e CO_3^{-2}
- **Dureza total = alcalinidade total:** a água contém somente dureza de CO_3^{-2}
- **Dureza total < alcalinidade total:** a água possui somente dureza de CO_3^{-2} . O excesso de alcalinidade corresponde a CO_3^{-2} e HCO_3^- de sódio e de potássio.

As Figuras 5.6. e 5.7, apresentam a distribuição dos valores do bicarbonato na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

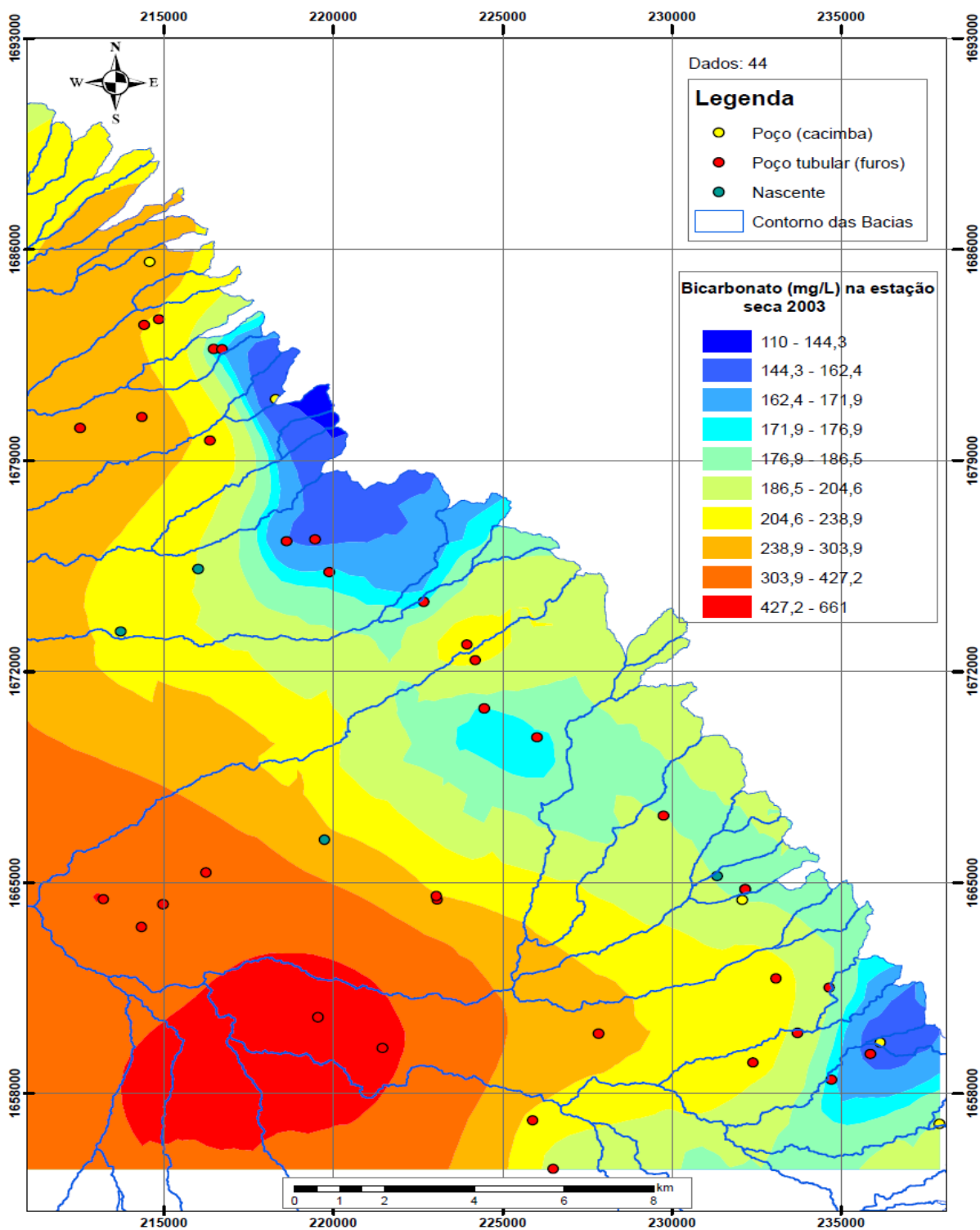


Figura 5.6. Distribuição dos valores do Bicarbonato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

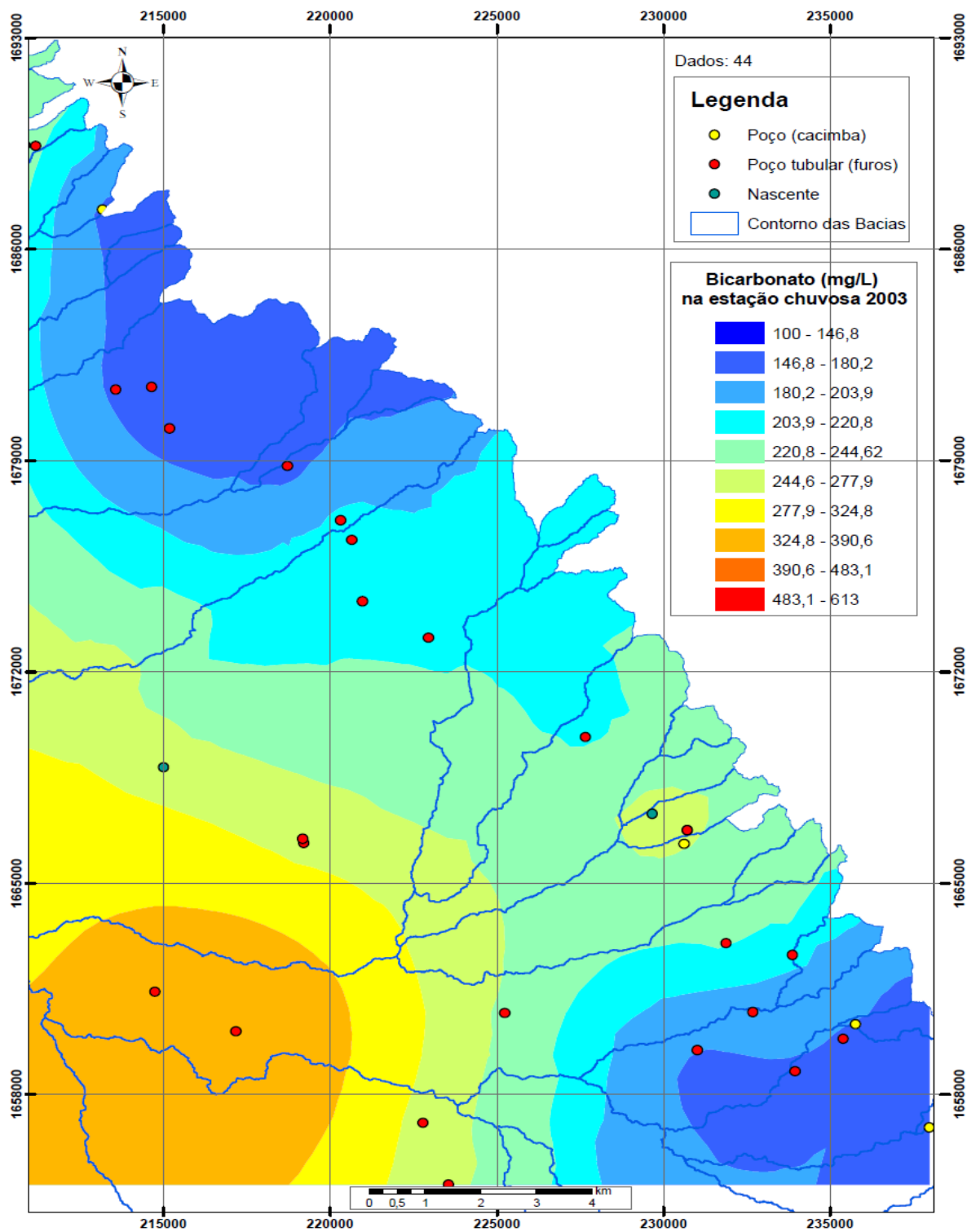


Figura 5.7. Distribuição dos valores do Bicarbonato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

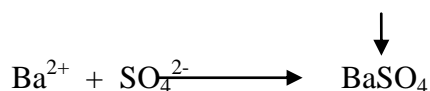
5.3. Principais Constituintes Iônicos

As águas subterrâneas tendem a ser mais ricas em sais dissolvidos do que as águas superficiais. As quantidades presentes refletem não somente os substratos rochosos percolados mas variam também em função do comportamento geoquímico dos compostos químicos envolvidos. Como há sensíveis variações nas composições químicas das rochas, é de se esperar uma certa relação entre sua composição da água e das rochas preponderantes na área. É necessário, contudo, frisar que o comportamento geoquímico dos compostos e elementos é o fator decisivo na sua distribuição nas águas. Desta forma o sódio e o potássio, dois elementos que ocorrem com concentrações muito próximas na crosta continental participam em quantidades sensivelmente diferentes nas águas subterrâneas.

5.3.1. Bário (Ba^{2+})

O Bário é um elemento geoquimicamente pouco móvel e raro nas águas subterrâneas na ilha de Santiago com teores de 0,07 a 0,9 mg/L. As baixas concentrações de Ba^{2+} nas águas subterrâneas são consequência da pouca solubilidade de $BaSO_4$ e do fato de que o bário é facilmente adsorvido pelos hidróxidos e óxidos metálicos (HEM, 1970). Tem como principais fontes naturais: o intemperismo e erosão de depósitos naturais, normalmente veios, onde ocorre na forma de barita ($BaSO_4$), ou feldspatos ricos em Ba^{2+} . Tóxico para valores superiores a 1 mg/L. O teor máximo permitido pela O.M.S. é de 0,05 mg/L. Sua ingestão provoca elevação da pressão sanguínea, por vasoconstrição e bloqueio do sistema nervoso.

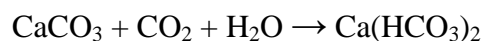
A ocorrência do íon de bário na água é limitada pelo íon sulfato, formando um precipitado de $BaSO_4$, praticamente insolúvel na água. Como mineral, o bário encontra-se na natureza como barita ($BaSO_4$) e witherita ($BaCO_3$).



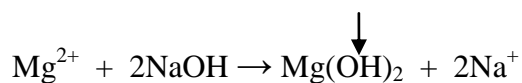
5.3.2. Cálcio (Ca^{2+})

O teor de cálcio nas águas subterrâneas varia, de uma forma geral, de 2 a 200 mg Ca^{2+} /L (5 – 500 mg CaCO_3 /L), contribuindo como elemento maior para a dureza da água. Grandes quantidades de cálcio podem provocar formação de pedras nos rins, hipercalcemia. O carbonato de cálcio é muito pouco solúvel em água pura. O cálcio ocorre nas águas na forma de bicarbonato e sua solubilidade está em função da quantidade de gás carbônico dissolvido. A quantidade de CO_2 dissolvida depende da temperatura e da pressão.

🚦 Reações na Natureza envolvendo Cálcio e Magnésio (CUSTÓDIO, 1996).



incrustação



precipitação

Toda variação de temperatura e de pressão que leva à modificação do CO_2 dissolvido nas águas subterrâneas refletirá sobre seu conteúdo em cálcio, ou seja, à solubilização do CaCO_3 , ou à sua precipitação. A incrustação de um filtro de um poço profundo por CaCO_3 é uma das consequências deste processo.

Dos principais cátions presente nas águas subterrâneas da costa leste da ilha de Santiago, cálcio apresenta uma concentração apreciável devido a presença de algumas rochas carbonatadas junto ao litoral, e do contato com rochas sedimentares de origem marinha, também, a sua origem pode estar associada a processos geoquímicos, como:

- Dissolução de calcita aragonita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), anidrita (CaSO_4), e gipsita ($\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),
- Intrusão salina, por intercâmbio catiônico com o íon de sódio,
- Dissolução de aerossóis.

As Figuras 5.8. e 5.9, apresentam a distribuição dos valores do Cálcio na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

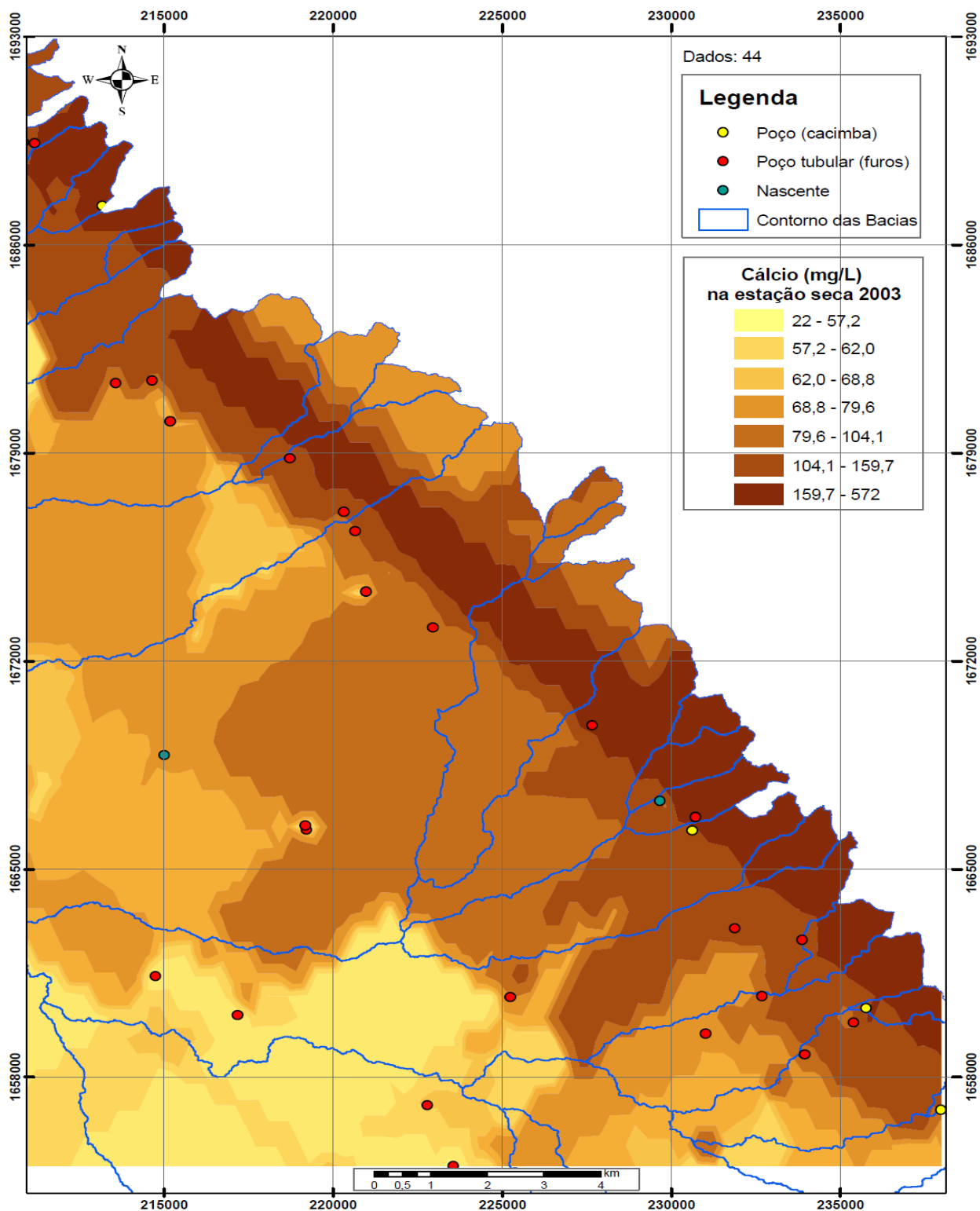


Figura 5.8. Distribuição dos valores do Cálcio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

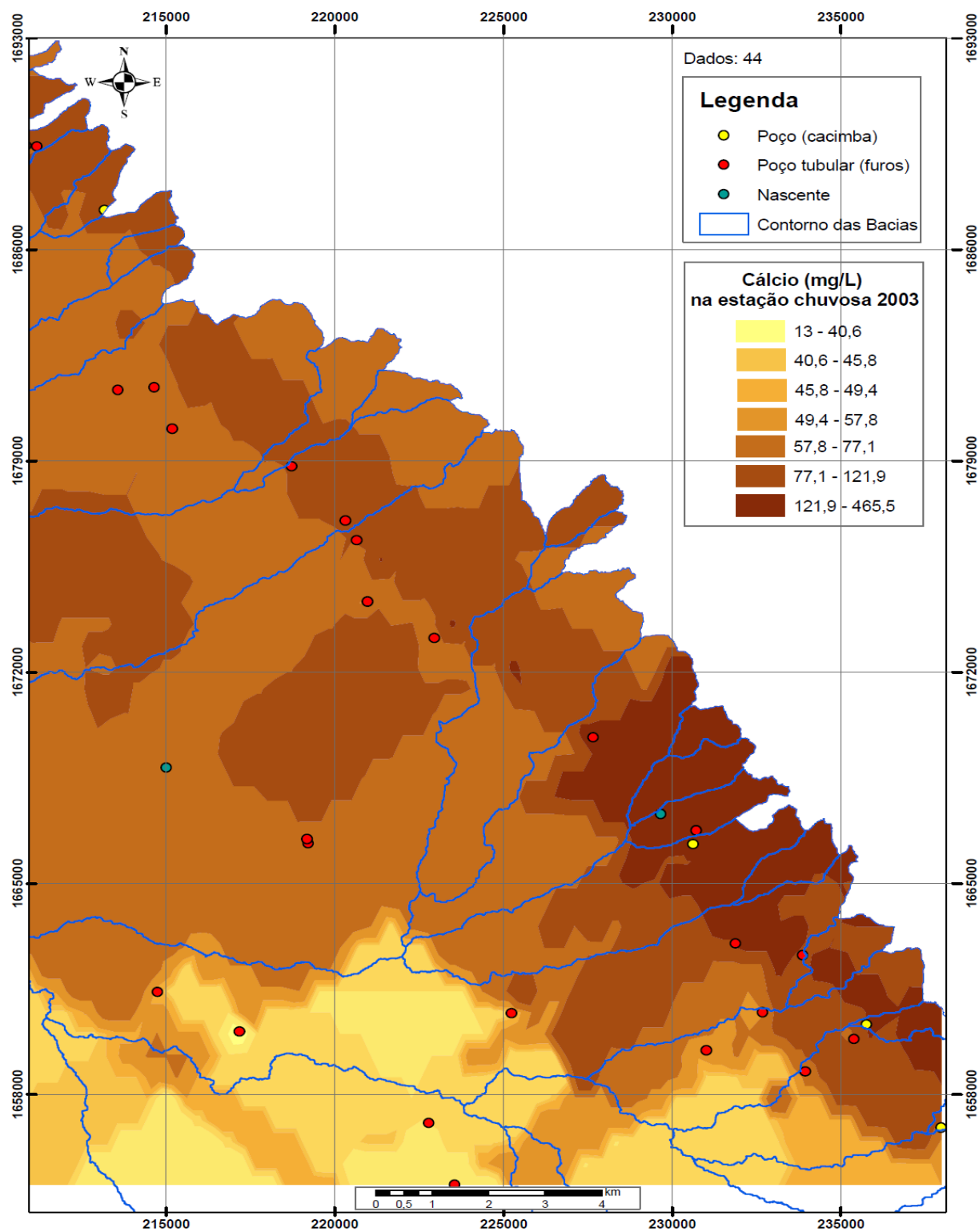


Figura 5.9. Distribuição dos valores do Cálcio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

5.3.3. Cloretos (Cl⁻)

Cloreto é o ânion inorgânico mais frequente nas águas; bastante solúvel, estável em solução e de difícil precipitação. Não sofre oxidação e nem redução em águas naturais.

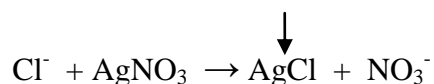
O sabor salgado conferido pelo cloreto, é variável, dependendo da concentração e da composição química da água. Algumas águas que contêm 250 mg Cl⁻/L apresentam sabor salgado quando o cátion é sódio (proporção molar 1:1, principalmente em águas salinas) (NETTO, 1966). Na predominância dos cátions de cálcio e de magnésio, com concentrações superiores a 1000 mg Cl⁻/L, o sabor salgado típico estará ausente.

A concentração do cloreto é maior em efluentes domésticos do que em água bruta, porque o cloreto de sódio faz parte da alimentação humana e passa, sem ser absorvido, pelo sistema digestivo do corpo.

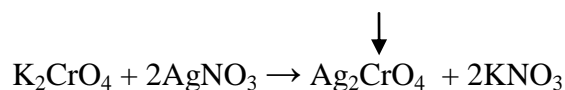
Altas concentrações de cloretos ao longo da costa leste da ilha de Santiago se devem a infiltração da água do mar, dissolução do NaCl, poluição e do aerossol marinho. Processos industriais, efluentes de salina e aterros sanitários podem elevar a concentração de cloretos em recursos hídricos em conjugação com os minerais a base de cloreto de potássio, ou seja, fatores geológicos.

O limite da concentração de ingestão é de 400 mg Cl⁻/L correspondente a 660 mg NaCl/L. À partir de 500 mg Cl⁻/L, começa a influência biológica num curso de água. Com 2000 mg Cl⁻/L, os organismos de água doce serão prejudicados.

Reações na Natureza



Reação do nitrato de prata com o indicador cromato de potássio. A formação do cromato de prata indica o ponto final da titulação através de um precipitado vermelho-marrom.



As Figuras 5.10. e 5.11, apresentam a distribuição dos valores dos Cloretos na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

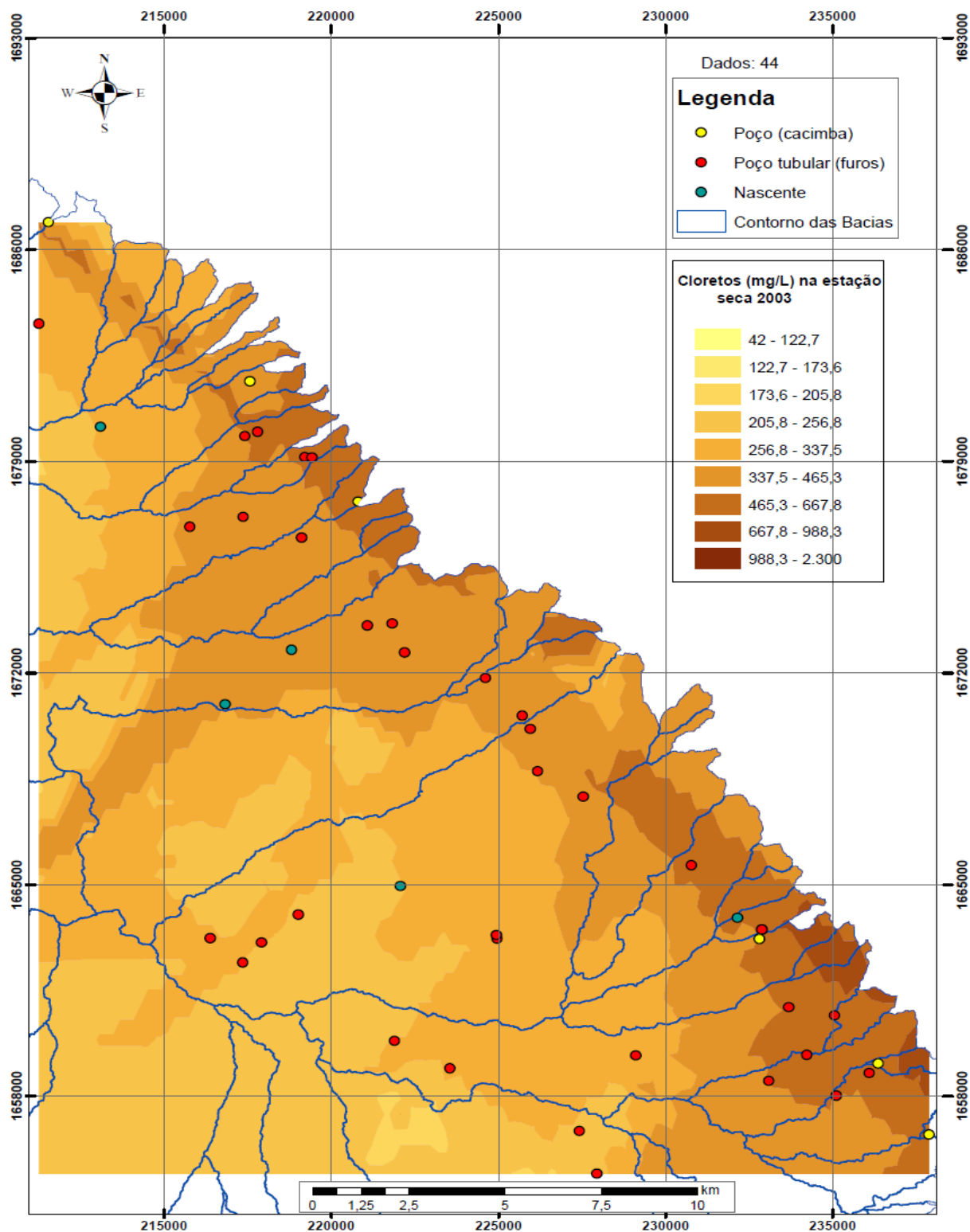


Figura 5.10. Distribuição dos valores dos Cloretos nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

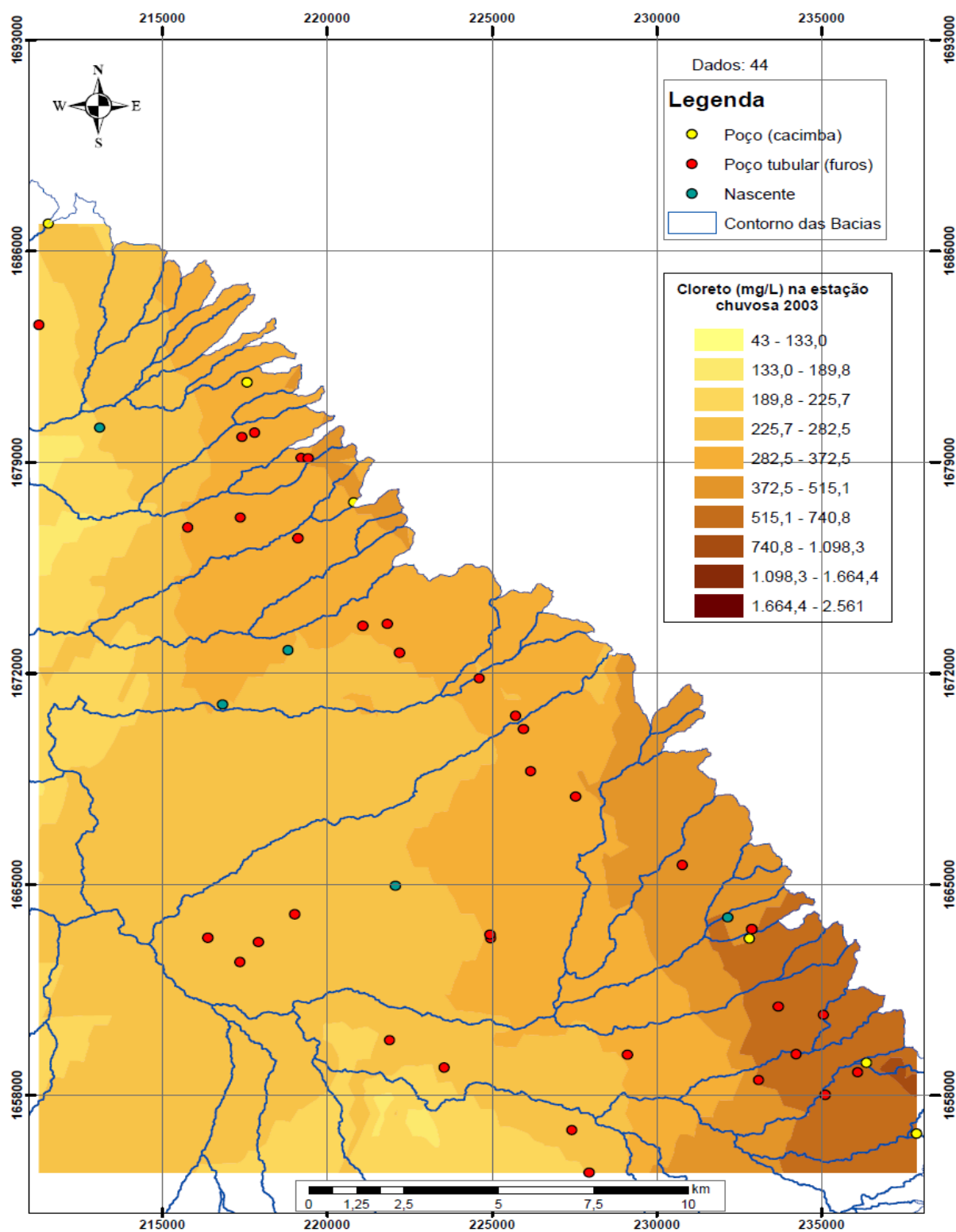


Figura 5.11. Distribuição dos valores dos Cloretos nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

5.3.4. Ferro (Fe²⁺)

As águas naturais contêm ferro em quantidades pequenas e variáveis, embora sua distribuição e abundância serem significativas. O ferro se dissolve no solo pela ação da água da chuva saturada com CO₂ em condições de redução na sua forma bivalente, como hidrogenocarbonato de ferro Fe(HCO₃)₂. Na presença de teores elevados de CO₂, de NH₃ e do gás sulfídrico, H₂S, com deficiência de oxigênio, a água de chuva pode também dissolver, em camadas mais profundas do solo, compostos de ferro como: hematita (Fe₂O₃), magnetita (Fe₃O₄), siderita (FeCO₃) e, pirita (FeS₂), mesmo sendo estas dificilmente solúveis (SZIKSZAY, 1993). Em virtude de afinidades geoquímicas quase sempre é acompanhado pelo manganês.

As condições em que os compostos de ferro ferroso ficam dissolvidos na água são:

- Saturação de O₂<50%,
- Alto teor de CO₂,
- Ambiente redutor,
- pH<7,5

O ferro no estado ferroso (Fe²⁺) forma compostos solúveis, principalmente hidrôxidos. Quando o Fe(HCO₃)₂ entra em contato com o oxigênio do ar, os íons de Fe²⁺ oxidam para o estado férrico (Fe³⁺) e reagem instantaneamente para Fe(OH)₃. Quando o pH é superior a 7,5, o Fe(OH)₂ se torna insolúvel na água e se precipita como lodo de cor vermelho. A concentração do ferro nas águas sofre entre outros a influência da atividade de microrganismos (MESTRINHO, 1994). Em condições aeróbicas os microrganismos catalisam a reação de oxidação do Fe²⁺ para Fe³⁺ com participação de bactérias de ferro do tipo *thiobacillus ferroxidans*, *gallionella ferrugínea*, *cremothrix polyspora* e outros. Em águas superficiais, na presença de material orgânico como o ácido húmico, o Fe³⁺ forma um complexo organoférrico que impede a precipitação do Fe(OH)₃. O limite de percepção do sabor é 0,1 mg Fe/L para Fe²⁺ (ferroso) e 0,2 mg Fe/L para Fe³⁺ (férrico). Para o consumo humano, a água não deve conter mais do que 0,3 mg Fe/L de ferro total, e deve ser rejeitada devido ao seu sabor amargo, metálico, adstringente e à capacidade de manchar roupas, utensílios domésticos, etc.

O ferro é um elemento essencial, com funções importantes para o organismo humano, como por exemplo, no transporte do oxigênio (hemoglobina de células vermelhas de sangue) e, em enzimas que envolvem o transporte intracelular de elétrons. A deficiência de ferro em seres humanos pode causar anemia. Os compostos de Fe (II) são mais tóxicos do que de Fe (III). Os cloretos de ferro são mais tóxicos do que os sulfatos.

Durante a amostragem das águas subterrâneas foram adicionadas algumas gotas de ácido nítrico no frasco de coleta a fim de se manter o ferro em solução, evitando a formação do hidróxido de ferro. As concentrações registadas na costa leste da ilha de Santiago, foram menores que 0,05 µg/L.

🌈 **Reações na Natureza** (SZIKSZAY, 1993).

- **Dissolução da hematita**

- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ (água da chuva e CO_2)
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$ (ação de H^+ no solo com hematita na zona pobre em oxigénio)
- $\text{Fe}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (formação de hidrogenocarbonato de ferro)
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (reação geral)

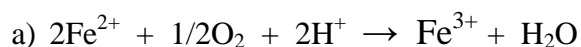
- **Dissolução da siderita**



- **Dissolução da pirita**

- $\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{S} \downarrow$
- $4\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 15\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$

- **Oxidação do ferro ferroso para ferro férrico**



- **Precipitação de hidróxido de ferro**

- $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$
- $4\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 8\text{CO}_2$
- $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

5.3.5. Magnésio (Mg^{2+})

O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é muito parecido com o do cálcio e, em linhas gerais, o acompanha. Diferentemente do cálcio, apresenta alta solubilidade em $MgCO_3$, muito raro nas águas subterrâneas devido a sua escassez geoquímica. Ocorre na natureza como magnesita ($MgCO_3$), dolomita ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) e como sulfato de magnésio ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) facilmente solúvel em água. Em silicatos, o elemento ocorre mais frequentemente em serpentina ($Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$) e olivina ($(Mg,Fe)_2SiO_4$) (CUSTÓDIO, 1996).

Alguns minerais responsáveis pelas fontes de magnésio na água subterrânea são: Biotita $K(Mg,Fe)_3$, Antifilita $(Mg,Fe)_7 Si_8 O_{22} (OH)_2$ e Tremolita $(Ca_2Mg_5 (Si_8 O_{22}) (OH)_2$. O magnésio é um elemento importante dos diversos depósitos de sais de origem marinha, tais como: bischofita ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$); kieserita ($MgSO_4 \cdot H_2O$); hexahydrita ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$). ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$). Estes minerais são mais estáveis perante o intemperismo químico, do que os minerais fornecedores de cálcio, e a precipitação de $MgCO_3$ não são comuns em águas naturais; porém, em caldeiras, a presença de bicarbonatos de magnésio $Mg(HCO_3)_2$ é indesejável por formar, em temperaturas elevadas, incrustações de $MgCO_3$ (SZIKSZAY, 1993).

Resultados das análises físico-químicas (Anexo B) obtidos das águas subterrâneas apresentam valores de magnésio significativamente menores em relação ao cálcio contribuindo, aproximadamente, com 1/3 para a dureza total. Em região de rochas carbonatadas, o mineral dolomita e a magnesita são importantes fornecedores de magnésio, tendo em vista que os processos químicos de dissolução do magnésio são essencialmente aos do cálcio (formadores da dureza).

O excesso de magnésio reduz a eficiência cardíaca em pessoas com problemas de coração. Dosagens adequadas, são benéficas no tratamento da tensão pré-mestrua e hipertensão, previne doenças renais e biliares e fortalece os músculos. Em águas subterrâneas, a relação Mg^{2+}/Ca^{2+} é um elemento caracterizador da contaminação por água marinha.

✚ Reações na Natureza (CUSTÓDIO, 1996).

- $MgCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow Mg(HCO_3)_2$ **dissolução de magnesita**
- $CaMg(CO_3)_2 + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 + Mg(HCO_3)_2$ **Dolomita**
- $Mg(HCO_3)_2 \rightarrow MgCO_3 + CO_2 + H_2O$ formação de incrustações de $MgCO_3$

O Mg^{2+} em mg $CaCO_3/L$, pode ser calculado pela Equação (4):

$$4,17 \text{ mg } Mg^{2+}/L = \text{mg } CaCO_3/L \text{ (Dureza total)} - 2,5 * \text{mg } Ca^{2+}/L \text{ em } CaCO_3/L \quad \text{Eq.(4)}$$

5.3.6. Nitrato (NO_3^-)

O nitrogênio é cerca de 80% do ar que respiramos. Como um componente essencial das proteínas é encontrado nas células de todos os organismos vivos. Nitrogênio inorgânico pode existir no estado livre como gás, nitrito, nitrato e amônia. Com exceção de algumas ocorrências como sais evaporíticos, o nitrogênio e seus compostos não são encontrados nas rochas da crosta terrestre. O nitrogênio é continuamente reciclado pelas plantas e animais. Geralmente, nas águas subterrâneas, os nitratos ocorrem em teores abaixo de 5 mg/L. Nitritos e amônia são ausentes, pois são rapidamente convertidos a nitratos pelas bactérias. Pequeno teor de nitrito e amônia é sinal de poluição orgânica recente dos efluentes domésticos. Segundo o padrão de potabilidade da OMS, uma água não deve ter mais do que 10mg/L de N-NO_3^- .

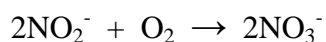
No sistema digestivo o nitrato é transformado em nitrosaminas, que são substâncias carcinógenas. Crianças com menos de três meses de idade possuem, em seu aparelho digestivo, bactérias que reduzem o nitrato a nitrito. Este se liga muito fortemente a moléculas de hemoglobina, impedindo-as de transportarem oxigênio para as células do organismo. A deficiência em oxigênio leva a danos neurológicos permanentes, dificuldade de respiração (falta de ar) e em casos mais sérios à morte por asfixia. Aos seis meses de idade a concentração de ácido hidrolórico aumenta no estômago, matando as bactérias redutoras de nitrato.

Pesquisa realizada por PINA (2005), na ilha de Santiago, constatou concentrações de nitratos superiores a 50 mgNO_3^-/L em poços pouco profundos (até 18m) nas áreas agrícolas. Este nitrato pode ser proveniente da lixiviação de fertilizantes inorgânicos usados para a adubação do solo, NPK (10-05-30 mais 03 microns) e/ou processos de decomposição e oxidação de compostos orgânicos encontrados nas camadas do solo, como também, infiltração e oxidação de esgoto proveniente de fossas sépticas e canalizações defeituosas.

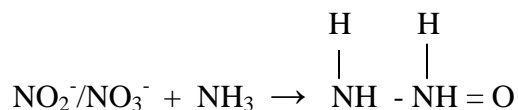
A presença de nitrato em águas superficiais estimula o crescimento de plantas e outros organismos aquáticos, como algas que florescem em abundância. Por ser nutriente, causa eutrofização e morte da vegetação aquática em recursos hídricos lagos, lagoas e açudes.

🚦 Reações na Natureza (LEEMANS, 1996).

- **Oxidação aeróbica (nitrificação bacteriana)**



- **Formação de nitrosaminas**



5.3.7. Potássio (K^+)

O potássio é um elemento químico abundante na crosta terrestre, ocorre em pequena quantidade nas águas subterrâneas, é facilmente absorvido pelas argilas e intensivamente consumido pelos vegetais. Principais fontes minerais são: feldspato potássico, moscovita e biotita, e pouco resistentes ao intemperismo físico e químico. O valor da relação Na^+/K^+ é de 1,09 nas rochas ígneas e de 27,84 nas águas do mar, (RANKAMA & SAHAMA, 1950).

As Figuras 5.12. e 5.13, apresentam a distribuição dos valores do Potássio na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

5.3.8. Sódio (Na^+)

O sódio é um elemento químico quase sempre presente nas águas subterrâneas e apresenta solubilidade muito elevada e difícil de precipitar. Principais fontes minerais são (MESTRINHO, 1994):

feldspatos sódicos, ex. albita; $Na(AlSi_3O_8)$,

feldspatóides nefelina ($NaAlSiO_4$), e,

sodalita ($Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$),

e em menores quantidades fazendo parte dos minerais zeólitas.

O sódio é libertado nos processos de troca iônica (Na^+ por Ca^{2+}) e do intemperismo das rochas magmáticas e silicatos. O enriquecimento do Na^+ nas águas naturais é uma consequência da alta solubilidade dos sais de sódio e da boa mobilidade desse elemento. Nas águas subterrâneas o teor de sódio varia entre 0,1 e 100 mg/L, sendo que há um enriquecimento gradativo deste metal a partir das zonas de recarga até as zonas mais confinadas. A quantidade de sódio presente na água é um elemento limitante de seu uso na agricultura. Teores elevados de sódio na água em aquíferos costeiros poderão estar relacionado com a intrusão da água do mar. Segundo a OMS, o valor máximo recomendável de sódio na água potável é 200 mg/L.

As Figuras 5.14. e 5.15, apresentam a distribuição dos valores do Sódio na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

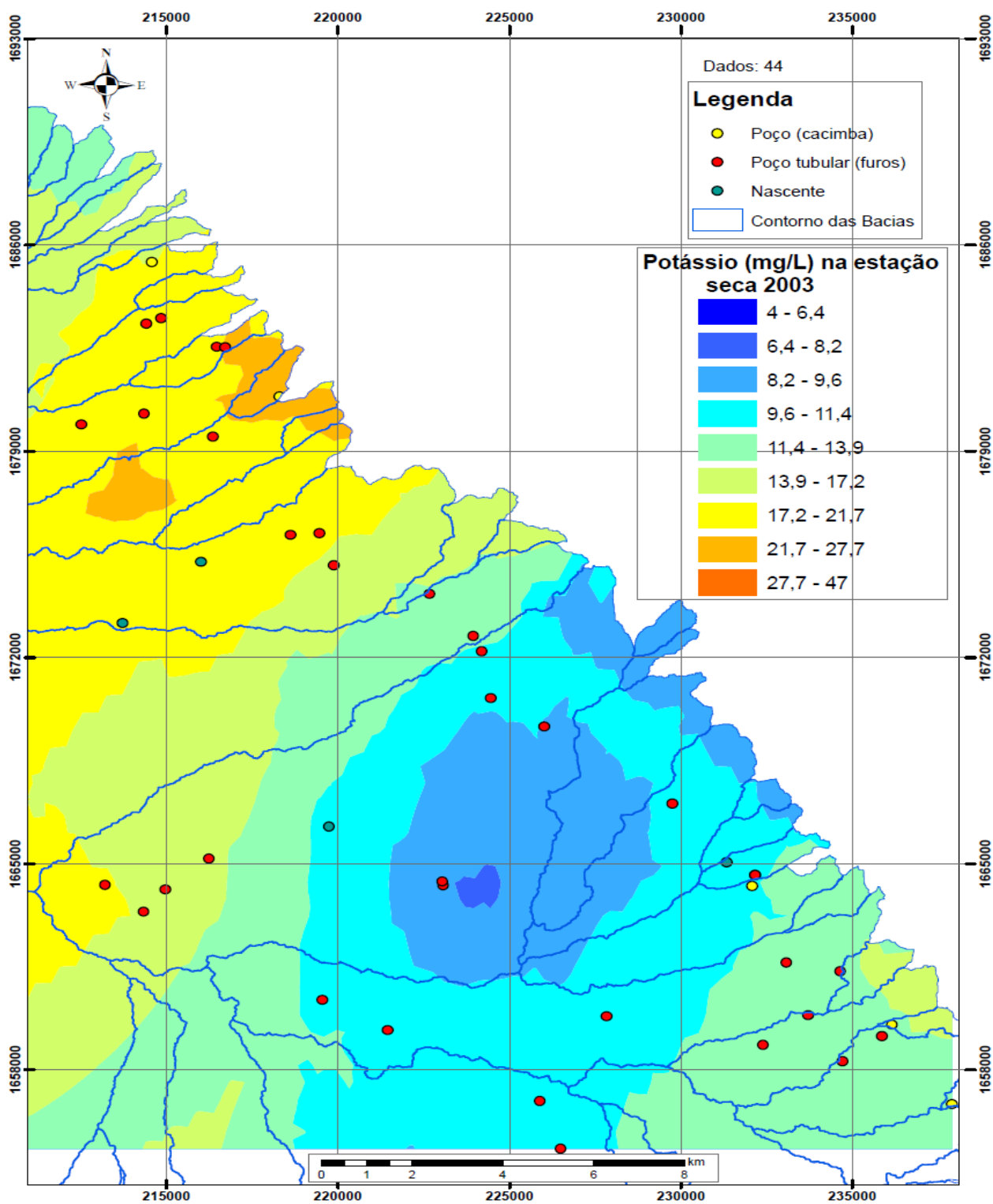


Figura 5.12. Distribuição dos valores do Potássio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

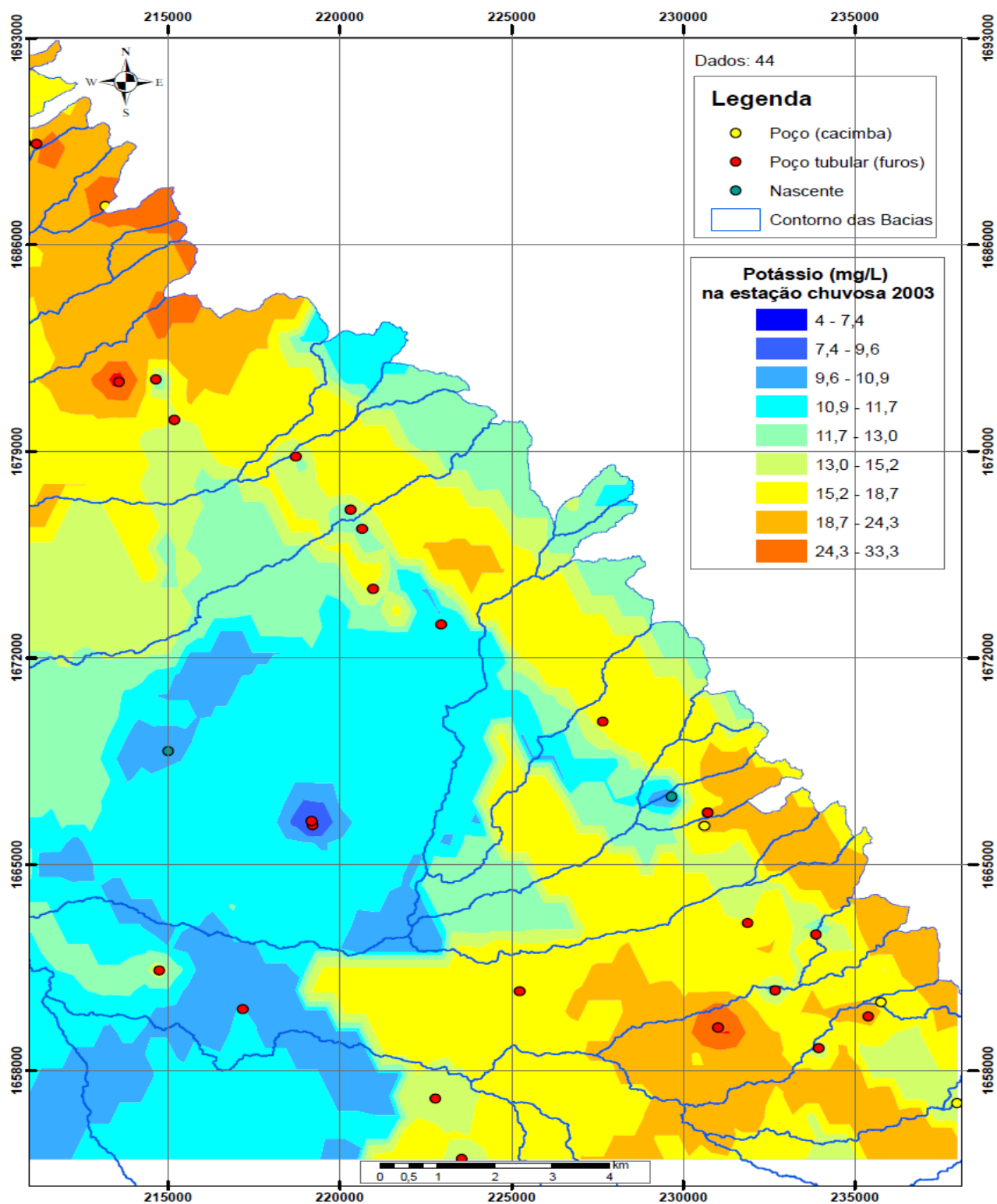


Figura 5.13. Distribuição dos valores do Potássio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

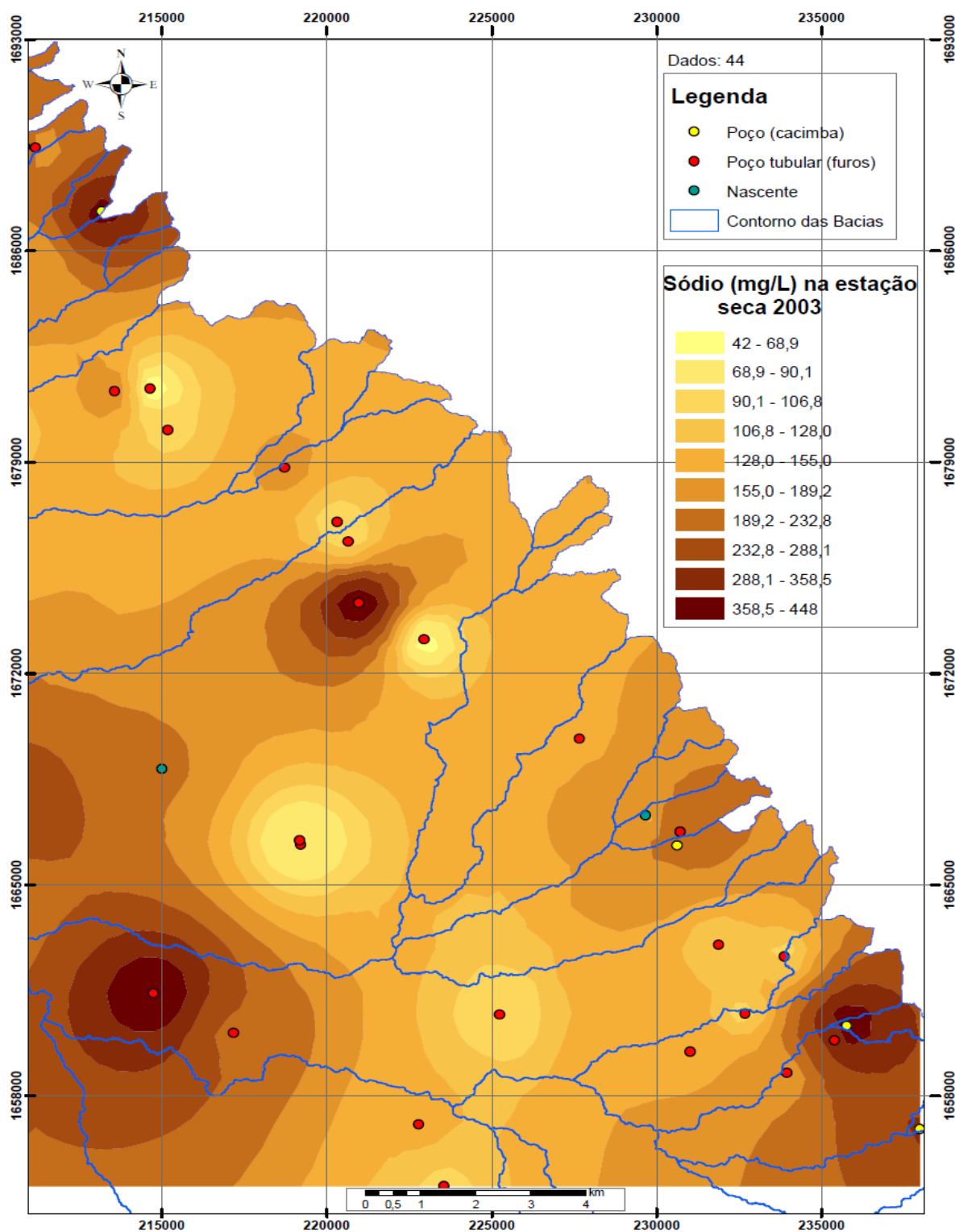


Figura 5.14. Distribuição dos valores do Sódio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

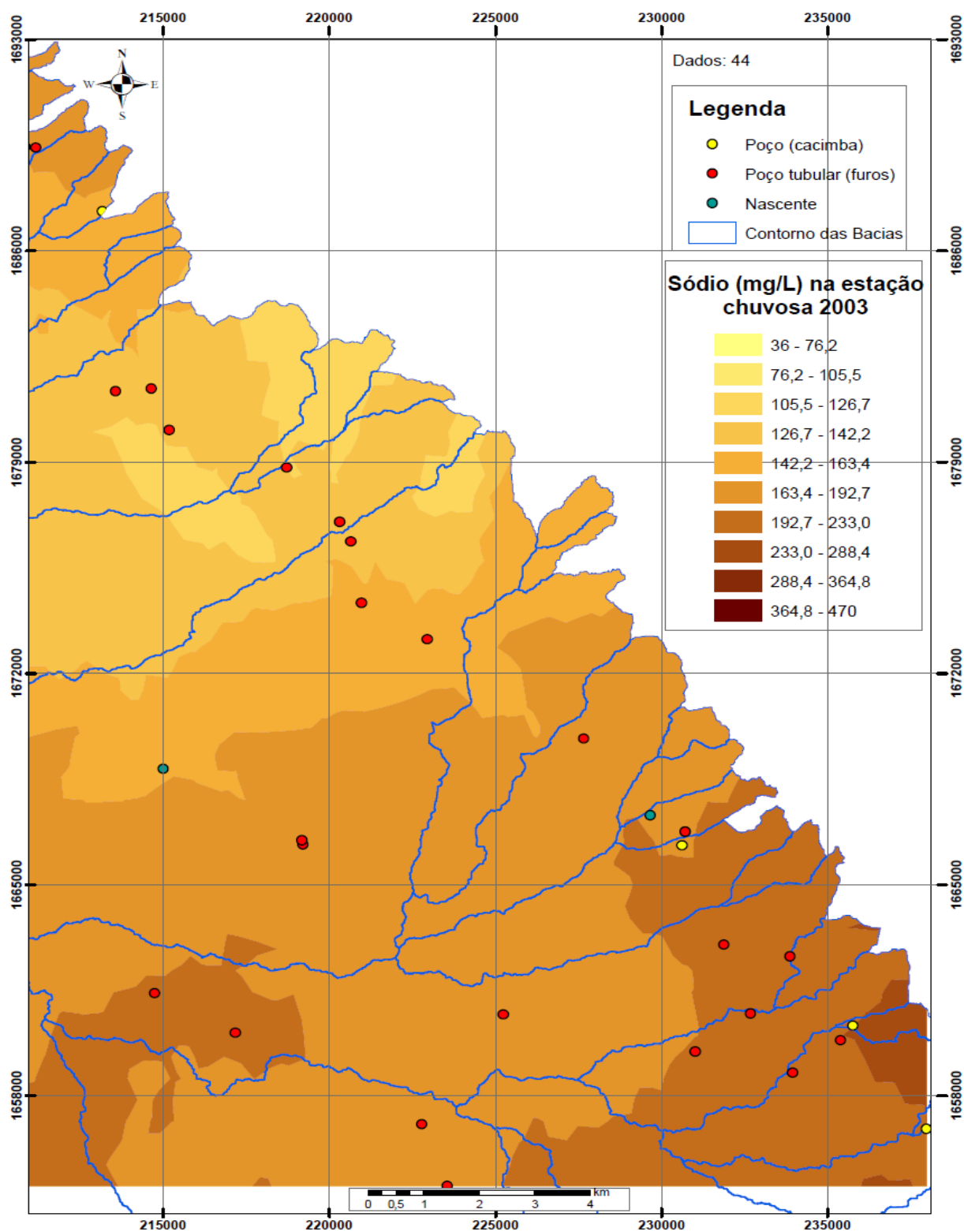


Figura 5.15. Distribuição dos valores do Sódio nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

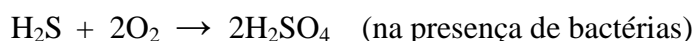
5.3.9. Sulfato (SO_4^{2-})

O sulfato ocorre em águas naturais superficiais e subterrâneas. As concentrações variam de acordo com as condições ambientais. As águas subterrâneas que percolam áreas com formação de gesso (gipsita – CaSO_4) contêm alto teor de sulfato devido à boa solubilidade (2,5 g de CaSO_4/L) e nos pontos de água situados em locais de queima de substâncias como o enxofre, o carvão e óleo mineral através da lavagem do ar com a chuva. Normalmente, as águas superficiais contêm 10-30 mg de $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$, e praticamente ausentes em áreas de exploração de petróleo.

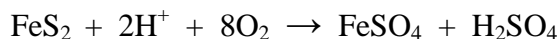
O íon sulfato, associa-se facilmente ao sódio e ao magnésio e em altas concentrações pode causar disfunção intestinal em animais de sangue quente, e danifica a estrutura de concreto (cimento e argamassa) (NETO, 1966). O padrão para água potável é de 250mg de $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$, baseado no sabor e no efeito cardiovascular.

Reações na Natureza (MESTRINHO, 1994).

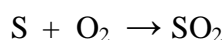
- **Oxidação aeróbica de gás sulfídrico para ácido sulfúrico**



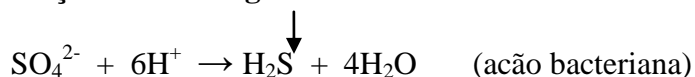
- **Oxidação de pirita**



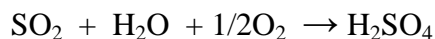
- **Queima de carvão/óleo contendo enxofre**



- **Redução bacteriológica de sulfato em meio anaeróbico**



- **Transformação de SO_2 em ácido sulfúrico com água de chuva (chuva ácida)**



As Figuras 5.16. e 5.17, apresentam a distribuição dos valores do Sulfato na costa leste da ilha de Santiago – 2003 nas estações seca e chuvosa.

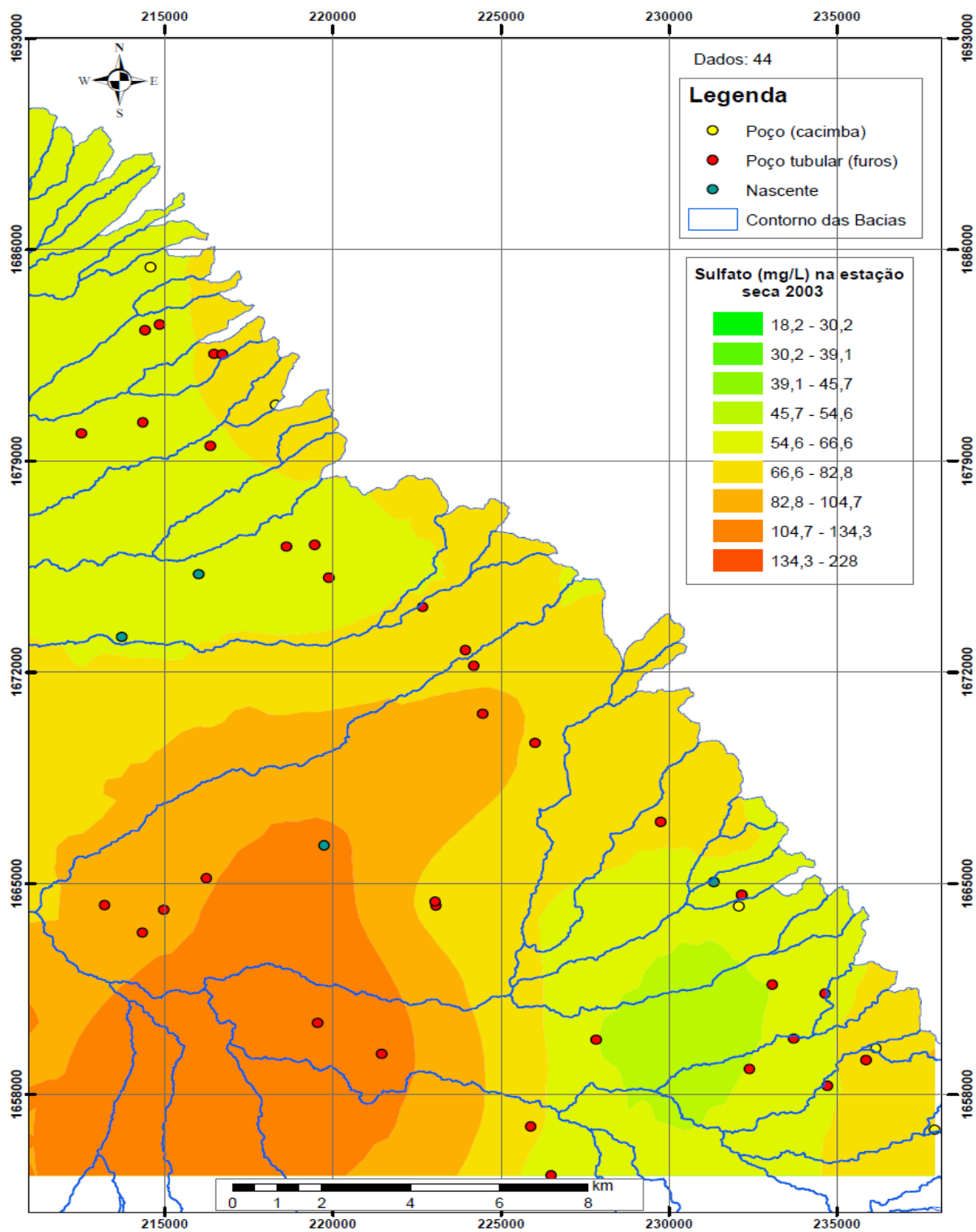


Figura 5.16. Distribuição dos valores do sulfato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação seca – 2003.

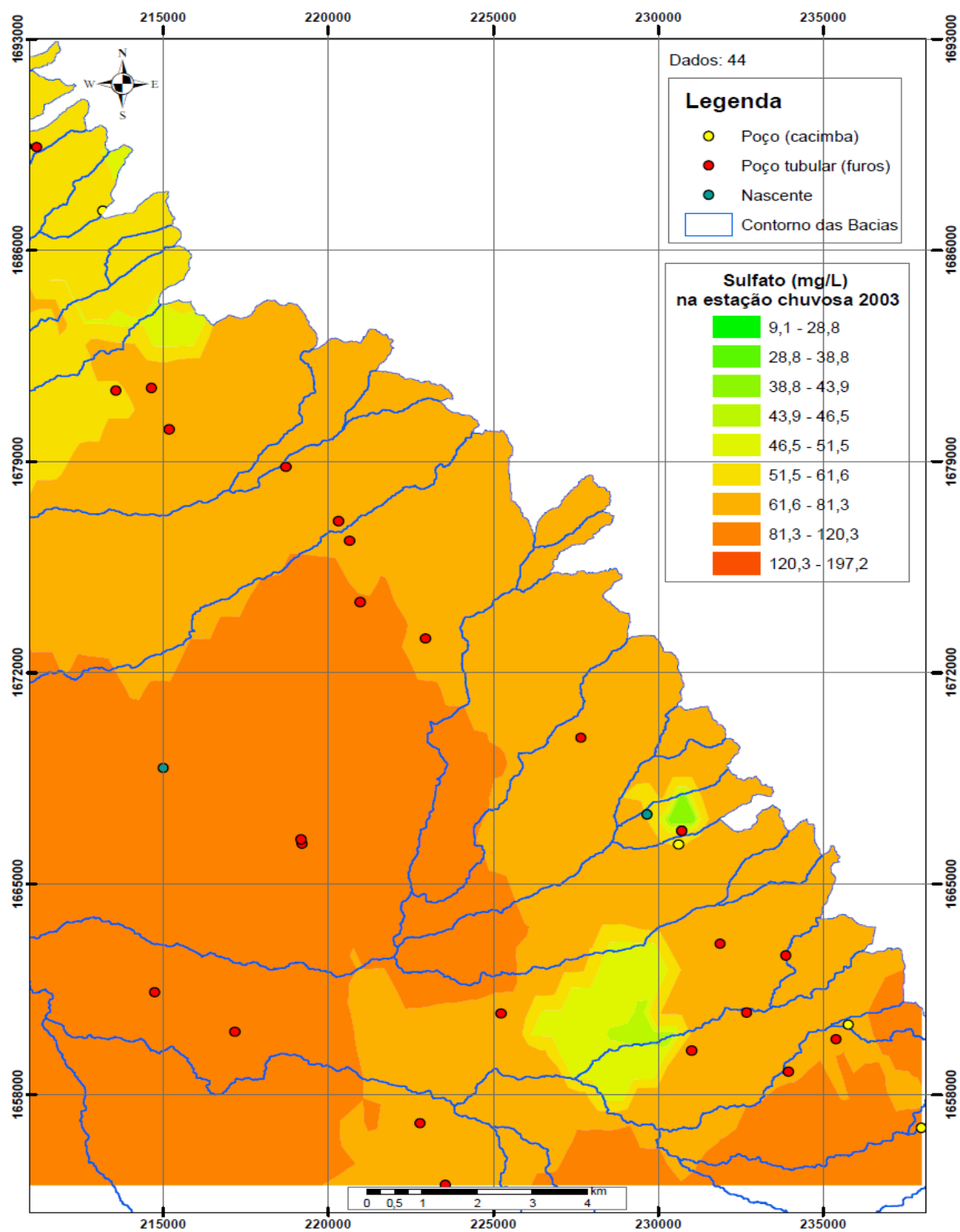


Figura 5.17. Distribuição dos valores do sulfato nas bacias hidrográficas em estudo. Ilha de Santiago, estação chuvosa – 2003.

5.4. Análise química da Água/ Apresentação dos resultados

O controle da qualidade das águas subterrâneas, em geral, é feito avaliando-se a concentração ou abundância relativa dos constituintes presentes e os respectivos padrões de variabilidade, no sentido de fazer prognósticos, reconhecer tendências de contaminações ou, ainda, de investigar danos. Fez-se a coleta e análise físico-química da água para detectar os prováveis constituintes e verificar a extensão do equilíbrio, que podem influenciar na composição dessas águas.

5.4.1. Técnicas gráficas para descrever a abundância dos constituintes

Nos estudos em águas subterrâneas, na maioria das situações, é necessário descrever a concentração ou abundância relativa dos constituintes, o padrão da variabilidade, ou ainda, deduzir sobre a procedência da água. Sob esses aspectos, os métodos de representação gráfica são bastante úteis.

5.4.1.1. Coeficiente de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita mas inversa, ou seja quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson é normalmente representado pela letra r e é calculada pela Equação (5):

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

x_i e y_i : variáveis aleatórias,

\bar{x} e \bar{y} : média dos valores de x e de y respetivamente.

Os principais constituintes (cátions e ânions) que apresenta correlação significativa nas duas estações do ano, são; os cloretos, o cálcio, o magnésio, a condutividade elétrica e o sódio, expostos nas Tabelas 5.3 e 5.4. A matriz de correlação de Pearson obtida no Excel ($r > 0,160 \rightarrow p < 0,05$) entre as amostras de água da costa leste da ilha de Santiago e a intensidade da relação linear entre as variáveis, confirma por intermédio da estatística descritiva o avanço da água do mar para o interior da ilha.

Tabela 5.3. Coeficiente de correlação de Pearson, época seca, 2003.

	C.E.	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	K ⁺
C.E.	1	*	*	*	*	*	*	*
Cl ⁻	0,982	1	*	*	*	*	*	*
SO ₄ ²⁻	0,3262	0,2441	1	*	*	*	*	*
Ca ²⁺	0,9386	0,9429	0,155	1	*	*	*	*
Na ⁺	0,6707	0,6255	0,7453	0,5483	1	*	*	*
HCO ₃ ⁻	-0,0955	-0,1901	0,3006	-0,1151	0,2282	1	*	*
Mg ²⁺	0,9115	0,903	0,2296	0,8972	0,5417	-0,186	1	*
K ⁺	0,391	0,3816	0,1402	0,2983	0,3957	0,0338	0,3866	1

Tabela 5.4. Coeficiente de correlação de Pearson, época chuvosa, 2003.

	C.E.	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	K ⁺
C.E.	1	*	*	*	*	*	*	*
Cl ⁻	0,9763	1	*	*	*	*	*	*
SO ₄ ²⁻	0,3763	0,3324	1	*	*	*	*	*
Ca ²⁺	0,8549	0,8216	0,1091	1	*	*	*	*
Na ⁺	0,8261	0,7933	0,4249	0,6865	1	*	*	*
HCO ₃ ⁻	-0,0311	-0,0841	0,049	0,0571	0,3017	1	*	*
Mg ²⁺	0,906	0,926	0,391	0,7643	0,7244	-0,0865	1	*
K ⁺	0,171	0,1724	-0,0205	0,1264	0,1703	-0,2018	0,1278	1

5.4.1.2. Diagrama de Piper

O diagrama triangular de Piper (1944), com frequência é usado para classificar o tipo químico da água subterrânea, de acordo com a espécie predominante, e também para definir a sua evolução química.

No diagrama triangular de Piper, distinguem-se três campos com os dados plotados em % meq L⁻¹: o triângulo dos cátions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺); o triângulo dos ânions (SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻ + CO₃²⁻) e o losângulo onde os pontos encontrados nos triângulos anteriores são projetados.

O cruzamento do prolongamento dos dois pontos define a posição do ponto na área do losângulo. A maior proximidade a um dos quatro vértices, classifica a amostra de acordo com as suas fácies para cátions e ânions.

O diagrama triangular de Piper é uma técnica útil para descrever o comportamento de vários íons ou definir a hidroquímica de uma área, quando se necessita de um grande número de curvas ou figuras.

Os diagramas de Piper foram construídos com amostras das bacias hidrográficas de São Domingos (Figura 5.18.), da Ribeira Seca (Figura 5.19.) e de São Miguel (Figura 5.21.).

As Figuras 5.20. e 5.23. mostram respetivamente, as classes de água em função da salinidade das bacias hidrográficas da Ribeira Seca e de São Miguel.

As águas subterrâneas apresentam fácies hidroquímicas vários, com predominância o sódio como cátion dominante e cloretos e sulfatos como ânions com maior frequência.

- $rCl > rHCO_3 > rSO_4 > rCO_3$
- $rNa > rCa > rMg > rK$.

Fácies hidroquímicas dos tipos:

1. bicarbonatada – sódica (HCO₃-Na) ou sulfatadas ou cloretadas sódicas (Figura 5.18.),
2. sulfatadas ou cloretadas sódicas, (SO₄ – Na) ou (Cl- Na) ou sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas (Figura 5.19.), e,
3. bicarbonatada sódica (HCO₃-Na) ou sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas (Figura 5.21.).

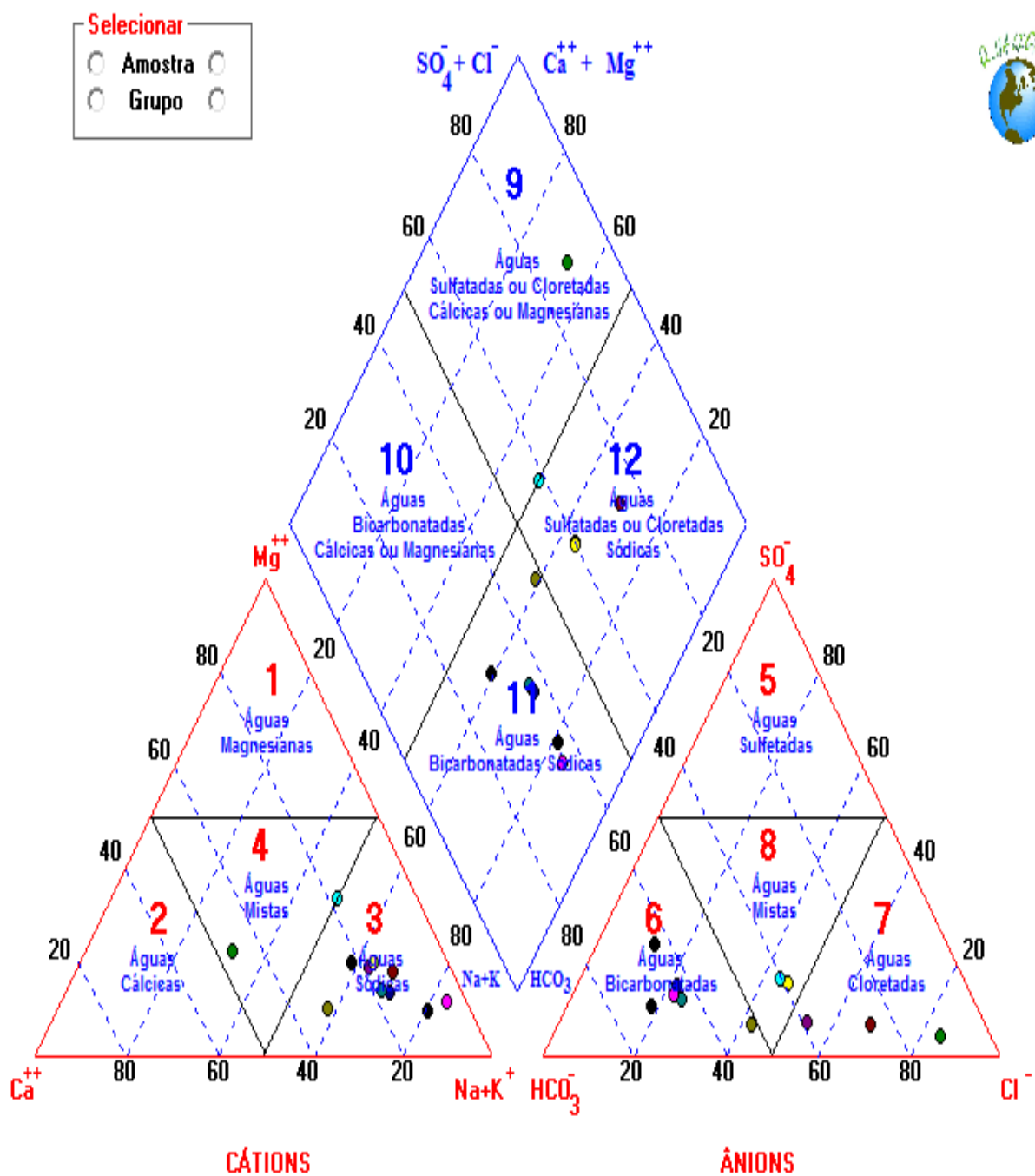


Figura 5.18. Distribuição das principais fácies hidroquímicas na Bacia Hidrográfica de São Domingos. Ilha de Santiago.

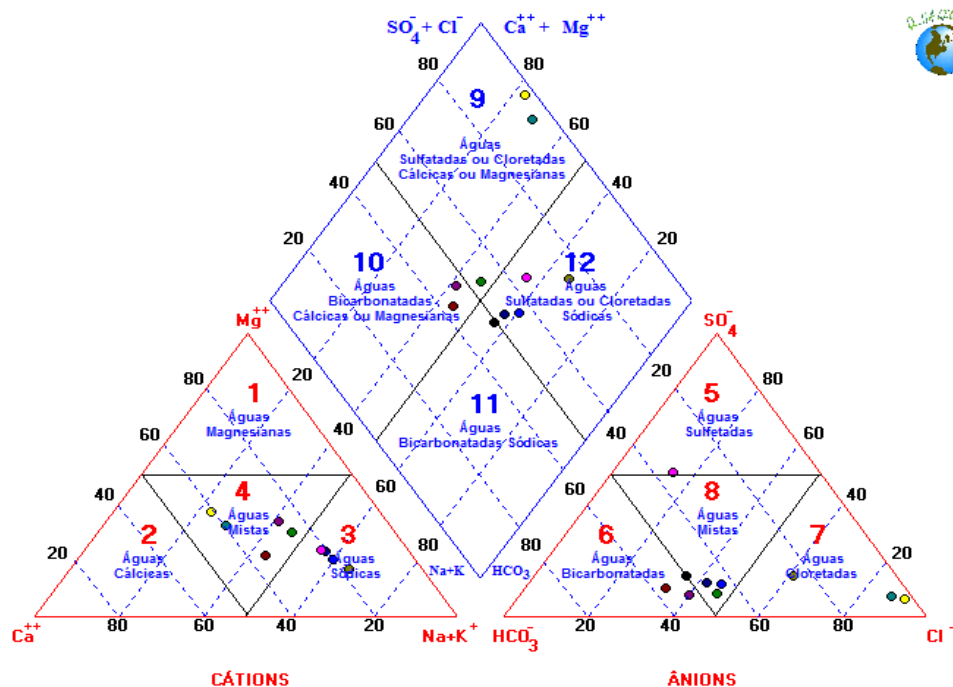


Figura 5.19. Distribuição das principais fácies hidroquímicas na Bacia hidrográfica da Ribeira Seca.

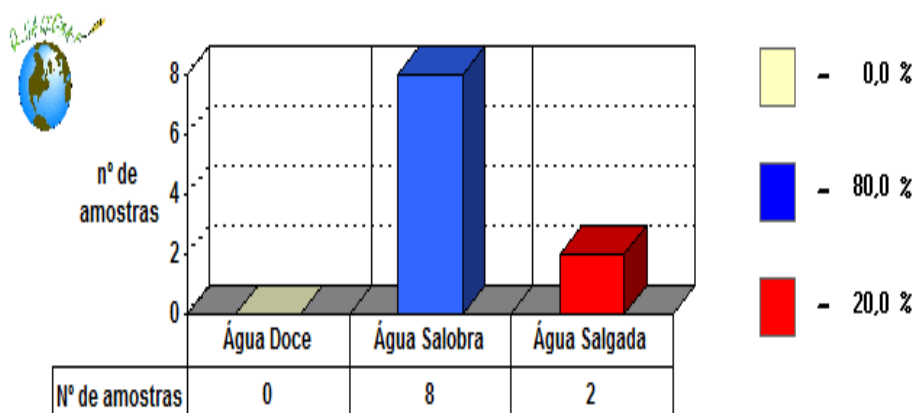


Figura 5.20. Classe das águas em função da salinidade na bacia hidrográfica da Ribeira Seca - S. Cruz.

A estimativa dos STD nas amostras de água sobreexplotados (mais de 12 horas de bombagem diária) na Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca, tais como; FT-63, FT-09, FT-47, 52-81, FT-59, PT-31, FT-65, 52-33, 55-42 e do FBE-169 é dada pela equação (6):

$$\text{STD} = \text{CE} * 0,65 \quad \text{Eq. (6)}$$

Valor tido como satisfatório para águas não muito salinas, a uma temperatura média de 18°C. Para águas muito salgadas ou muito ácidas, esta correlação não ocorre.

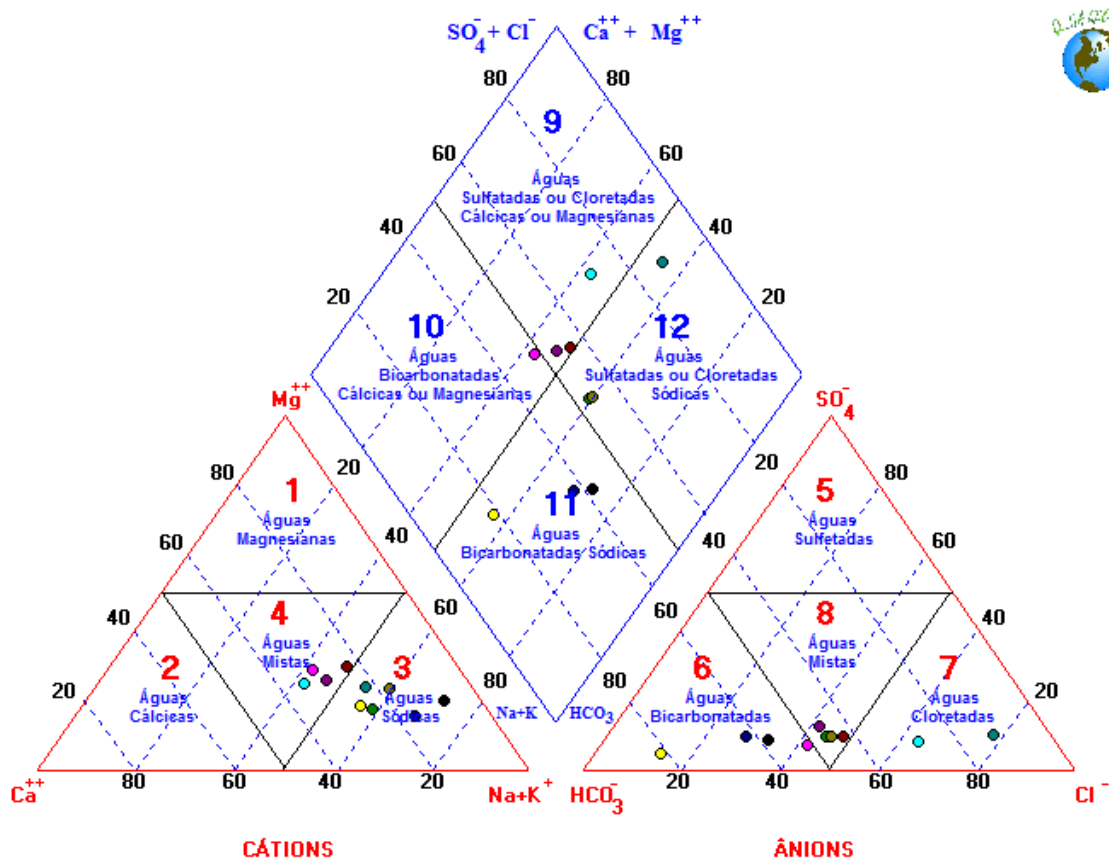


Figura 5.21. Distribuição das principais fácies hidroquímicas na Bacia Hidrográfica de S. Miguel. Ilha de Santiago.

O gráfico do ânion Cl *versus* C.E. (Figura 5.22.), confirma o efeito das inundações marinhas das marés-altas constituindo a principal fonte de sais em áreas de baixa cota como, por exemplo, na Ribeira de São Domingos e/ou na Ribeira Seca, (PINA, 2007) (Figura, 4.11-a e 4.19-b).

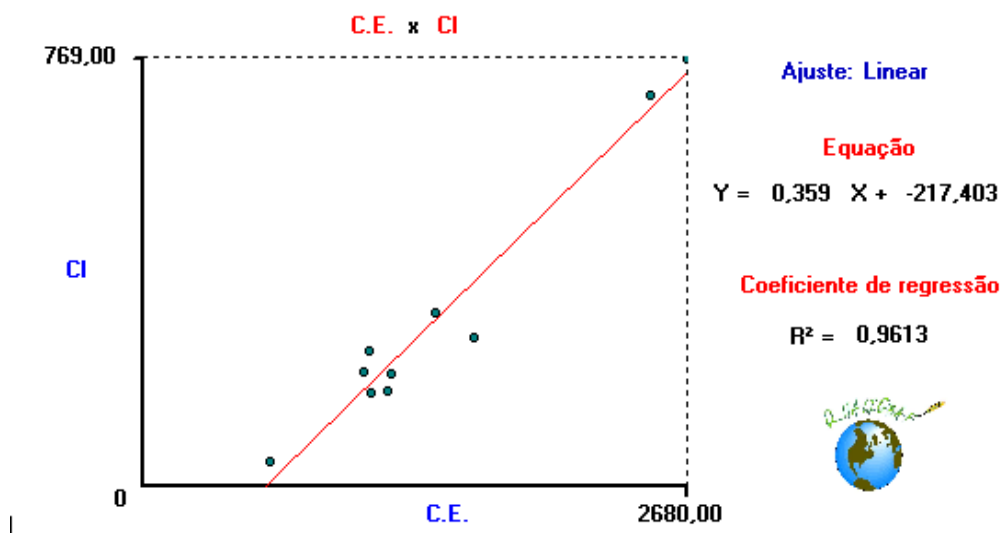


Figura 5.22. Concentração do Cl *versus* C.E. na Bacia Hidrográfica de S. Domingos. Ilha de Santiago.

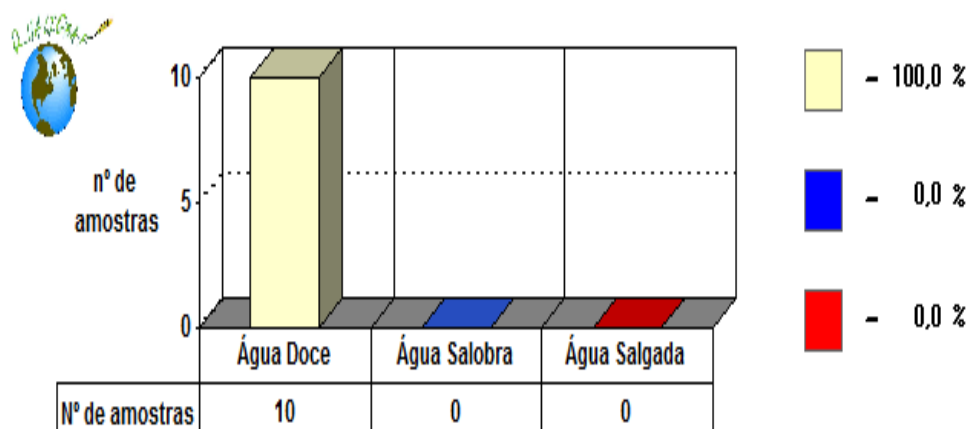


Figura 5.23. Classe das águas em função da salinidade na Bacia Hidrográfica de S. Miguel.

A estimativa dos STD nas amostras de água sobreexplotados na bacia hidrográfica de S. Miguel, tais como: FBE-145; FT-05; 51-272; SP-12; FT-39; FBE-144; FT-62; FBE-188; 51-201; e 52-29 é dada pela equação (7):

$$\text{STD} = \text{CE} * 0,67 \quad \text{Eq. (7)}$$

Valor tido como satisfatório para águas não muito salinas, a uma temperatura média de 18°C. Para águas muito salgadas ou muito ácidas, esta correlação não ocorre.

5.4.1.3. Diagrama do SAR

O laboratório de salinidade dos Estados Unidos da América classifica os solos quanto à salinidade em função da Condutividade Elétrica do Extrato da Saturação (CE), da Percentagem de Sódio Trocável (PST) ou da Razão de Absorção de Sódio (RAS) e do pH. (Tabela 5.5.). A linha divisória entre o solo salino e não salino tem estabelecido o valor de 4 dS m^{-1} para extratos de camada saturada do solo. Entretanto, podemos encontrar plantas sensíveis a sais, que podem ser afetadas em solos cujo extrato de saturação apresenta CE entre 2 e 4 dS m^{-1} (CAUDURO, 1991). O Comité de Terminologia da Sociedade Americana de Ciência do Solo tem recomendado baixar o limite entre os solos salinos e não salinos para 2 dS m^{-1} .

SAR é um índice que expressa a possibilidade de que a água de irrigação provoque a sodificação do solo, no que depende a proporção do Na^+ em relação aos demais cátions, em meqL^{-1} e calculado pelo Nanograma de Richards, equação (8). (RICHARDS, 1954).

$$RAS = \frac{\text{Na}^+}{\left[\left(\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2} \right) \right]^{0.5}} \quad \text{Eq. (8)}$$

O sódio desloca o cálcio ou outros íons associados aos materiais adsorventes como os minerais de argila e substâncias orgânicas, modificando as suas características, principalmente a permeabilidade. Problemas de infiltração em solos também estão relacionados com o conteúdo de CO_3^{2-} e HCO_3^- na água de irrigação (CAUDURO, 1991).

Quando o solo seca, parte desses íons se precipita como CaCO_3 e MgCO_3 aumentando a proporção relativa de sódio (CAUDURO, 1991). Esse processo pode ser avaliado separadamente do conceito RAS, mediante o índice de carbonato sódico residual (CSR), definido pela equação (9):

$$CSR = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad \text{Eq. (9)}$$

Os dois conceitos (RAS e CSR) são combinados em um novo conceito de relação de adsorção de sódio ajustada (RASa), definida pela equação (10):

$$RAS = \frac{\text{Na}^+}{\left[\left(\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2} \right) \right]} [1 + (8,4 - pHc)] \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

8,4 = pH de um solo salino não sódico, em equilíbrio com CaCO_3 ,

pHc = fator de ajuste = $(\text{pK}'_2 - \text{pK}'_c) + \text{p}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) + \text{p}(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$

K'_2 = constante de dissociação do HCO_3^-

K'_c = constante de solubilidade do CaCO_3

O pHc representa um valor teórico de pH, calculado para uma água em contato com cálcio do solo e em equilíbrio com o seu CO_2 . Valores de pHc superiores a 8,4 diminuem o RAS e o risco de sodificação devido a tendência de dissolução do CaCO_3 do solo. Valores inferiores demonstram uma tendência à precipitação da cálcio (CRUCIANI, 1997).

A Percentagem do Sódio Trocável (PST) representa a relação dos demais cátions adsorvidos; seu valor é dado pela equação (11), Nomograma de Richards, 1954:

$$PST = \frac{Na}{(Ca + Mg + Na + H + Al)} 100 \quad \text{Eq. (11)}$$

Considerando que há um equilíbrio entre formas solúveis e trocáveis de um determinado cátion, deve existir uma relação matemática entre RAS e a PST do solo de um determinado local. Conhecendo essa relação, pode-se estimar a PST de forma rápida e indireta na ausência dos resultados de análise.

Segundo Richards (1954), com os solos do Oeste dos Estados Unidos obteve a seguinte estimativa, equação (12):

$$PST = \frac{100(0,01475 \times RAS)}{1 + (0,01475 \times RAS)} \quad \text{Eq. (12)}$$

Tabela 5.5. Classificação da salinidade em função da CE, PST e do pH (USSL).

SOLO	CE (mmhos/cm)	• RAS • (%)	pH
NORMAL	<4	• <13	<8,5
SALINO	>4	• <13	<8,5
SÓDICO	<4	• >13	≥8,5
SALINO/SÓDICO	>4	• >13	<8,5

5.5. Qualidade da Água da Barragem de Poilão – fins agrícolas

A classificação da qualidade da água de irrigação utilizada mundialmente por mais de 20 anos foi desenvolvida pelo Laboratório de Salinidade de Riverside (RICHARDS, 1954). A classificação levava em conta a condutividade elétrica e sua adsorção de sódio (RAS) e os valores médios obtidos foram com base em áreas irrigadas.

Entretanto, durante as últimas décadas consideráveis opiniões têm sido produzidas depois da utilização destas águas em áreas de regiões de clima árido e no semi-árido. No centro destas discussões, em 1976, a FAO desenvolveu um novo guia para uma rápida avaliação do uso destas águas. Este guia foi parcialmente reformulado por AYERS and WESTCOT, em 1991 (Tabela 5.6.)

Tabela 5.6. Classificação da água de irrigação quanto aos riscos de sodicidade (AYRES & WESTCOT, 1991).

RAS (mmol) ^{1/2}	CLASSES DE SODICIDADE		
	S ₁ (sem problemas)	S ₂ (problemas crescentes)	S ₃ (problemas severos)
	CEa (μS/cm)		
0 – 3	>700	700 – 200	<200
3 – 6	>1200	1200 – 300	<300
6 – 12	>1900	1900 – 500	<500
12 – 20	>2900	2900 – 1300	<1300
20 - 40	>5000	5000 - 2900	<2900

A relação entre a composição química da água e a salinidade do solo, o efeito do sódio na taxa de infiltração e a especificidade tóxica de vários íons e outros efeitos específicos são levados em conta neste guia.

A variação na qualidade das águas para a irrigação depende da zona climática, fonte de água, trajeto percorrido, época do ano, geologia da região e desenvolvimento da irrigação. Normalmente, águas das zonas áridas ou em épocas mais secas do ano apresentam maior teor de sais; águas subterrâneas em geral são mais salinas do que as águas dos rios e estas próximas da foz, contêm mais sais do que próximas a nascente (DIELEMAN, 1980).

A avaliação dos riscos de salinização (Tabela, 5.7.) de uma determinada área mediante a água de irrigação não poderá ser feita simplesmente pela qualidade da água, pois, seus efeitos dependem das características do solo, da tolerância das culturas a serem exploradas, das condições climáticas locais e do manejo da irrigação e drenagem, além de suas características físico-químicas (FRENKEL, 1984). Desse modo, a qualidade da água de irrigação pode ser considerada como um importante fator, mas nunca deve ser esquecido que ela é tão-somente um dos fatores e que não é possível desenvolver um sistema de classificação que possa ser utilizado sob todas as circunstâncias.

Tabela 5.7. Classificação da água de irrigação quanto ao risco de salinidade. FRENKEL (1984) e PIZARRO (1985).

Classes de Salinidade	Riscos de Salinidade	Faixas de CEa ($\mu\text{S/cm}$)
C ₁	Baixo	<750
C ₂	Médio	750 – 1500
C ₃	Alto	1500 – 3000
C ₄	Muito alto	3000>

Na realidade, não existe um limite fixo da qualidade das águas e seu uso é determinado pelas condições que controlam a acumulação dos sais e seus efeitos nos rendimentos das culturas (AYERS & WESTCOT, 1991). Uma irrigação mesmo com baixos teores de sais (CE entre 0,1 a 1,0 dS/m) pode induzir problemas de salinização, não pela água utilizada mas devido a elevação do lençol freático provocado pela aplicação de lâminas excessivas de água, perdas de água em canais de distribuição e drenagem deficiente (CRUCIANI, 1997).

No que se refere à qualidade das águas para a irrigação, a classificação mais utilizada é aquela proposta pelo USSL, que relaciona a concentração de sais solúveis, como indicadora do perigo de salinização do solo, e a Razão de Absorção de Sódio (RAS), como indicadora de perigo de sodificação.

A concentração de sais solúveis pode ser adequadamente doseada, para fins de classificação, em termos de C.E. em $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C . Os resultados das análise de água da Barragem de Poilão (outubro de 2009) estão plotados no diagrama do USSSL, apresentado na Figura 5.24.

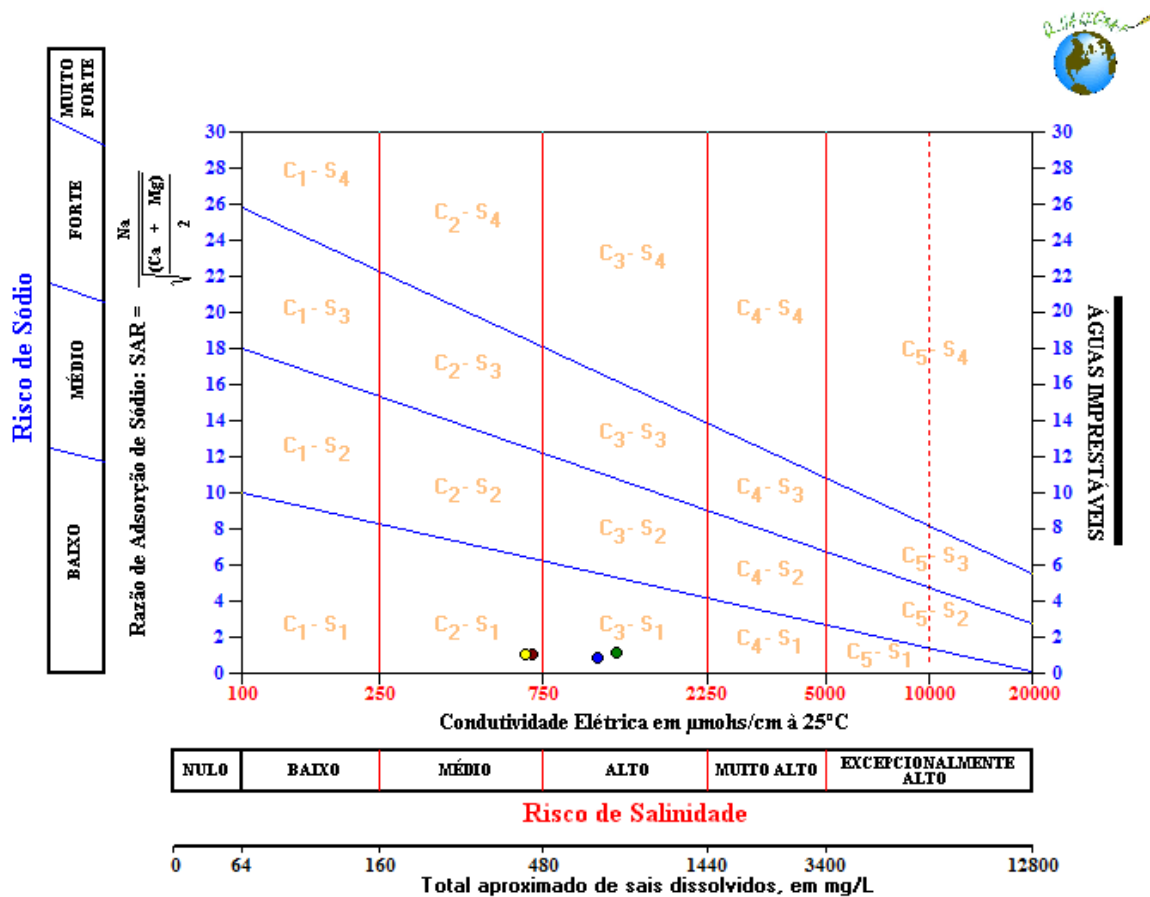


Figura 5.24. Apresentação do diagrama do USSSL, onde estão plotados os resultados das análise de água da Barragem de Poilão. (outubro de 2009).

Legenda:

- Serrado, afluente da barragem de Poilão (córregos estreitos de aspeto límpido)
- Região litorânea do reservatório (açude eutrofizado, lixo e bastante assoreado)
- Região liminética do reservatório (açude eutrofizado, lixo e bastante assoreado)
- São Jorge dos Órgãos (córregos estreitos de aspeto límpido que fluem para a barragem)

Para fins de diagnóstico, a classificação do USSL, define as seguintes classes de águas:

Quanto ao perigo de salinização

- C₁- Águas com baixa salinidade. Condutividade elétrica entre 100 e 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondendo aproximadamente a 64 e 160 mg/L de sólidos dissolvidos. Pode ser utilizada na maioria das lavouras e em quase todos os solos, com pequeno risco de salinização, salvo se a permeabilidade deste for extremamente baixa,
- C₂- Águas com salinidade média. Condutividade elétrica entre 250 e 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondendo aproximadamente a 160 e 480 mg/L de sólidos dissolvidos. Pode ser utilizada em solos que apresentem lixiviação moderada. As plantas com baixa tolerância salina podem ser cultivadas, na maioria dos casos, sem perigo,
- C₃- Águas com salinidade alta. Condutividade elétrica entre 750 e 2750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondendo aproximadamente a 480 e 1440 mg/L de sólidos dissolvidos. Não pode ser utilizada em solos de drenagem deficiente. Se presta para culturas com boa tolerância salina, e,
- C₄- Águas com salinidade extremamente alta. Condutividade elétrica entre 2250 e 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondendo aproximadamente a 1440 e 3200 mg/L de sólidos dissolvidos. Geralmente, não são utilizadas para irrigação, salvo os casos de plantas com alta resistência salinas em solos bastante permeáveis e abundantemente irrigados.

Quanto ao perigo de sodificação

- S₁- Água com baixa proporção de sódio. Pode ser utilizada em quase todos os tipos de solo, sem riscos de acumulação de quantidades nocivas de sódio permutável. Faz-se ressalva apenas às lavouras muito sensíveis ao sódio,
- S₂- Água com proporção média de sódio. Envolve um certo risco em condições de lixiviação deficiente, em terrenos de textura fina com elevada capacidade de troca catiônica. Pode ser utilizada em solos orgânicos ou de textura grossa com boa permeabilidade,
- S₃- Água com proporção elevada de sódio. Pode conduzir a quantidades perigosas de sódio permutável na maior parte dos solos, aceitável apenas em condições de boa drenagem e lixiviação intensa, e,
- S₄- Água com proporção muito elevada de sódio. Geralmente, é inadequada para irrigação, exceto quanto a salinidade é muito boa.

A análise da clorofila **a** (biomassa algal) da água da Barragem de Poilão, para fins agrícolas, foi feita para estimar o IET (Índice do Estado Trófico) recorrendo a classificação da Tabela 5.8.,(USDA, 1982), cuja finalidade é de classificar o estado trófico dos corpos de água, avaliando o enriquecimento por nutrientes e infestação por macrofitas. Os valores de concentração são em mg/L, da CE, em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e Cl **a** e Feofitina, em mg m^{-3} .

Tabela 5.8. Classificação do estado trófico de albufeiras (USDA, 1982).

Parâmetro	Ultra-oligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hiper-Eutrófico
Fosfatos, P	$\leq 4,0$	4,0 - 10,0	10,0 – 35,0	35 – 100	$>100,0$
Clorofila a - média	$\leq 1,0$	1,0 – 25,0	2,5 – 8,0	8 - 25	>25
Clorofila a - máxima	-	-	8,0 – 25,0	25 - 75	>75
Disco de Secchi (m)	$\geq 12,0$	12,0 – 6,0	6,0 – 3,0	3 – 1,5	$<1,5$

Tabela 5.9. Parâmetros analisados da amostra da água da Barragem de Poilão e resultados obtidos.

P^{tos}	PARÂMETROS ANALISADOS						
1	pH	C.E.	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	F^-	DQO
2	7,9	1234	242	166	99	0,2	12
3	8,7	698	128	94	52	0,2	43
4	8,9	671	123	92	54	0,2	62

P^{tos}	PARÂMETROS ANALISADOS						
1	N-total	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	DT	AT
2	25	120	60	60	8	300	255
3	3	43	38	40	9	108	154
4	3	45	36	39	9	112	141

P^{tos}	PARÂMETROS ANALISADOS						
	Cl a	Feofitina	N-Total	P-Total	Razão N/P	PO₄³⁻	N-NO³⁻
1	-	-	25	0,25	100	0,19	17
2	74	19	3	0,15	20	ND	2
3	78	17	3	0,17	17,6	ND	2
4	-	-	15	0,15	100	0,13	11

Legenda:

- 1: Serrado, afluente da barragem de Poilão (córregos estreitos de aspeto límpido)
 - 2: Região litorânea do reservatório (açude eutrofizado, lixo e bastante assoreado)
 - 3: Região liminética do reservatório (açude eutrofizado, lixo e bastante assoreado)
 - 4: São Jorge dos Órgãos (córregos estreitos de aspeto límpido que fluem para a barragem)
- ND: Não Detectado

5.6. Razões Iônicas

Estudo de razões iônicas é muito importante para a classificação e interpretação hidrogeoquímica das águas subterrâneas. Nas três ribeiras da zona leste da ilha de Santiago foram selecionadas as principais razões iônicas indispensáveis para o estudo de aquíferos costeiros (Anexo C).

A razão dos íons alcalinos pelos cloretos é calculada pela equação (13):

$$\frac{r\text{Na}^+ + r\text{K}^+}{r\text{Cl}^-} \quad \text{Eq. (13)}$$

é muito útil nos estudos de salinização em áreas costeiras. Para água do mar a razão varia geralmente entre 0,87 e 0,89. Também pode ser avaliado pela razão $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$, que é aproximadamente de 0,86. O valor para água doce é uma função do processo químico durante a recarga, mas geralmente é $1,0 \pm 0,1$. Quando se misturam duas águas, salina e doce, a razão alcalinos/cloreto diminui em relação aos valores da água doce e frequentemente alcançam valores mais baixos que águas marinhas (CABRAL e PAIVA, 2004).

A Tabela 5.9. descreve as principais razões iônicas e seus significados (HEM, 1985).

Tabela 5.10. Principais razões iônicas e seus significados (HEM, 1985).

Razão Iônica	Variações Teóricas	Significado
$r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$	0,25-0,33	-Água de circulação em rocha de composição granítica
	0,33-1,5	-Águas continentais
	>0,9	-Contato com água do mar ou fluxo através de rocha básica; possível influência de terrenos dolomíticos
	>1	-Relações com litotipos ricos em silicatos magnesianos
	± 5	-Água do mar
$r\text{Ca}^{+2}/r\text{Mg}^{+2}$ $\text{Ca}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2+})$	>1	- Indicação de Intrusão Marinha
$r\text{K}^+/r\text{Na}^+$	0,02-0,025	-Água do mar
	0,09-0,6	-Água de circulação em rocha com composição granítica
	0,004-0,28	- "Água doce"
$r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$	<0,0876	-Água do mar
	<0,7	- Substituição de Na^+ por Ca^{+2} e Mg^{+2}
	>0,7	-Precipitação de sais de Na^+ fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas
$r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$	0,5	-Fluxo normal para rochas cristalinas
	0,1-0,5	-Águas continentais
	20-50	-Água do mar

Uma das características da intrusão salina é comumente o enriquecimento do cálcio acima da concentração na água do mar; razões altas de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (>1) são indicadores da chegada da intrusão marinha. Todavia, águas salinas com valores altos de Ca^{2+} podem ter outras origens (JONES et al., 1999). Através dos resultados obtidos pelas razões iônicas nas três bacias hidrográficas (Anexo C), percebe-se um indício de intrusão salina.

A falta de dados do parâmetro Br impossibilitou a utilização da razão Cl^-/Br^- considerado como um traçador confiável, devido ao fato do Cl^- e Br^- serem conservativos, isto é, não reagem com a matriz do aquífero, exceto na presença de quantidade muito grande de matéria orgânica podendo ser obtidas informações sobre a fonte de salinização: a água do mar possui aproximadamente $r\text{Cl}/r\text{Br} = 655$ (CUSTÓDIO, 1987). Da mesma forma para o Índice de Qualidade das Águas - IQA por falta de informações principalmente dos parâmetros; DQO_5 , e do OD.

Quase todos os valores obtidos sugerem que os poços da costa oriental da ilha de Santiago estão sob influência marinha direta. Os altos valores encontrados para a razão iônica (Anexo C) reforçam essa ideia, sem que isso necessariamente signifique que já estivessem comprometidas.

Algumas ferramentas recomendáveis como os softwares AquaChem® e PHREEQC (índice de saturação) permitiriam a elaboração de gráficos e diagramas para um melhor entendimento do comportamento dos íons no aquífero.

A correlação entre as concentrações dos íons maiores, cátions (Figura 5.25.) e ânions (Figura 5.26.) com a Condutividade Elétrica, C.E., é uma ferramenta que permite identificar os elementos responsáveis pelo aumento da salinidade da água como, dos fenômenos modificadores.

Os mesmos elementos, também identificados aplicando o coeficiente de correlação de Pearson, com “r” significativo entre as duas variáveis; C.E. versus Cl^- e C.E. versus Ca^{2+} ou Na^+ . Todas as relações lineares são significativas, ou seja, uma cresce, ou decresce, em relação à outra, e acontecendo proporcionalmente.

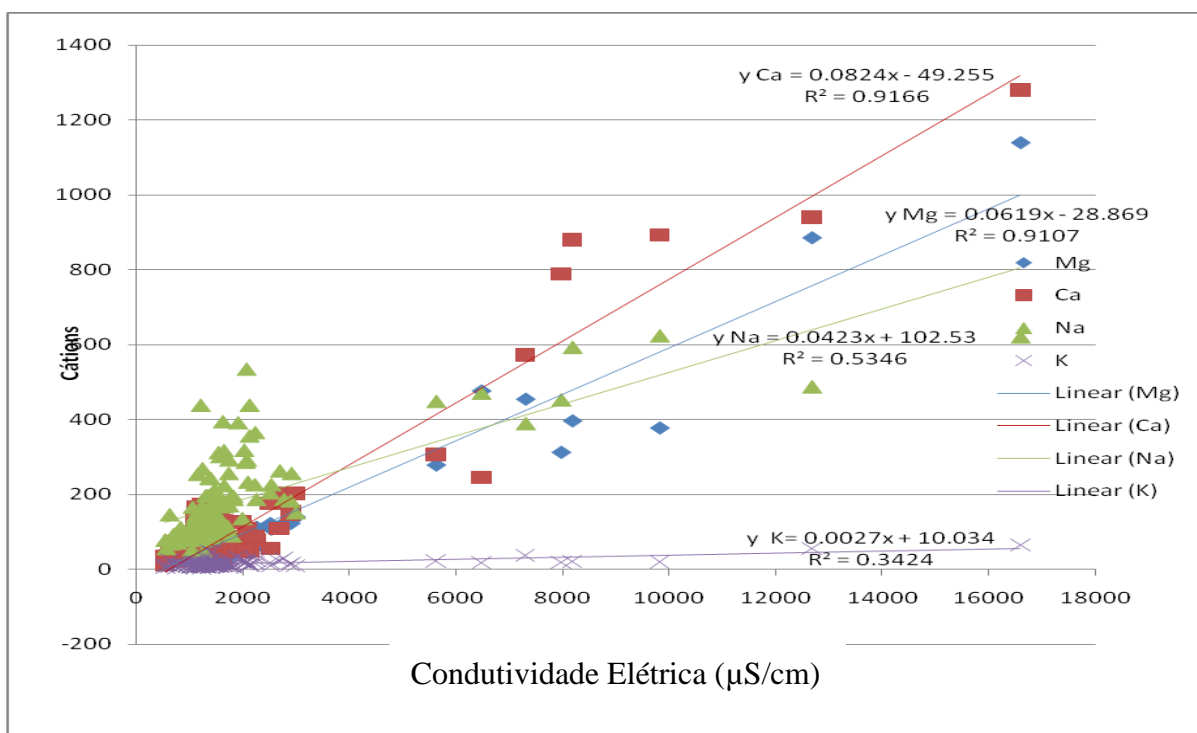


Figura 5.25. Concentração dos cátions *versus* C.E. nas bacias hidrográficas da parte oriental da ilha de Santiago.

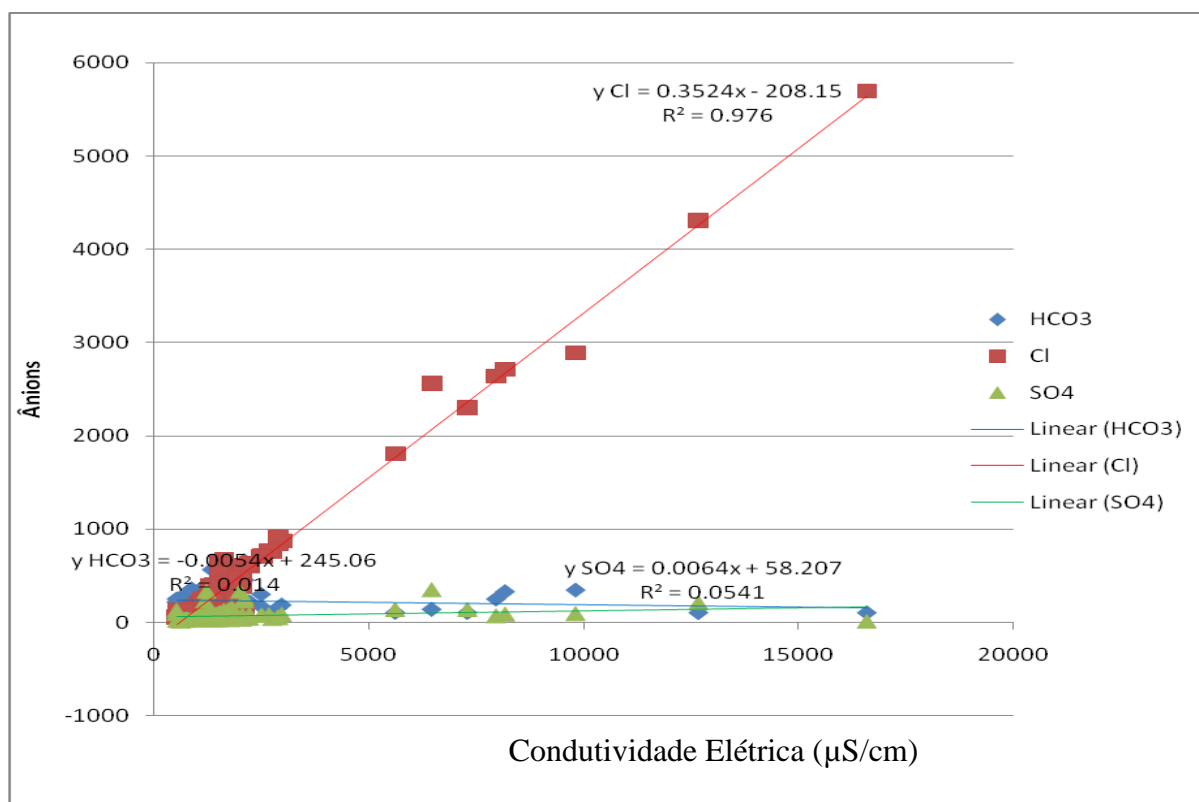


Figura 5.26. Concentração dos ânions *versus* C.E. nas bacias hidrográficas da parte oriental da ilha de Santiago.

CAPÍTULO 6 – HIDROGEOQUÍMICA ISOTÓPICA NA COSTA LESTE DA ILHA

CAPÍTULO 6

HIDROGEOQUÍMICA ISOTÓPICA NA COSTA LESTE DA ILHA

6. HIDROGEOQUÍMICA ISOTÓPICA NA COSTA LESTE DA ILHA SANTIAGO

6.1. Introdução

A utilização de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos remonta vários anos, tendo-se iniciado com os trabalhos pioneiros de Urey *et al* e Epstein & Mayeda na década de 50 (CLARK & FRITZ, 1997). O emprego de isótopos ambientais, assim denominados por serem encontrados de forma generalizada no meio ambiente em quantidades que permitem seu uso como traçadores ou marcadores cronológicos, é muito difundido a nível mundial, constituindo nos dias de hoje uma ferramenta que se pode considerar como tradicional no meio técnico hidrogeológico (SALOMONS, *et al*, 1976).

No contexto hidrológico e hidrogeológico os isótopos ambientais são atualmente utilizados não só na identificação da origem das águas superficiais e subterrâneas, mas também em estudos dos processos de recarga, nas reações geoquímicas e na cinética dessas reações e de idade de um aquífero (CLARK & FRITZ, 1997). Classicamente, os padrões de fluxo são determinados à partir de pontos onde se mede o nível potenciométrico da água e as transmissividades são estimadas à partir de ensaios de bombeamento, sem que se tenha evidência direta do tipo, origem e idades da água.

A hidrologia isotópica preenche parcialmente esta lacuna, e os isótopos ambientais são particularmente indicados porque representam os melhores traçadores uma vez que, no caso do ^3H , ^2H e ^{18}O constituem as próprias moléculas de água. Não obstante o exposto, os isótopos ambientais não têm sido utilizados de forma substancial em Cabo Verde havendo ainda inclusive um certo desconhecimento no meio técnico especializado de suas peculiaridades e mesmo de potenciais situações em que estas técnicas poderiam ser úteis.

Os isótopos de um elemento químico são caracterizados pelo mesmo número atômico e diferentes números de massa. Esta diferença no número de massa é provocada pela variação do número de neutrons do elemento e condiciona comportamentos distintos do elemento em relação a um determinado isótopo, modificando localmente a abundância relativa entre os vários isótopos na natureza, num processo denominado de fracionamento isotópico.

Quanto maior a diferença de massa entre eles, maior o fracionamento. O fracionamento pode ocorrer por mudança de fase ou de estado, diferença na taxa de reação química e diferença na velocidade de difusão molecular (CLARK & FRITZ, 1997). Os isótopos podem ser radioativos (estarem sujeitos a desintegração no tempo por emissão de radioatividade) ou não.

Nem todos os isótopos ocorrem na natureza em proporções significativas ou mensuráveis. Dentre os isótopos radioativos, por exemplo, alguns podem ser obtidos somente de forma artificial, em laboratório. Os isótopos que têm ocorrência natural e que acompanham os ciclos naturais do meio ambiente (ciclo hidrológico, do carbono e outros) são denominados comumente de "ambientais". A maioria dos estudos com isótopos ambientais tem centrado na utilização dos isótopos de hidrogênio (^1H , ^2H , ^3H), Carbono (^{12}C , ^{13}C , ^{14}C), Nitrogênio (^{14}N , ^{15}N), Oxigênio (^{16}O , ^{18}O) e Enxofre (^{32}S , ^{34}S).

Estes são os elementos mais importantes nos sistemas biológicos e participam na maioria das reações de interesse hidrogeoquímico (SALOMONS, *et al*, 1976).

Mais recentemente o ^{36}Cl e o ^3He tem sido bastante utilizados. A distinção do uso de cada um desses isótopos é função dos objetivos de cada trabalho e dos meios de que se dispõem.

Geralmente, a abundância do isótopo na natureza é baixa, mas em alguns casos a ação antrópica ao longo do tempo favoreceu o aumento desta como no caso de ^2H , ^3H , ^{13}C e ^{14}C com as bombas nucleares. As propriedades dos isótopos que tornam atrativo o seu uso são o fracionamento e a radioatividade (quando existente permite, através da abundância isotópica e da taxa de decaimento, estimar idades).

Os isótopos ambientais tem vindo a afirmar-se como uma técnica de rotina em estudos hidrogeológicos, complementando as abordagens convencionais da hidrogeoquímica e da hidrodinâmica. Os isótopos estáveis da molécula de água têm sido amplamente utilizados, justamente pela sua composição isotópica ser modificada pelos processos meteóricos, conferindo-a uma assinatura isotópica característica, constituindo como um traçador natural para a identificação da proveniência das águas subterrâneas.

Isótopos normalmente utilizados em estudos hidrológicos em Cabo Verde, são ^{18}O e ^2H .

O uso destes isótopos é função dos seguintes fatores:

- ✓ A abundância compatível com a resolução dos métodos de análise,
- ✓ São principais constituintes da água (hidrogênio e oxigênio) e, por isso, o comportamento deles é muito próximo ao da água, funcionando como excelentes traçadores ("traçador ideal"), e,
- ✓ Especificamente para o ^3H , a medição da sua radioatividade (meia-vida / $\lambda = 12,43$ anos) é um indicativo da idade das águas.

Os demais isótopos têm utilização limitada em função da baixa abundância isotópica, dificuldade de mensuração e/ou meia-vida (λ) não apropriada (muito curta ou muito longa) como no caso do ^{36}Cl ($\lambda = 301.000$ anos) e ^{14}C ($\lambda = 5730$ anos) que devem ser utilizados para regiões de recarga muito antiga (SALOMONS, *et al*, 1976).

Estudos com isótopos ambientais em uso hidrológico em Cabo Verde tiveram como alvos principais a ilha de Santiago motivados pela seca e salinização das águas, tendo como objetivos o conhecimento da origem e dos mecanismos de recarga dos aquíferos, a causa da salinização, o tempo de trânsito e a datação destes aquíferos.

6.2. Isótopos Ambientais

A molécula de água é constituída por dois elementos – hidrogênio e oxigênio – na proporção de 2:1. Cada um destes elementos tem vários isótopos, proporcionando diferentes massas às moléculas de água. São atualmente conhecidos três isótopos naturais de hidrogênio (^1H , ^2H e ^3H) e nove isótopos de oxigênio (^{12}O , ^{13}O , ^{14}O , ^{15}O , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^{19}O e ^{20}O), os quais podem entrar na composição da molécula de água (CLARK & FRITZ, 1997).

No caso do hidrogênio, o ^1H (proton) e o ^2H (deutério) são estáveis, enquanto o ^3H (trítio) é radioativo, libertando partículas β^- e convertendo-se em átomo estável de ^3He , seguindo uma taxa de decaimento com um tempo de semi-vida de 12,32 anos (LUCAS e UNTERWEGER, 2000). As abundâncias isotópicas na água do mar do ^1H , ^2H e ^3H são de 99,984%, 0,016% e $5 \times 10^{-6}\%$, respetivamente (MAZOR, 1991).

Dos nove isótopos de oxigênio, três são estáveis (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O) e os restantes são radioativos, com tempos de semi-vida que variam entre 13,5 e 122 segundos. As abundâncias relativas na água do mar dos três isótopos estáveis são de 99,76%, 0,04% e 0,20%, respetivamente para o ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O (CLARK & FRITZ, 1997).

Do exposto, facilmente se conclui que os isótopos mais abundantes na água são o ^1H e o ^{16}O . No entanto, apesar das suas abundâncias relativas serem muito baixas, os restantes isótopos estáveis participam também na composição de moléculas de água, em proporções não necessariamente iguais à sua abundância isotópica. Com efeito, ao longo do ciclo hidrológico, as massas de água sofrem alterações na sua composição isotópica global, através de um fenómeno chamado de fracionamento isotópico, pelo que a composição isotópica da precipitação é normalmente diferente da composição isotópica da água do mar, de onde se evaporou (Figura 6.1.). Do mesmo modo, também as águas subterrâneas apresentam usualmente assinaturas isotópicas distintas da precipitação e da água do mar.

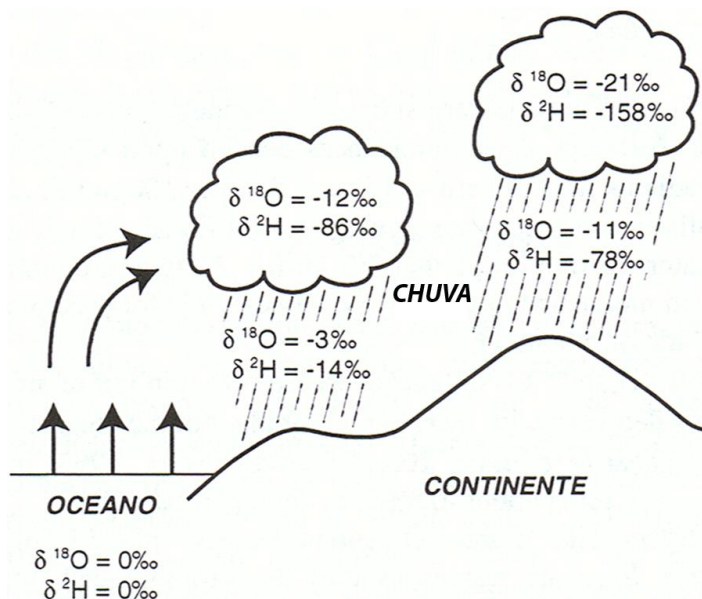


Figura 6.1. Representação esquemática do fracionamento isotópico em diversas etapas do ciclo hidrológico (adaptado de COPLEN *et al*, 2001).

A composição em isótopos estáveis na água é determinada com base na razão entre os dois isótopos mais abundantes de cada elemento. Por exemplo, no caso do oxigênio, a razão entre o isótopo mais pesado (^{18}O) e o isótopo mais leve (^{16}O) é de 0,20/99,76, ou seja, 0,002005. No entanto, o processo de fracionamento modifica ligeiramente o valor desta razão, embora as variações ocorram apenas a nível da quinta ou da sexta casa decimal. A medida absoluta das razões isotópicas é um processo extremamente complexo e pouco preciso, por isso, se procede à medição relativa destas razões, obtendo-se valores cerca de uma ordem de grandeza mais precisos do que os que se obteriam em medições absolutas (COPLEN *et al.*, 2001).

Favoravelmente, as diferenças relativas entre os isótopos podem ser determinadas facilmente através de medição da relação diferencial com Espectrómetros de Massa. Esta relação diferencial ou concentração isotópica (δ) é expressa, como uma proporção (partes por mil - ‰) entre a razão medida na amostra e a razão medida em um padrão de referência internacional (antigamente SMOW - Standard Mean Ocean Water definido por CRAIG (1961 a), e atualmente VSMOW - Viena Standard Mean Ocean Water), a partir das indicações de COPLEN (1994) e IUPAC (1994), medidos simultaneamente no mesmo aparelho e expressos da seguinte forma. Equação (14):

$$\delta^o /_{oo} = \frac{R_{amostra} - R_{padrao}}{R_{padrao}} \times 10^3 \quad \text{Eq. (14)}$$

onde $R_{amostra}$ e R_{padrao} representam as razões isotópicas da amostra e do padrão, respetivamente. Exemplificando, para o caso do oxigênio, através da equação (15):

$$\delta^{18}\text{O}_{amostra} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{amostra} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{padrao}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{padrao}} \times 10^3 \quad \text{Eq. (15)}$$

Assim, uma amostra com um teor de $\delta^{18}\text{O} = 50,0\text{‰}$ está enriquecida em 5% (ou 50‰) relativamente ao padrão e é considerada isotopicamente “pesada” em relação ao padrão. Um valor de δ negativo indica que a amostra está empobrecida em isótopo pesado relativamente ao padrão e, por isso, é considerada isotopicamente “leve”, em relação ao padrão.

CRAIG (1961 b), baseado em cerca de 400 amostras de água de rios, lagos e da própria precipitação, verificou que, à escala global, os teores dos principais isótopos de hidrogênio e oxigênio nas águas naturais apresentavam entre si uma proporção mais ou menos constante que poderia ser traduzida pela equação (16):

$$\delta^2\text{H} = 8^{18}\text{O} + 10\text{‰} \quad \text{SMOW} \quad \text{Eq. (16)}$$

Esta expressão, conhecida pela equação da Reta Meteórica Global, RMG, corresponde ao melhor ajuste linear dos pontos relativos à composição isotópica das amostras acima referidas. O valor da ordenada na origem é denominado de “excesso de deutério” e resulta essencialmente da difusividade diferencial das moléculas de água, já que a maior difusividade da molécula $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ em relação à molécula $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ conduz a um incremento do deutério em relação ao oxigênio “pesado”. A humidade relativa e a velocidade do vento parecem ser os principais fatores que controlam o excesso de deutério na precipitação. Desta forma, este parâmetro pode ser utilizado na identificação das fontes de vapor de água.

ROZANSKI *et al* (1993) procederam a uma revisão da equação proposta por CRAIG (1961 b), utilizando dados da reta global de isótopos na precipitação, tendo chegado à equação (17):

$$\delta^2\text{H} = 8,13^{18}\text{O} + 10,8\text{‰} \quad \text{SMOW} \quad \text{Eq. (17)}$$

Ambas as equações apresentadas correspondem, de fato, a médias de várias retas meteóricas locais ou regionais que diferem da reta meteórica global, devido a variações climáticas e a parâmetros geográficos (CLARK & FRITZ, 1997).

Os isótopos estáveis que constituem a molécula de água têm uma das suas principais aplicações no estudo das áreas de recarga de aquífero, particularmente na estimativa das respetivas altitudes médias. Os fundamentos desta metodologia relacionam-se com o fenómeno de fracionamento isotópico, designadamente através do efeito de altitude. De um modo geral, o padrão de distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na precipitação reproduz a topografia. De fato, em regiões montanhosas, a diminuição da temperatura com a altitude promove a condensação do vapor de água, conduzindo à depleção de isótopos pesados na precipitação, de acordo com gradientes que variam entre -0,15‰ e -0,50‰/100 m, no caso do $\delta^{18}\text{O}$, e entre -1‰ e -4‰/100 m, para o $\delta^2\text{H}$ (CLARK & FRITZ, 1997).

Considera-se que o efeito de altitude resulta de um processo contínuo de destilação de Rayleigh durante o esvaziamento do reservatório de vapor atmosférico (Figura 6.2.), provocado pelo arrefecimento decorrente da expansão adiabática das massas de ar à medida que progridem em altitude, devido à diminuição da pressão. Durante este processo, tanto a água condensada, como o vapor remanescente ficam progressivamente empobrecidos em isótopos pesados. Desta forma, à medida que as massas de ar húmidas se elevam na atmosfera ficam com menor quantidade de vapor de água, o qual, em processos de condensação subsequentes, dará origem a precipitações gradualmente mais “leves” (Figura 6.2.).

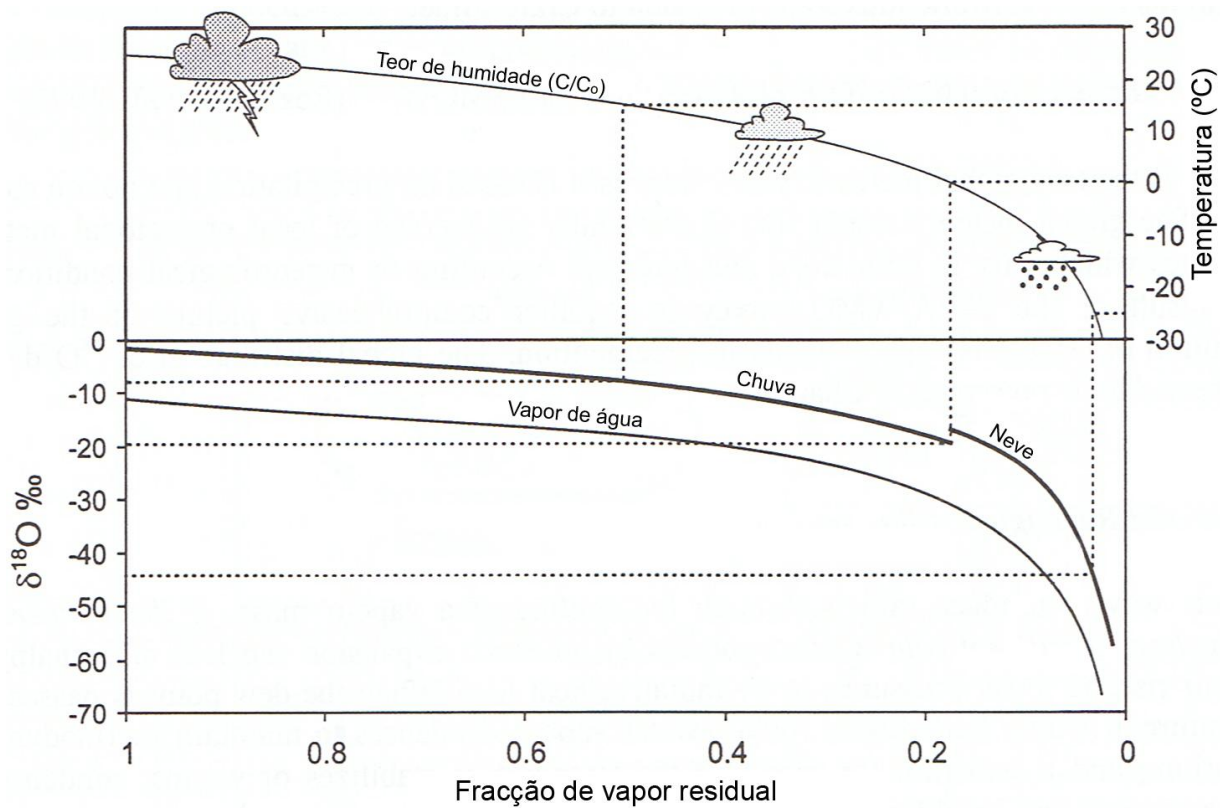


Figura 6.2. Variação do teor de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação de acordo com o modelo de destilação de Rayleigh, partindo de um teor inicial de $\delta^{18}\text{O}_{\text{vapor}} = -11\text{‰}$, à temperatura de 25 °C. As linhas a tracejado estabelecem a ligação entre a composição isotópica da precipitação e as respectivas temperaturas de condensação. Adaptado de (CLARK & FRITZ, 1997).

6.3. Apresentação de resultados e discussões

A Tabela 6.1. apresenta as coordenadas dos pontos de água amostrados e os respectivos resultados analíticos, os quais estão referidos em permil/ml de desvio em relação ao padrão internacional VSMOW. Os teores de $\delta^{18}\text{O}$ variaram entre -5,44‰ e 0,98‰ e os de $\delta^2\text{H}$ estão compreendidos entre -34,8‰ e 5,0‰. As amostras mais enriquecidas em isótopos pesados são de água do mar, apresentando teores invariavelmente positivos. Nas águas subterrâneas, os teores isotópicos variam entre -5,44‰ e -3,85‰, para o oxigênio, e entre -34,8‰ e -23,0‰, para o deutério. Por sua vez, as amostras de água do mar apresentam teores de $\delta^{18}\text{O}$ próximos do padrão, com valores compreendidos entre 0,42‰ e 0,98‰. Em relação ao deutério, embora não se afastem significativamente do padrão, as amostras de água do mar mostram-se enriquecidas em isótopo pesado, com teores de $\delta^2\text{H}$ entre 1,7‰ e 5‰ (Tabela 6.1.)

Tabela 6.1. Características dos pontos de amostragem e respectivos resultados analíticos.

Amostra	Ponto de água	UTM X (m)	UTM Y (m)	Z (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
ST ₁	Nascente	219852	1651178	53	-5,44	-34,8
ST ₂	Furo	219655	1656809	307	-5,27	-34,0
ST ₃	Furo	222790	1655497	237	-5,10	-31,8
ST ₄	Furo	227943	1657659	205	-4,83	-32,5
ST ₅	Furo	206967	1686347	179	-4,36	-25,8
ST ₆	Furo	205785	1684846	57	-4,41	-28,4
ST ₇	Furo	205940	1689037	54	-4,01	-24,6
ST ₈	Furo	205787	1688974	44	-4,00	-24,3
ST ₉	Furo	207464	1688594	89	-3,99	-24,9
ST ₁₀	Mar	204178	1691207	0	0,42	2,4
ST ₁₁	Furo	206932	1690575	137	-4,02	-25,9
ST ₁₂	Mar	219138	1684737	0	0,76	1,7
ST ₁₃	Furo	209577	1685270	276	-4,11	-23,0
ST ₁₄	Furo	228252	1660146	279	-4,85	-23,1
ST ₁₅	Furo	228124	1660146	297	-5,16	-32,3
ST ₁₆	Furo	232745	1662894	83	-4,18	-29,3
ST ₁₇	Furo	235337	1663164	37	-4,20	-31,5
ST ₁₈	Furo	216597	1669905	268	-3,85	-24,0
ST ₁₉	Furo	213774	1670988	501	-4,71	-30,5
ST ₂₀	Furo	212377	1670356	480	-4,84	-32,1
ST ₂₁	Furo	212568	1670576	462	-4,62	-29,8
ST ₂₂	Furo	211943	1670295	474	-4,77	-31,6
ST ₂₃	Furo	207354	1677350	417	-4,77	-32,2
ST ₂₄	Mar	203346	1675527	0	0,90	3,1
ST ₂₅	Mar	229125	1649135	0	0,98	5,0

A água do mar deveria apresentar uma composição isotópica média semelhante à do padrão VSMOW, ou seja, com teores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ muito próximos de zero, o que não se verifica na água do oceano Atlântico colhida na costa leste da ilha de Santiago-Cabo Verde, sobretudo para o deutério. Este enriquecimento em isótopos pesados deverá estar relacionado com o fracionamento isotópico associado à evaporação da água do mar, já que as amostras foram colhidas na camada mais superficial, isto é, na camada diretamente envolvida no processo de evaporação.

Como o processo de destilação de Rayleigh conduz a uma depleção de isótopos pesados no vapor (Figura 6.2.), a massa de água remanescente ficará enriquecida nestes isótopos. Esta interpretação é apoiada pela variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ na água do mar em função da latitude do local de amostragem, verificando-se que os dois parâmetros evoluem de forma inversa (Figura 6.3.).

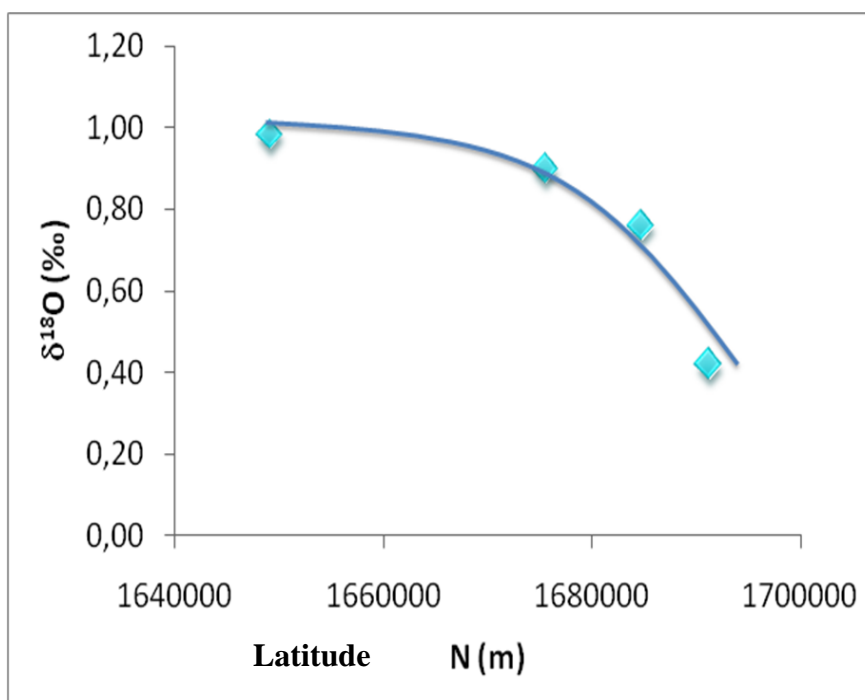


Figura 6.3. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ na água do mar em função da latitude dos locais de amostragem.

Considerando a época do ano em que foram efetuadas as colheitas (dezembro de 2007), é esperado que a temperatura média do ar decresça com a latitude, o que conduziria a uma menor intensidade do processo de evaporação nas áreas situadas a maior latitude. Como consequência, o enriquecimento da superfície livre em isótopos pesados nestas áreas não seria tão pronunciado como nas áreas situadas a menor latitude. Além disso, a própria água do mar não apresenta os mesmos teores isotópicos nas diferentes massas oceânicas. Por exemplo, o Mar Mediterrâneo e o Mar Vermelho estão enriquecidos em isótopos pesados relativamente ao padrão VSMOW, verificando-se o mesmo no Atlântico Norte, mas com menor expressão. Acresce que, na parte superficial das massas de água oceânica podem ocorrer grandes variações na composição isotópica relativamente às águas oceânicas profundas (ROZANSKI *et al*, 2000).

Estes fatos fazem com que as águas oceânicas superficiais ao longo da ilha de Santiago se encontrem enriquecidas em isótopos pesados, fenômeno este, dependente da taxa de evaporação e, portanto, da temperatura.

A distribuição espacial dos teores isotópicos nas águas subterrâneas mostra um empobrecimento em isótopos pesados no sentido NE-SW, ou seja, segundo um gradiente perpendicular ao alongamento da ilha (Figura 6.4.). Este fato sugere que a progressão das massas de ar húmidas que originam a precipitação responsável pela recarga dos aquíferos se faz também predominantemente naquele sentido, o que está de acordo com a distribuição espacial da precipitação (Figura 6.5.).

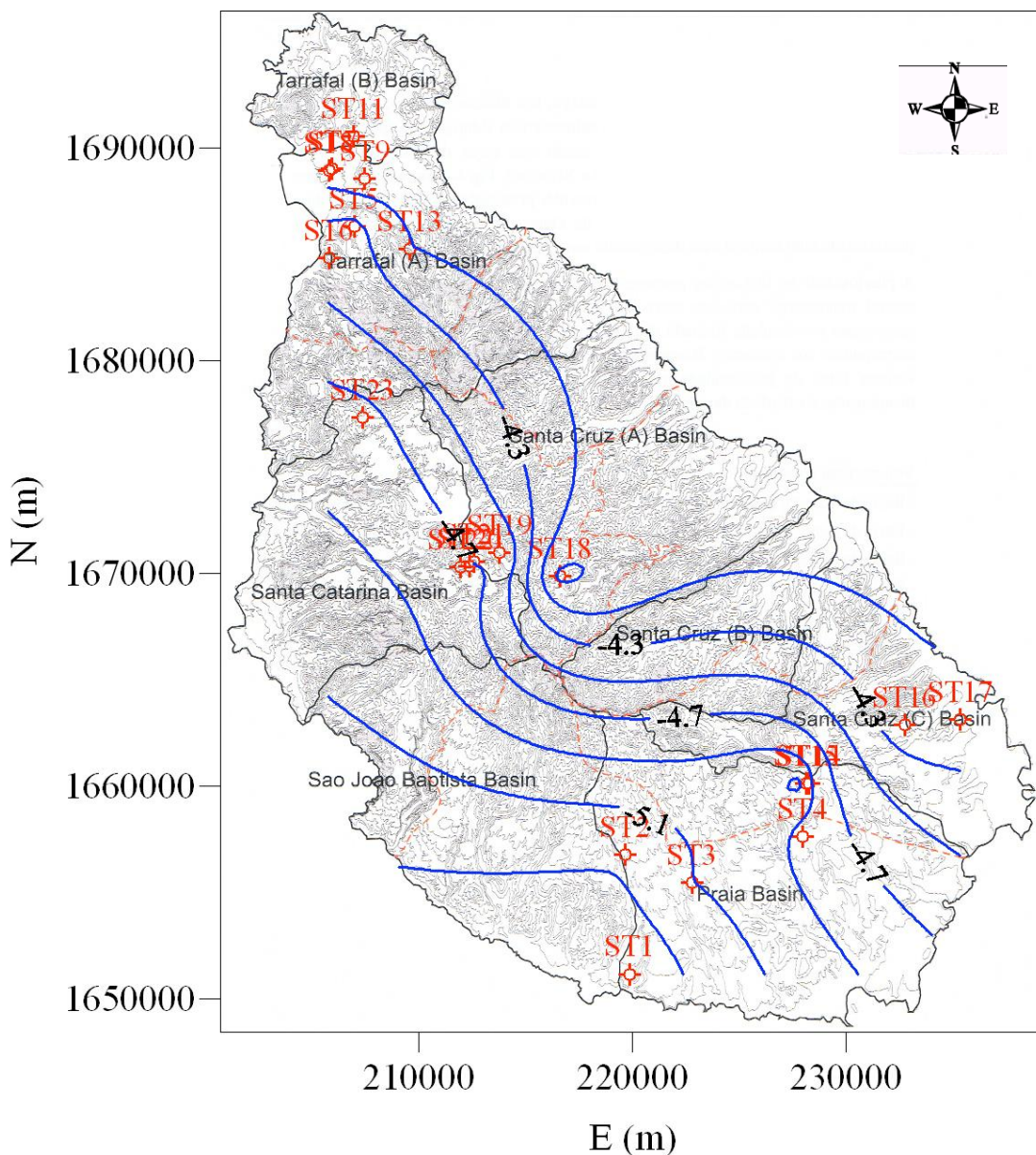


Figura 6.4. Distribuição espacial dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ (% VSMOW) nas águas subterrâneas da ilha de Santiago.

A precipitação média anual é de 270 mm, mas apresenta uma variabilidade espacial muito acentuada, sobretudo em função da altitude. É nas faixas litorais oeste e sul que se registam os mínimos pluviométricos, contrastando com a parte central da ilha, onde se atingem precipitações médias anuais superiores a 700 mm (Figura 6.5).

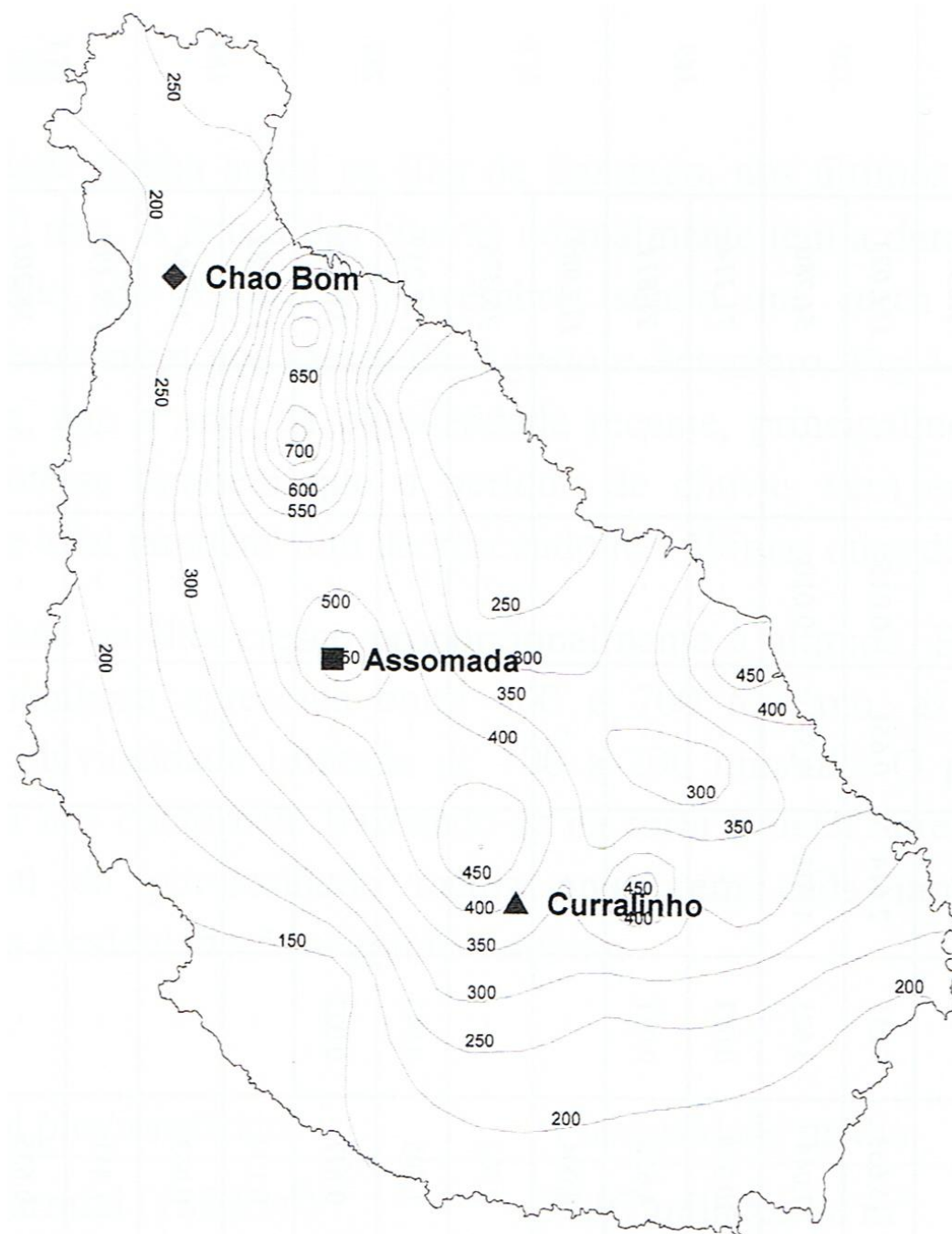


Figura 6.5. Mapa de isoietas da Ilha de Santiago, baseado na série pluviométrica de 1961-1990. Extraído de JICA e INGRH (1999).

As águas subterrâneas estudadas são de origem meteórica uma vez que a sua composição isotópica se projeta sobre ou nas imediações da RMG (Figura 6.6.). Embora, a reta de melhor ajuste dos pontos relativos às águas subterrâneas apresente uma inclinação e um valor de ordenada na origem inferiores aos da RMG. A reta, que poderia ser denominada de RMR, ajusta-se também aos pontos relativos às amostras de água do mar, indicando a mistura das águas subterrâneas à água oceânica (Figura 6.6.). A diferença entre a RMR e a RMG poderá estar relacionada essencialmente a fatores climáticos, a origem das massas de vapor de água e à evaporação secundária durante a precipitação (CLARK e FRITZ, 1997). O fato da inclinação da RMR ser inferior a 8 (inclinação da RMG), é um indício das condições de evaporação (ONAC *et al.*, 2008).

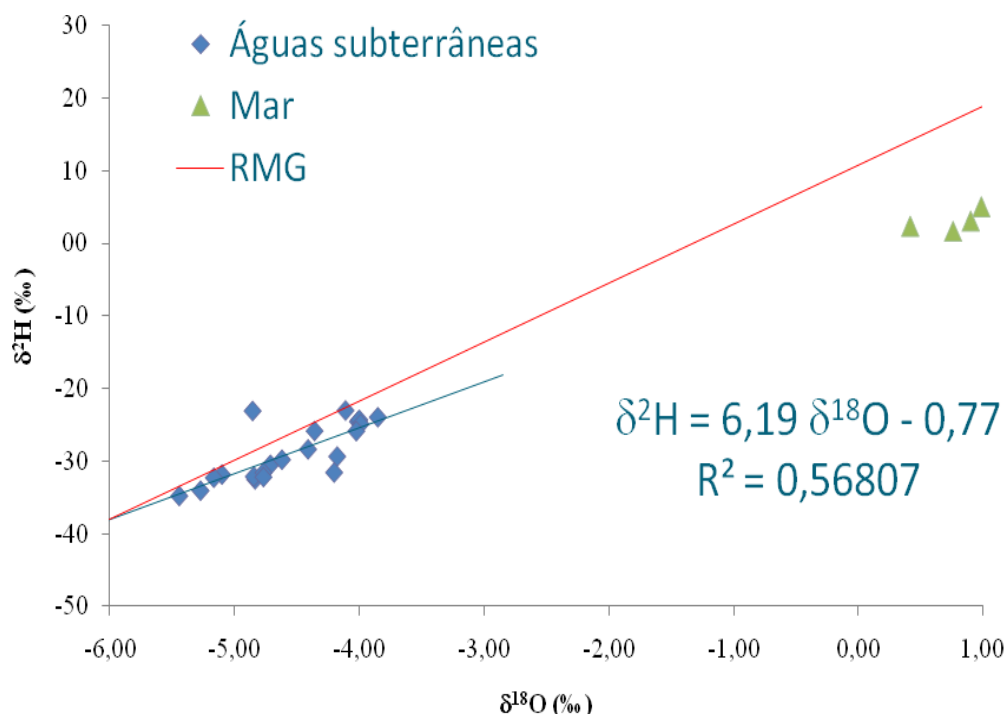


Figura 6.6. Projeção dos teores isotópicos das águas subterrâneas e da água do mar no diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ e comparação com a reta meteórica global (RMG).

Ao contrário do que normalmente acontece na precipitação e nas águas subterrâneas de circulação pouco profunda (LIMA, 2001), não se observa no presente estudo qualquer dependência dos teores isotópicos das águas subterrâneas com a altitude. Tal resulta do fato de que as amostras coletadas são quase exclusivamente provenientes de poços tubulares, desconhecendo-se a profundidade dos níveis produtivos. Além disso, situações de independência entre o teor isotópico e a altitude são comuns em águas com circuitos hidrogeológicos mais profundos, de âmbito mais alargado (LIMA *et al.*, 1997). Nestas condições, a assinatura isotópica das águas subterrâneas poderá ser utilizada para a identificação das áreas de recarga, para o efeito, estabelecer um gradiente isotópico altimétrico, com base no estudo sistemático da composição isotópica da precipitação.

Embora, o efeito de altitude não esteja completamente confirmada nas assinaturas isotópicas das águas subterrâneas, observa-se uma certa correlação entre os teores isotópicos e a longitude dos pontos amostrados (Figura 6.7.). A ilha de Santiago apresenta um conjunto de elevações na sua parte central (Figura 6.4.) definindo um eixo de direção aproximada NNW-SSE que divide a ilha em duas encostas, uma voltada para oeste e outra inclinando para este. Esta variação altimétrica é acompanhada por uma variação do teor isotópico, mostrando um empobrecimento em isótopos pesados no sentido W-E até ao centro da ilha e posteriormente um enriquecimento no sentido da costa este (Figura 6.4.).

Esta variabilidade isotópica pode estar relacionada, não só com o efeito de altitude, mas também com o afastamento à linha de costa.

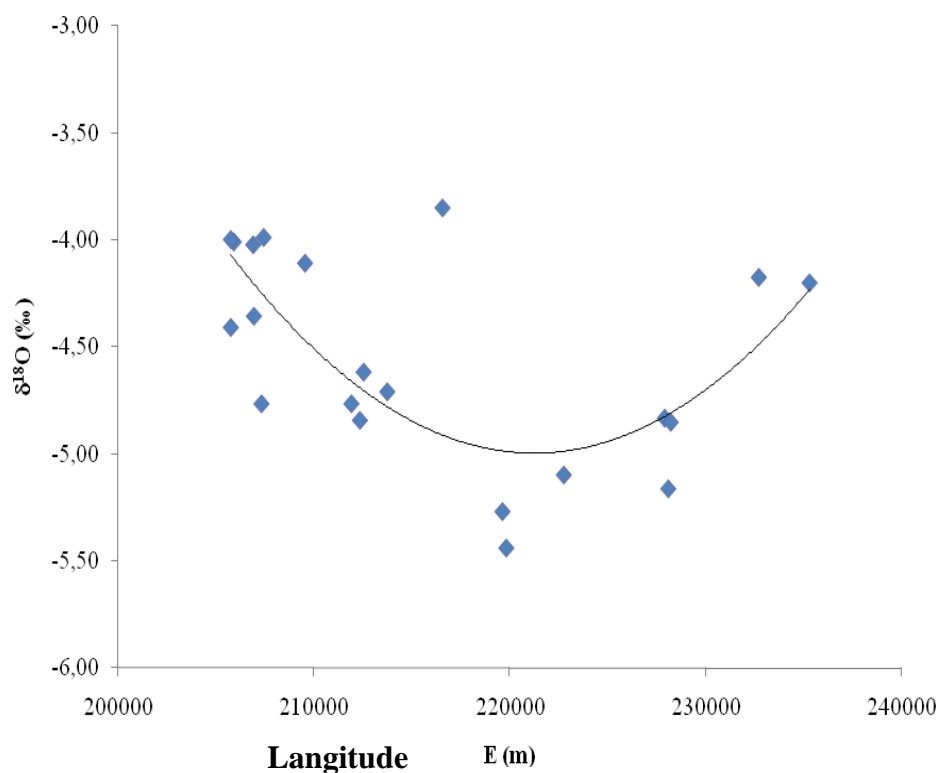


Figura 6.7. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas em função da longitude.

O enriquecimento em isótopos pesados dos pontos de água coletados próximos da costa poderia também ser explicado por fenômenos de intrusão salina. A mistura de água do mar com água subterrânea tornará estas isotópicamente mais pesadas e mais mineralizadas. De fato, observa-se uma certa correlação entre os teores isotópicos com a C.E., das águas subterrâneas coletadas junto a costa (Figura 6.8.). No entanto, esta ligeira tendência de enriquecimento em isótopos

pesados e aumento da mineralização deixa de se verificar para teores de $\delta^{18}\text{O}$ de, aproximadamente, -4,00‰.

As amostras de água subterrânea coletadas longe da costa são menos mineralizadas e empobrecidas em isótopos pesados. Desta forma, a variabilidade isotópica das águas subterrâneas só intervêm no fenômeno de intrusão marinha nos poços cartesianos com pouca profundidade e junto ao litoral (Figura 6.8.).

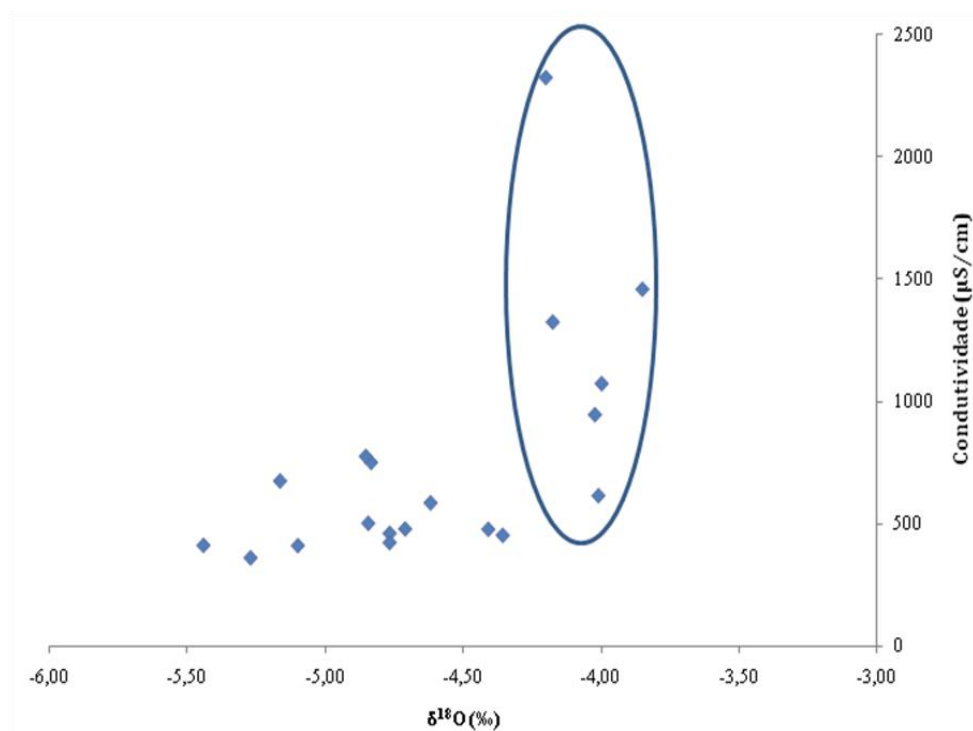


Figura 6.8. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e dos valores de Condutividade Elétrica das águas subterrâneas.

À semelhança do que se verifica em relação à longitude, também a latitude influencia a composição isotópica das águas subterrâneas observado duas tendências do mesmo tipo, mas com magnitudes distintas (Figura 6.9.).

Assim, há um conjunto de amostras no qual a variação isotópica em função da latitude é mais pronunciada que as amostras de um segundo grupo. No primeiro, é constituído pelos pontos de água situados no setor meridional da ilha e no segundo inclui os pontos situados na parte setentrional. Ambas as situações, as águas tornam-se mais “pesadas” à medida que a latitude aumenta. Esta evolução isotópica está de acordo com o padrão de circulação das massas de ar húmidas e das próprias nuvens, seguindo trajectórias NE-SW.

À medida que as massas de ar avançam para o interior da ilha, observa-se um depleção de $\delta^{18}\text{O}$ de 0,04 ‰ / km até atingir as áreas culminantes do Pico da Antónia. A partir desta zona, o empobrecimento é mais acentuado, da ordem de -0,09 ‰ / km.

A amostra ST_1 apresenta maior empobrecimento em isótopos pesados e corresponde, simultaneamente, ao ponto de água mais meridional, ou seja, com menor latitude. Este fato poderá estar relacionada com o fenômeno de destilação de Rayleigh.

Tratando-se de uma nascente (ST_1), é de admitir que a recarga ocorra em zonas relativamente afastadas da costa, estando associada à formação do Pico da Antónia, na parte central da ilha, onde o relevo proporciona precipitações mais abundantes e onde as formações geológicas são favoráveis à infiltração e armazenamento de água.

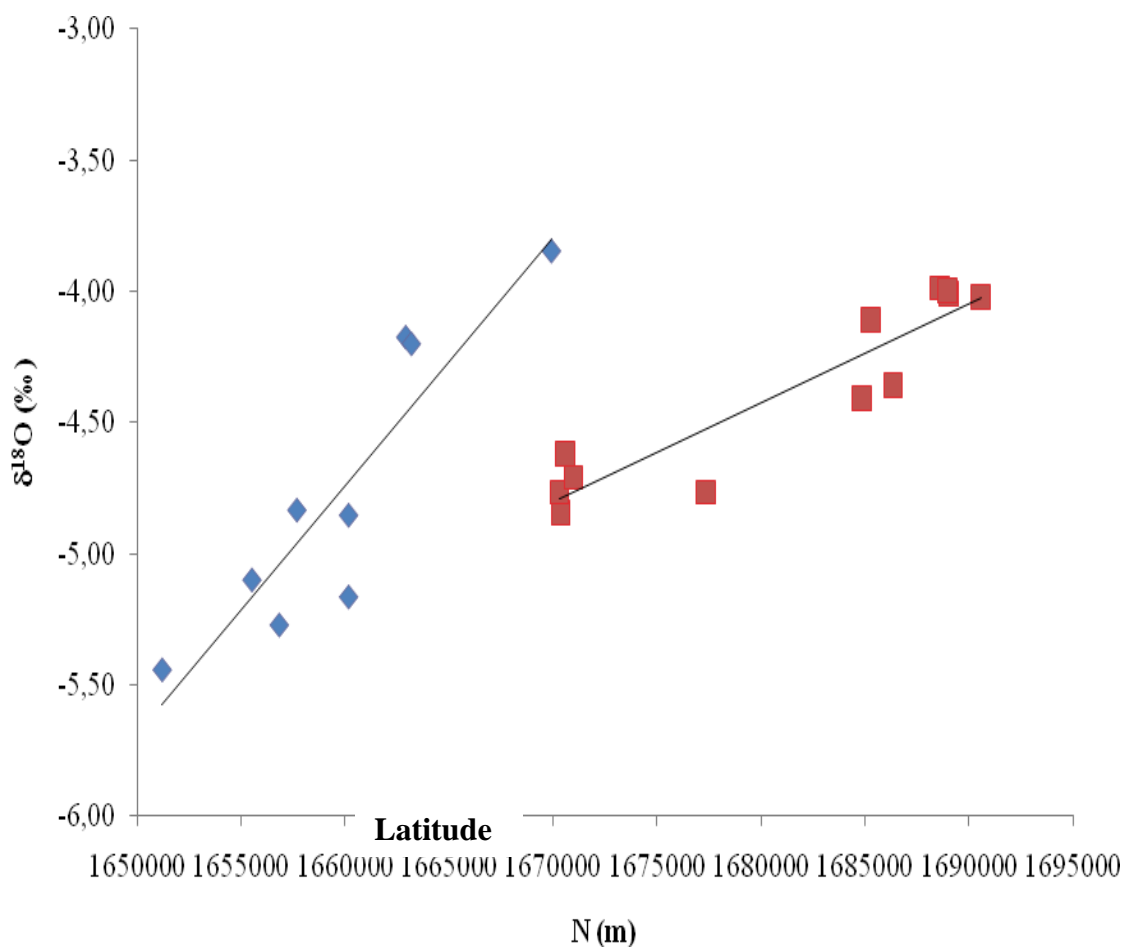


Figura 6.9. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas em função da latitude.

CAPÍTULO 7 – ESTRATÉGIAS DE EXPLORAÇÃO E CONTROLE DOS AQUÍFEROS COSTEIROS

CAPÍTULO 7

ESTRATÉGIAS DE EXPLORAÇÃO E CONTROLE DOS AQUÍFEROS COSTEIROS

7 – ESTRATÉGIAS DE EXPLORAÇÃO E CONTROLE DOS AQUÍFEROS COSTEIROS

O conhecimento gerado pela comunidade técnica e científica nacional, em particular nas últimas décadas, constitui uma sólida base a partir da qual se poderão definir, com segurança os rumos do futuro. Conscientes do contexto de crescente incerteza, exige-se uma conjugação de esforços dentro e fora do setor da água, como;

➤ *PLANEJAMENTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS COSTEIROS*

A exploração de águas doces em aquíferos costeiros deve ser considerada como um componente da gestão integrada dos recursos hídricos, pois são sistemas em equilíbrio dinâmico, isto é, estão intrinsecamente dependentes dos regimes de exploração e de recarga, que por natureza são variáveis, e como tal devem ser analisados numa perspectiva integral. Para garantir a utilização sustentável dos aquíferos costeiros é necessário implementar um adequado planejamento e uma exploração racional, preferencialmente otimizada, que considere os processos hidrogeológicos e as razões antrópicas de natureza econômica, ambiental e social.

A gestão racional e otimizada dos recursos hídricos em zonas costeiras obrigam o desenvolvimento de estratégias integradas, isto é, que todos os componentes dos diversos sistemas de abastecimento de água sejam tratados conjuntamente, desde as distintas origens (subterrânea, superficial, pluvial) até ao aproveitamento de águas residuais tratadas para a recarga dos aquíferos. Estes planos e subsequentes programas de atuação são especialmente necessários na ilha de Santiago, sujeita a carência sazonal de águas e a dificuldades derivadas de secas prolongadas.

O melhor procedimento para se evitar os efeitos nefastos da salinização envolve o conhecimento da situação atual de um aquífero, para o que é conveniente recorrer à monitorização e a cálculos matemáticos/numéricos, para projetar a evolução do fenómeno permitindo, desta forma, detectar em tempo os sinais de degradação da qualidade das águas e atuar sobre suas causas, entre as quais estarão previsivelmente a incorreta implantação da captação, a sobre-exploração excessiva e desregada.

A definição dos locais de captação de águas subterrâneas costeiras doces deve também se constituir numa parcela das políticas integradas de planejamento e gestão de território. A concessão de licenciamentos deve prevenir para os efeitos nefastos da impermeabilização no escoamento.

Da aplicação de modelos de gestão devem resultar políticas que satisfaçam os diversos usuários em termos de quantidade solicitada ou aceitável, qualidade que no mínimo respeite as normas em vigor e em adequadas condições técnicas. Na busca pela excelência devem entrar diversos critérios, desde a minimização de custos de ‘produção’ até o controle da qualidade da água na origem, e o impacto da utilização de águas salobras/salgadas e sua rejeição proveniente do tratamento poderão provocar no ambiente e na agricultura. Os aspetos ambientais, que até há bem pouco tempo atrás eram frequentemente negligenciados, devem ser cuidadosamente

considerados, como a preservação das condições de vida de vegetais e animais que vivem nos locais onde são lançadas a água salobra extraída e a salmoura residual. Também deverão ser consideradas nos processos de decisão, as consequências sociais da deterioração da qualidade da água pela intrusão salina.

O controle da qualidade da água num aquífero costeiro pode obrigar à imposição de limites para a extração de água doce. Os métodos de gestão, associados a modelos de simulação, podem requerer restrições nas concentrações no aquífero, nas cotas dos níveis potenciométricos de água doce, nas vazões máximas a extrair, de modo a definir uma política de desenvolvimento sustentável que respeite o equilíbrio natural das águas.

➤ **ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DA INTRUSÃO SALINA**

Para definir a melhor estratégia para a exploração ou a reabilitação de aquíferos afetados pela salinização, é necessário definir as metas do projeto, sendo imprescindível o conhecimento:

- Dos objetivos à serem atingidos pela reabilitação, em termos de caudais de extração sustentáveis e da possibilidade legal de redistribuir as captações;
- Do volume de água doce que deve estar permanentemente presente no aquífero, e;
- Da política de reserva para emergências para compensar flutuações na recarga e extração.

Para preservar a qualidade da água subterrânea ou reabilitar os aquíferos já sujeitos à intrusão salina, poder-se-ão adotar diversas medidas, que vão desde a definição da origem dos sistemas de abastecimento de água (número, localização e complementaridade), passando pela construção de barreiras subterrâneas que impeçam a descarga de água doce no mar, até a definição de políticas para controlar a extração de água doce, o bombeamento de água salgada, o incremento da recarga.

➤ **PLANEJAMENTO E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

Obras de engenharia que requerem drenagem ou extração de água modificam o equilíbrio água-doce água-salgada e podem provocar o avanço da cunha salina ou a formação de cones salinos. São diversas as obras que podem alterar os escoamentos superficiais, a infiltração e conseqüentemente o regime de escoamento subterrâneo. Podem ser referidos, a título de exemplo, os sistemas de drenagem de águas pluviais em zonas urbanas e em estradas, as caixas e coletores de águas residuais que admitem infiltrações, construções de barragens de alvenaria, e na construção de aterros. A crescente impermeabilização das áreas urbanas costeiras e a ocupação de grandes áreas por estradas, áreas desportivas e de lazer, diminuem a infiltração de águas pluviais e as conduz diretamente para o mar, contribuindo para a redução do volume de água doce subterrânea e conseqüentemente para o avanço a cunha salina.

➤ **PROGRAMAS PARA A UTILIZAÇÃO RACIONAL DA ÁGUA**

As principais medidas que podem ser implementadas visando a utilização racional da água e a redução da extração de água doce dos aquíferos são:

- Redução de perdas, por exemplo, evitando o transbordo de reservatórios, incrementando a vigilância sobre fugas e mantendo condutas de prevenção de rupturas;
- Redução do desperdício na agricultura com a implementação de boas práticas agrícolas;
- Redução do uso, sobretudo pelos grandes consumidores e indústria, que podem diminuir a gasto de água, incrementando seu tratamento e reutilização.

Programas para a utilização racional da água poderão incluir diversas ações, como campanhas de informação junto do público, mas, sobretudo, voltadas para os grandes usuários, como unidades agrícolas e industriais. Será importante realçar a necessidade de poupar e, no caso da indústria, reutilizar a água, para que sejam evitadas situações de penúria, quando poderá ser imperiosa a adoção de normas restritivas, como a proibição de regas de jardins e de lavagens de carros. Outra forma de controlar o gasto de água poderá ser a implementação de um regime tarifário de preços sazonais ou horários, conforme é praticado no sistema de distribuição de energia elétrica.

➤ **CONTROLE DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA DOCE**

A exploração de água subterrânea na ilha de Santiago é superior à recarga (JICA, 1999), condições favoráveis para a progressiva salinização da água. Uma ação imediata para minimizar este problema seria a diminuição dos caudais de extração até que a interface água-doce, água-salgada regrida para a posição desejada. O regime de exploração deve ser controlado para que os limites da interface fiquem sempre em posições desejáveis. A redução da captação de água doce pode ser um motivo para que sejam implementados programas para a redução de gasto ou para a utilização racional da água. Entretanto, este procedimento tem como inconvenientes:

- Perda da água doce para o mar, importante para manter a posição da interface,
- O retrocesso da interface é lento, o que pode obrigar a uma redução brusca da extração,
- Esta ação exige soluções alternativas para os sistemas de abastecimentos de água, o que pode ter custo elevado e demora na implementação, e,
- O processo legal para implementar um plano de diminuição das extrações não é fácil.

➤ **A RECARGA**

O incremento da recarga contribui para o aumento do volume de água doce nos aquíferos e consequentemente para o controle da intrusão salina. Algumas medidas podem ser concretizáveis, como, por exemplo, técnicas agrícolas que facilitam a infiltração de água. No entanto, outras ações de operação do sistema de adução de água obrigam à realização de obras vultuosas e de custos elevado.

A recarga natural pode ser favorecida por uma apropriada utilização da terra (vegetação natural e seleção de culturas), por práticas adequadas de manejo do solo (orientação dos sulcos do arado e terraços que evitam o enxurro) e pela construção de açudes ou barragens. Todas estas técnicas intensificam a infiltração e evitam a erosão.

A recarga poderá ser concebida como uma operação do processo de tratamento da água por infiltração no solo, e como um meio para estabelecer uma reserva. O armazenamento de água subterrânea poderá apresentar vantagens face aos reservatórios de superfície devido ao elevado custo das barragens e à excessiva evaporação. A recarga artificial não deve ser vista apenas como um processo de reabilitação, mas também como um componente das políticas públicas racionais para a gestão contínua dos recursos hídricos costeiros. Esta medida permite o incremento da extração de água doce de forma sustentada, o controle do lençol freático e dos níveis piezométricos, na manutenção de uma reserva estratégica de água doce para responder a eventuais emergências, e a constituição de uma barreira contra a invasão da água salgada.

A água para recarga pode ter como origem as linhas de água, os sistemas de águas pluviais ou o aproveitamento de águas residuais adequadamente tratadas. Em termos quantitativos, os aquíferos são beneficiados. No entanto, há que se tomar alguns cuidados com a qualidade da água, dado que por vezes estes sistemas de drenagem apresentam elevadas concentrações de poluentes, derivados da lavagem de ruas e de ligações clandestinas de águas residuais domésticas. Naturalmente é possível construir dispositivos de tratamento adicionais e implementar algumas medidas para obstaculizar estes problemas. Uma ação imediata é rejeitar as águas das primeiras chuvas.

As principais vantagens da recarga de aquíferos relacionam-se com a ausência de grandes limitações à extração, e com o aproveitamento de toda a capacidade de armazenamento do aquífero.

Os principais obstáculos à implementação da recarga são:

- Exigir a construção de poços ou furos cujo preço pode ser elevado,
- É necessária água doce em quantidade suficiente, com qualidade adequada e de baixo custo,
- Os poços exigem limpeza frequente para que seja mantida a capacidade de injeção,
- A realização de campos ou de canais de infiltração pode ser difícil em zonas muito povoadas por ausência de áreas disponíveis ou pelo alto preço dos terrenos,
- Não se consegue reduzir a descarga de água doce no mar, e,
- O sistema de transporte da água para injeção pode ter custo elevado.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A sustentabilidade e a segurança hídricas são condicionantes ao desenvolvimento econômico e social de Cabo Verde. Enfrentar os sérios problemas de escassez de água, que atingem mais severamente aos pequenos aglomerados, é fundamental para que se continue avançando no caminho de crescimento ambientalmente responsável. A sucessão de eventos críticos dos últimos anos em Cabo Verde, e no mundo, realça a gravidade desses problemas.

Este trabalho de Dissertação identifica o problema da sobre-exploração de aquíferos em quantidades superiores a recarga, da contaminação das águas subterrâneas e propõe estratégias de forma integrada visando a prevenção e controle da poluição salina, problema que afeta particularmente a costa leste da ilha de Santiago.

De forma sintetizada, serão apresentadas sequencialmente as conclusões e recomendações de acordo com a estrutura com que foi elaborada a Dissertação.

➤ **HIDROGEOQUÍMICA, QUALIDADE E VULNERABILIDADE SUBTERRÂNEA**

De um modo geral, os fatores condicionantes das características químicas naturais da água na zona saturada são:

- ✚ Composição e volume de água que abastece o aquífero,
- ✚ Tipo de ambiente geológico e formas de ocupação,
- ✚ Características hidrogeológicas das camadas ou corpos aquíferos (como porosidade, permeabilidade, volume de armazenado, velocidade de fluxo e superfície específica da rocha),
- ✚ Características inerentes à água (pH, Eh, solubilidade, agressividade, entre outras);
- ✚ Reações químicas e biológicas que acontecem dentro do próprio sistema de fluxo subterrâneo, e,
- ✚ Características climáticas (pluviometria, evaporação, evapotranspiração e variação de temperatura).

As características litológicas do meio aquífero influenciam, de forma considerável, a qualidade química da água subterrânea; o intemperismo das rochas e a grande fragmentação dos constituintes minerais das rochas, é um fator de incremento das superfícies de contato rocha-água e, portanto, de maior solubilização.

Embora as propriedades químicas das águas subterrâneas dependam, principalmente, dos tipos de rochas que a água percola, águas associadas ao mesmo tipo de rochas podem apresentar características diferentes de uma região para outra, em função do clima e de fonte de recarga.

Relações observadas nos resultados das análises físico-químicas da água dos aquíferos na parte oriental da ilha de Santiago em Cabo Verde e respectiva avaliação foram:

1. $\text{Na}^+ \gg \text{K}^+$, uma vez que, o potássio é mais facilmente retido pelas plantas e minerais argilosos. Ambos os cátions resultam do intemperismo de feldspatos,
2. $\text{Ca}^{2+} \geq \text{Mg}^{2+}$, porque a maioria dos minerais solúveis são calcita, dolomita e gipso. O intemperismo dos silicatos deverá apresentar $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$,
3. $\text{Ca}^{2+} \geq \text{SO}_4^{2-}$, porque a principal fonte de sulfato é o CaSO_4 (anidrita, gipso, ácido sulfúrico da oxidação de pirita). O cálcio pode ser removido por precipitação ou troca iônica, e em águas ácidas o sulfato normalmente é maior do que o cálcio,
4. $\text{Cl}^- \geq \text{Na}^+$, a fonte principal do cloreto é o NaCl , e o sódio está associado a silicatos e troca iônica. Quando a relação é inversa, surge remoção também por troca iônica,
5. $\text{HCO}_3^- \gg \text{SiO}_2$, indica preferencialmente o intemperismo de carbonatos,
6. $\text{Ca}^{2+} \geq \text{Na}^+$, pode sugerir, também, o intemperismo de carbonatos, exceto quando existe troca iônica.

Na ilha de Santiago, o ânion mais abundante nas águas subterrâneas é o bicarbonato, seguido do cloreto, sulfato e nitrato ($[\text{HCO}_3^-] > [\text{Cl}^-] \geq [\text{SO}_4^{2-}] > [\text{NO}_3^-]$).

Genericamente, as águas são ligeiramente ácidas e próximas da neutralidade, variando em função das formações hidrogeológicas, bastante mineralizada e com concentrações apreciáveis de cálcio e de magnésio.

➤ *FÁCIAS HIDROQUÍMICAS E RAZÕES IÔNICAS*

Os resultados das análises químicas foram representados no diagrama de Piper, mediante uma indicação percentual em meq/L dos cátions e ânions principais. As águas subterrâneas apresentam fácies hidroquímicas vários, com predominância do sódio como cátions dominantes e bicarbonatos, cloretos e sulfatos como ânions com maior frequência.

Foram observados fácies hidroquímicas do tipo:

1. Bicarbonatada – Sódica (HCO_3^- -Na) ou Sulfatadas ou Cloretadas Sódicas,
2. Sulfatadas ou Cloretadas Sódicas (SO_4^{2-} - Na) ou (Cl^- – Na) ou Sulfatadas ou Cloretadas Cálcicas ou Magnesianas, e,
3. Bicarbonatada Sódica (HCO_3^- -Na) ou Sulfatadas ou Cloretadas Cálcicas ou Magnesianas.

A concentração média dos ânions e dos cátions para as águas da zona leste da ilha de Santiago resulta na seguinte relação:

- $rCl > rHCO_3 > rSO_4 > rCO_3$
- $rNa > rCa > rMg > rK$

Na distribuição das principais fáceis hidroquímicas no diagrama de Piper, constata-se a existência de **águas mistas**. A lixiviação através do solo tem sido identificada como a maior responsável pela ocorrência de agroquímicos na água subterrânea onde o nível estático é pouco profundo e os perfis naturais do solo podem atenuar ativamente a passagem de poluentes.

A água que se infiltra e se torna subterrânea possui uma dinâmica própria e, de acordo com o tipo de aquífero, pode sofrer constante recarga (como de chuvas e corpos de água), bem como interferência direta e indireta das ações do Homem.

É importante ressaltar que o entendimento da poluição de águas subterrâneas por lixiviação requer o conhecimento da relação entre vários fatores: uso e características do solo, clima, propriedades do aquífero e a combinação mobilidade/persistência que determina se o composto será degradado durante seu tempo de permanência na zona não-saturada do solo.

Na análise e avaliação da possibilidade de mistura de águas, observou-se a seguinte razão:

- $Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Ca^{2+})$ -- ALTA
- $Na^+/(Na^+ + Cl^-)$ ---- BAIXA e com íons principais o cálcio e bicarbonato, o que sugere a seguinte conclusão: dissolução da dolomita e calcita e precipitação do cálcio ou da água do mar.

Uma das características da intrusão salina é comumente o enriquecimento do cálcio acima do valor da concentração na água do mar. Razões altas de Ca^{2+}/Mg^{2+} e de $Ca^{2+}/(HCO_3^- + SO_4^{2-}) > 1$ (Anexo C) são indicadores da chegada da intrusão marinha, embora águas salinas com valores altos de Ca^{2+} possam ter outras origens.

Na falta de dados do parâmetro Br^- impossibilitou a utilização da razão Cl^-/Br^- considerado como um traçador confiável, sobre a fonte de salinização, devido ao fato de que, o Cl^- e Br^- serem conservativos (isto é, não reagem com a matriz do aquífero), exceto na presença de quantidade muito grande de matéria orgânica.

O IQA (Índice de Qualidade das Águas) não foi calculado por falta de informações principalmente dos parâmetros; DQO₅, e do Oxigênio Dissolvido, OD.

Quase todos os valores obtidos sugerem que os poços artesianos da costa oriental da ilha de Santiago estão sob influência marinha direta. Os altos valores encontrados para a razão iônica reforçam essa ideia, sem que isso necessariamente signifique que já estivessem comprometidas.

➤ ANÁLISE ISOTÓPICA

O estudo dos isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde, permitiu identificar variações isotópicas espaciais, tanto em latitude, como em longitude e relacionar esta variabilidade com o fracionamento isotópico da água das chuvas e com fenômenos de evaporação durante e após os eventos pluviosos.

Não foi identificado efeito direto da altitude sobre a composição isotópica das águas subterrâneas, observou-se; uma certa correlação entre os teores isotópicos e a longitude dos pontos coletados, uma certa interdependência entre os teores isotópicos com a C.E., das águas subterrâneas junto a costa o que pode ser explicado como fenômeno de intrusão salina. No entanto, esta ligeira tendência de enriquecimento em isótopos pesados e aumento da mineralização deixa de se verificar para teores de $\delta^{18}\text{O}$ de, aproximadamente, -4,00‰.

As amostras de água subterrânea coletadas longe da costa são pouco mineralizadas e empobrecidas em isótopos pesados. Desta forma, a variabilidade isotópica das águas subterrâneas só intervêm no fenômeno de intrusão marinha nos poços artesianos com pouca profundidade e junto ao litoral.

As captações foram exclusivamente nos poços tubulares sem o conhecimento da profundidade e dos níveis produtivos. A cota como a localização dos pontos de água pode não ter uma relação direta com a profundidade das águas subterrâneas.

A distribuição espacial dos teores isotópicos nas águas subterrâneas mostra um empobrecimento em isótopos pesados no sentido NE-SW, ou seja, segundo um gradiente perpendicular ao alongamento da ilha. Este fato sugere que a progressão das massas de ar húmidas que originam a precipitação responsável pela recarga dos aquíferos se faz também predominantemente naquele sentido, o que está de acordo com a distribuição espacial da precipitação.

Os fatores tais como, o clima, a geologia, a hidrogeologia isotópica indicam que a recarga do aquífero ocorre principalmente na parte central da ilha, e o escoamento subterrâneo é divergente em direção à linha de costa.

Os teores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -5,44‰ e 0,98‰ e os de $\delta^2\text{H}$ estão compreendidos entre -34,8‰ e 5,0‰.

- **INTRUSÃO SALINA**

A poluição salina em aquíferos pode ter diversas origens, entre as quais se encontram a intrusão marinha e a mistura com águas salgadas fósseis. A extração da água doce que confronta com massas de água salobra/salgada deve ser precedida pela adoção de um conjunto de procedimentos de modo que as captações não sejam afetadas pela intrusão salina. Estas medidas prévias relacionam-se com um adequado planejamento das captações e com a definição de um regime de exploração dos aquíferos que seja racional e sustentável. Um aquífero costeiro sem exploração, lança no mar grande quantidade de águas doces, em natural equilíbrio entre as águas doces continentais e as águas salgadas do mar. Qualquer obra realizada com o objetivo de captar as águas doces provoca uma alteração dessas condições, levando a um novo equilíbrio da interface água doce/água salgada. Qualquer que seja o procedimento de controle da intrusão salina, ele implicará em custos para manter o equilíbrio sem reflexos ambientais e sociais negativos.

Com o aumento de extração de águas doces subterrâneas de aquíferos há o natural avanço da cunha ou cone salino, verificado na costa leste da ilha, com o conseqüente abandono dos poços afetados e a execução de novos em locais mais afastados do mar.

Não é conhecido nenhum programa de reabilitação de aquíferos afetados pela poluição salina que tenha sido concretizado nos últimos anos. Com a constituição da barragem de Poilão na parte montante, os drenos de captação foram afetados à jusante, de tal modo que urge a necessidade de se construir emergencialmente novos poços e respectivos sistemas adutores à montante da barragem. Esta é a solução tradicional e mais frequente para captações de sub-leito vulneráveis à poluição salina, que não inclui qualquer remoção de sais no tratamento da água. A barragem foi construída com regime de descarga não definido de tal forma que permite o avanço da salinização nos aquíferos adjacentes.

Assim, é necessário estabelecer um plano para a utilização racional do aquífero, baseado em estudos de caracterização do aquífero e na implementação de seu monitoramento, para que seja possível acompanhar a evolução do teor de sais ao longo do tempo. Na análise das alternativas de gestão é necessário considerar a quantidade disponível de águas, sua qualidade e sua evolução no tempo.

Um caso evidente de progressão da salinização ocorre na Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca. Os documentos estatísticos dos Serviços Autônomos de Água e Saneamento do Concelho de Santa Cruz (2010) relativos aos seus poços indicam que a intrusão tem progressivamente avançado para o interior, agravando-se em especial nos períodos de seca. Este órgão chegou a desenvolver projetos para a implementação de recarga artificial através da injeção de água em poços, mas eles nunca se concretizaram.

Com o sistema de abastecimento público de água através da dessalinização da água marinha no Concelho de Santa Cruz, espera-se alteração na exploração das águas doces subterrâneas e eventual recuo da intrusão marinha. A elaboração dos planos de recuperação das bacias hidrográficas da costa leste da ilha de Santiago, constitui uma excelente oportunidade para a caracterização atualizada dos aquíferos afetados pela poluição salina.

➤ **ÁGUA PARA A AGRICULTURA – BARRAGEM DE POILÃO**

O uso da água para a agricultura inclui, basicamente, o consumo para os animais domésticos e a irrigação. Para a irrigação, os parâmetros de qualidade mais importantes são a concentração de sais solúveis e a concentração de sódio em relação a outros cátions que devem ser associados a fatores como a composição do solo, estrutura e permeabilidade.

Uma classificação da água da barragem de Poilão (outubro de 2009), para fins agrícolas em função do RAS e da C.E. proposta pelo U.S.S.L. é a seguinte:

Em relação ao perigo de sodificação do solo, todas as amostras fornecem índice S_1 , ou seja, não oferecem risco de acumulação de quantidades nocivas de sódio. Quanto ao risco de salinização foi do tipo C_2 e C_3 , caracterizados como médio e alto.

O termo salinidade se refere a existência de níveis de sais no solo que possam prejudicar de maneira economicamente significativa o rendimento das plantas cultivadas.

A sensibilidade à existência de maiores ou menores teores de sais no solo é uma característica de cada tipo de planta; quando absorvidos e acumulados nos tecidos, com concentrações suficientemente altas, provocam danos e reduzem em seus rendimentos. Algumas plantas toleram concentrações altas, como a cevada e o algodão, enquanto outras, como o feijão e a cenoura, são bastante sensíveis, mesmo a teores baixos. A magnitude dos danos depende do tempo, concentração, tolerância da cultura e volume de água transpirada.

Na avaliação sobre as possibilidades da utilização de águas subterrâneas para irrigação, além da qualidade química das águas, outros fatores devem ser levados em consideração, a exemplo de: textura e estrutura do solo, tipo de manejo, método de irrigação empregado e tipos de culturas.

➤ **POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO**

As características naturais das águas associadas a um tipo de rocha e/ou solo podem ser modificadas em função do tipo de ocupação do meio físico, que pode levar a contaminação do recurso hídrico.

A degradação da qualidade das águas tem sido verificada, sobretudo, junto a costa leste da ilha de Santiago. Deve-se a alguns fatores relacionados, dentre outros, à prática inadequada de deposição de resíduos, a lixiviação de fertilizantes inorgânicos usados para a adubação do solo, aumentando significativamente a concentração dos compostos azotados na qualidade da água, constituindo um dos motivos de preocupação (PINA, 2005).

A presença de alguns íons pode estar associada a causas naturais (interação rocha-água), como no caso do cloreto, sulfato, sódio, ferro e manganês. Altas concentrações de elementos metálicos presentes como constituintes maiores, (Ca, Mg, e Na) são responsáveis pela salinidade das águas subterrâneas e comprometem o uso da água para o consumo humano e industrial.

A poluição, representa um conjunto de ações e interferências diretas e indiretas (naturais ou antrópicas) sobre a qualidade da água de um manancial. Uma água subterrânea é dita poluída quando apresenta uma alteração qualquer na sua qualidade, decorrente de influências antrópicas com os teores a atingirem os valores máximos definidos pelos padrões de potabilidade adotados (MESTRINHO, 2006).

A contaminação caracteriza-se como a introdução na água de elementos, compostos ou microorganismos que possam prejudicar a saúde do homem ou dos animais. Uma água subterrânea é dita contaminada quando os teores das substâncias introduzidas ficam acima dos valores máximos permitidos pelos padrões de qualidade para o consumo humano, industrial ou agrícola (MESTRINHO, 2006).

Os altos percentuais de contaminação por coliformes totais e/ou fecais em água dos poços artesianos foram registados nos meses mais chuvosos, refletindo situação de risco em que estão localizados a maioria dos pontos de água, nas áreas que apresentam uma grande densidade urbana e demográfica não possuindo uma rede coletora de esgotos capaz de verter todo o efluente produzido para tratamento adequado.

A população, recorre frequentemente ao uso das fossas sépticas e sumidouros, valas negras como destino final para seus dejetos, que eventualmente podem percolar pelo solo, atingindo os lençóis e aquíferos, constituindo outro motivo de preocupação com o crescente índice de contaminação bacteriológica.

➤ **EROSÃO HÍDRICA**

Os processos de erosão hídrica em Cabo Verde são os mais marcantes da dinâmica atual das vertentes, pois são os mais comuns e que afetam áreas extensas durante a curta estação úmida de três meses. A ocorrência de episódios chuvosos concentrados num curto espaço do tempo e com uma evidente irregularidade espacial permitem uma acentuada erosividade das precipitações, marcada por uma forte irregularidade regional.

A forte variabilidade das formas de relevo, a diversidade da natureza das unidades geológicas e a multiplicidade de ocupação do solo favorecem condições de erodibilidade muito contrastadas no espaço.

A costa leste da ilha de Santiago, onde se localiza a bacia hidrográfica da Ribeira Seca e a vertente dos principais vales da bacia hidrográfica da Ribeira dos Picos, onde, o declive é mais acentuado e predominam setores das vertentes de traçado côncavo, a que se associa pontualmente a mais elevada intensidade pluviométrica.

Os processos de erosão hídrica, os mais ativos, são os que afetam áreas mais extensas, na dependência de condicionantes de vulnerabilidade do meio e de ações antrópicas.

As condicionantes humanas mais importantes são os sistemas de utilização e tecnologia do solo, resultantes da implantação de medidas de conservação dos solos e da água. Estas práticas agrícolas e medidas de conservação transformam a morfologia e consequentemente as condições de sedimentação de materiais ao longo das vertentes, favorecendo os de processos de erosão hídrica.

CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINA, A.P.S.A. – 2011. Fundamentos Hidrogeoquímicos aplicados na bacia hidrográfica de Santa Cruz, ilha de Santiago – Cabo Verde, como instrumentos para a gestão de recursos hídricos.

CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES C.A.M., SERRALHEIRO, A.M., MACEDO, J.R., CRAMEZ, P., SOUSA, A., MENDES, F. & GOMES, R.A.D., 1971. Carbonatitos de Santiago (Cabo Verde). Actas do 1º Congresso Hispano-Luso- Americano de Geologia Económica, Lisboa, tomo II, secção 1: 563-576.

ALVES, C.A.M., MACEDO, J.R., SILVA, L.C., SERRALHEIRO, A., & FARIA, A.F.P., 1979. Estudo Geológico, Petrológico e Vulcanológico da Ilha de Santiago, Garcia de Orta, Ser. Geol., Lisboa, 3 (1 -2): 47 -74.

AMARAL, I., 1964. Santiago de Cabo Verde. A Terra e os Homens, Memórias da Junta de Investigações dfo Ultramar, 2ª ser. nº 48, Lisboa.

AMARAL, I., 1974. Alguns aspectos geomorfológicos do litoral da ilha de Santiago (arquipélago de Cabo Verde). Sep. Garcia de Orta, Ser. Geogr., Lisboa, 2 (1): 19-28.

AMARAL, I., 2004. Ler Cabo Verde: Notas e reflexões. Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia, XXXIX (78): 87-98.

APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 20ª e 21ª ed. Washington.1998

ASSUNÇÃO E GARRIDO (1953) ASSUNÇÃO, C.F.T.D. & CANILHO, M.H.S., 1969-1970. A petrografia da ilha de Maio e suas relações com a petrografia do arquipélago de Cabo Verde. Separata do Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências, 11.º (2): 161-191.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na irrigação. Campina Grande PB. UFPB. Trdução de Gheyi, H. R.; Medeiros, J, f.; Damaceno, F.A.V., 1991. 218P.

BARRY et al. (2001). Plano de Desenvolvimento Hídrico da Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca (PDH).

BLETRÁN, J.M. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural water management*, v.40, p.183-194, 1999.

CABRAL, J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P. C; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COSTA, W. D. (organizadores), 2004. Água Subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento. *Tópicos Especiais em Recursos Hídricos*, Vol.4, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE;

CABRAL, J.J.S.P. e PAIVA, A.L.R., 2004. Água subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. Capítulo 4 – Salinização de Aquíferos Costeiros: Investigação e Modelagem, Recife: Ed Universitária da UFPE.

CAMPOS, R.C., & DEMATTÊ, J.A.M., 2004. Cor do solo: Uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28 (5): 853-863.

CAUDURO, F.A., DORFMAN, R. (1991), *Manual de Ensaios de Laboratório e de Campo para Irrigação e Drenagem*, PRONI: IPH-UFRGS, 216 páginas. Porto Alegre.

CLARK, I.; FRITZ, P. (1997) – *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328 p.

CLESCERLL, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater*. Washigton: EPA/APHA, 2003.

COPLEN, T. B. (1994) – Reporting of Stable Hydrogen, Carbon and Oxygen Isotopic Abundances. *Pure Appl. Chem.*, 66: 273-276.

COPLEN, T. B.; Herczeg, A.; Barnes, C. (2001) – Isotope Engineering-Using Stable Isotopes of the Water Molecule to Solve Practical Problems. In: Environmental Tracers in Subsurface Hydrology (P. Cook and A. L. Herczeg, Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston: 79-110.

CORREIA, E., & COSTA, F. L., 1996. Notas preliminares da missão de geografia física a Cabo Verde em 1993: Santo Antão, S. Vicente e Santiago. Garcia de Orta, Sér. Geog., Lisboa, 15 (1): 79-86.

COSTA, F.L., 1996. COSTA, F.L., 1996. Processos erosivos actuais na bacia da Ribeira Seca (Santiago Oriental - Cabo Verde). Garcia de Orta. Série Geografia, vol. 15 (1): 29-34.

COSTA, W. D. (coordenador), 2002. Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes – Projeto HIDROREC II. Secretaria de Recursos Hídricos, Governo do Estado de Pernambuco/ANA, Proágua, Recife, PE;

COSTA, F.L. (2006). Impactes do uso do solo nos processos erosivos e nas formas de vertente em Cabo Verde. Paper presented at the 1ª Conferencia Lusófona sobre o Sistema Terra – CluSTer, Lisboa.

COSTA, J.V.B.D., 2004. Caracterização e constituição do solo (7.ª ed.). Lisboa: Serviço de Educação e Bolsas. Fundação Calouste Gulbenkian. S. A.

CRAIG, H. 1961a – Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen- 18 in natural Waters. Science, (New York), v. 133, n. 3467, p.. 1833 - 1834.

CRAIG, H. 1961b – Isotopic variations in meteoric Waters. Science, (New York), v. 133, n. 3465, p.. 1702 - 1703.

CRUCIANI, D.E. Drenagem agrícola para recuperação dos solos afectados por sais. In: SIMPÓSIO “Manejo e Controle da Salinidade na Agricultura Irrigada”. Campina Grande: UFPB, 1997.

CUSTODIO, E., 1987. Groundwater problems in coastal áreas. Capítulo 2, UNESCO, Belgica, ISBN: 92-3-102415-9.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. - Hidrologia Subterrânea. 2 ed., Barcelona (Espanha), Ediciones Omega, 2350p, 1996.

Decreto n.º 82/87 de 1 de Agosto de 1987: Estabelece as normas destinadas a evitar a obstrução.

Decreto n.º 75/99 de 30 de Dezembro de 1999: Define o regime jurídico de licenças ou concessões de utilização dos recursos naturais.

DIELEMAN, P.J. et al. Elementos para el projecto de drenaje. Roma, FAO, 1980. 52p. (Estúdios FAO: Riego e Drenaje, 38).

DIELEMAN, P.J.; TRAFFORD, B.D. Ensaio de drenaje. Roma, FAO, 1980. 52p. (Estúdios FAO: Riego e Drenaje, 28).

DINIZ, A. C., & MATOS, G.C., 1986. Carta de Zonagem Agro-Ecológica e da Vegetação de Cabo Verde. I – Ilha de Santiago. Garcia de Orta, Sér. Bot., Lisboa, 8 (1-2): 39-82.

DUNCAN, R.A. & JACKSON, E.D. 1977: Geochronology of basaltic rocks recovered by DSDP Leg 41, eastern Atlantic Ocean. In: Lancelot et al. (Eds.): Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 41. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1113–1118.

FAO/UNESCO, 1988. Soil map of the world: revised legend. World Soil Resources Report 60. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome: 119pp.

FARIA, F.X. 1970. Os solos da ilha de Santiago (Arquipélago de Cabo Verde). Lisboa: Estudos, ensaios e documentos, 124. Junta de Investigações do Ultramar.

FENZEL, N. 1988. Introdução à Hidrogeoquímica.

FETH, J.H., and others, 1965, Preliminary map of the conterminous United States showing depth to and quality of shallowest ground water containing more than 1,000 parts per million dissolved solids: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas 199, scale 1:3. 168,000, two sheets, accompanied by 31-p, text.

FETTER, C.W. (1993), Contaminant Hydrogeology Macmillan Publishing Company, 458 pages, New York.

FRENKEL, H., 1984, Reassessment of water quality criteria for irrigation. In: Sheinberg, I. & Shalhevet, J., Soil salinity under irrigation. Springer-Verlag, Berlin, 143-72.

HEM, J. D., 1985. Study and International of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water-supply paper 2254, 3ª edição.

INE - Instituto Nacional de Estatística, 2000. Recenseamento Geral da População e Habitação, Praia.

I.N.G.R.H., 1999. Síntesis Geo-hidrologica de Cabo Verde. (Relatório). Praia, Santiago, Cabo Verde: Instituto Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos. Cooperação Espanhola.

INGRH (2000) Visão Nacional da Água, a Vida e o Ambiente, Praia, Cabo Verde.

INGRH (junho, 2001) Plano de Desenvolvimento Hidráulico da Bacia Hidrográfica da Ribeira Seca.

JONES, B. F., VENGOSH, A., ROSENTHAL, E., e YECHIELLI, Y., 1999. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices. Chapter 3: Geochemical Investigations. Kluwer Academic Publishers.

KOKUSAI KOGYO Co, LTD, JICA, INGRH (1999) The Study of Ground Water Development in Santiago. Vol.1.

LEEMANS – SANDERSON, S. 1996. Des Bonnes pratiques Agricoles pour Limiter la pollution Azotée d'origine Agricole, tribune de L'Eau, n.º 3/95, Mai/Juin.

Lei n.º41/II/84 de 18 de Junho de 1984: Aprova o código de água.

LICHT, O.A.A., 1998. Prospecção Geoquímica. Princípios, Técnicas e Métodos. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

LIMA, A. S.; Silva, M. O.; Carreira, P. M. M.; Nunes, D. (1997) - An Isotopic Study of Groundwater in Granitic Terrains (Northwest Portugal). In Ninth Annual V. M. Goldschmidt Conference, LPI Contribution nº 971: 171-172.

LIMA, A. S. (2001) – Hidrogeologia de Terrenos Graníticos (Minho – Portugal). Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 451 p.

LOSADA-LIMA, A. (1987-88) – Algunas consideraciones sobre la brioflora macaronésica. Lazaroa, 10, 213-218.

LUCAS, L. L.; UNTERWEGER, M. P. (2000) – Comprehensive Review and Critical of the Half-Life of Tritium. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 105(4): 541-549.

MARQUES, M.M. 1983. Ensaio de cartas de declives médios para a Ilha de Santiago (República de Cabo Verde). Revista Garcia de Orta. - Serie de Estudos Agronómicos. - Lisboa.- Vol. 14, nº1/2 (1987), p. 1-7.

MARQUES, M.M., 1990. Caracterização das grandes unidades geomorfológicas da ilha de Santiago (República de Cabo Verde). Contribuição para o estudo da compartimentação da paisagem. Garcia de Orta. - Serie de Estudos Agronómicos. - Lisboa.- Vol. 17(1-2), 1990, 19-29.

MATOS ALVES, C. A. M., MACEDO, J. R., SILVA, L.C., SERRALHEIRO, A., & FARIA, A. F. P., 1979. Estudo geológico, petrológico e vulcanológico da Ilha de Santiago (Cabo Verde). Garcia de Orta, Sér. Geol., Lisboa, 3 (1 -2), 47 -74.

MAZOR, E. (1991) – *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Halsted Press, a Division of John Wiley & Sons, Inc., New York, 274 p.

MESTRINHO S. S. P. (1994), “Fundamentos da Hidrogeoquímica” In: Curso Pré-Congresso Metodologia da Avaliação de Sistemas Aquíferos, 2º Congresso Latino Americano de Hidrologia Subterrânea, 35 páginas, Santiago, Chile.

MESTRINHO S. S. P. (2006), “Qualidade das Águas” in: Águas subterrâneas e poços tubulares profundos, 1ª edição, 19 páginas.

NETTO, A., 1966. Tratamento de Águas de Abastecimento. Ed. Universidade S. Paulo.

OMS – Guidelines for Drinking – Water Quality. WHO, Genova, V.1, 128p. 1984

ONAC, B. P.; Pace-Graczyk, K.; Atudirei, V. (2008) – Stable Isotope Study of Precipitation and Cave Drip Water in Florida (USA): Implications for Speleotherm-based Paleoclimate Studies. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 44, 2: 149-161.

PINA, A.P.S.A, 2003. Qualidade da água na Ilha de Santiago – Cabo Verde. In: 6º Simpósio de Hidráulica e de Recursos Hídricos dos países de língua oficial portuguesa – cidade da Praia – Cabo Verde.

PINA, A.P.S.A, 2005. Evolução dos compostos azotados na qualidade da água na Ilha de Santiago. Cabo Verde. *Revista científica, Tecnologia de Ambiente*, 2005.

PINA, A.P.S.A, 2009. Experiência Caboverdiana como instrumento para a gestão das bacias hidrográficas de Mosteiros, Ribeira do Paúl e da Ribeira de Fajã servindo de apoio a agricultura irrigada. In: 9º Congresso da Água Lisboa – Portugal.

PINTO M.M.S.C. (2010). Cartografia geoquímica da ilha de Santiago com uma densidade de amostragem média baixa. Tese de doutoramento Universidade de Aveiro – Departamento de Geociências.

PIPER, A. M. (1994), A graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses. Transactions American Geophysical Union, number 25, pages 914-923.

PIZZARO, F. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Madrid: Agrícola Española, 1978. 521p
Plants in saline environments. New York, Springer-Verlag, 1975. 6- 24 (313p)

PIZZARRO, F., 1985, Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2.ed. Editorial Española S.A., Madrid, 542p.

RANKAMA, K. ; SAHAMA T.G. 1950. Geochemistry, University of Chicago.

REBOUÇAS, A.C. (1994) In : Fundamentos da Gestão de Aquíferos, In. Curso Pré –Congresso Metodologia da Avaliação de Sistemas Aquíferos, 2º Congresso Latino Americano de Hidrologia Subterrânea, 35 páginas, Santiago, Chile.

REBOUÇAS, A.C. (2006) Elementos de Hidrologia Subterrânea.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. The use of saline waters for crop production. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48, Rome, 133 pp, 1992.

RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160p. USDA Agricultural Handbook, 60

ROSE, A.W., HAWKES, H.E., WEBB, J.S. Geochemistry in mineral exploration New York : Academic Press. 1979. 2. Ed. 657 p.

ROZANSKI, K.; Araguás-Araguás, L. ; Gonfiantini, R. (1993) – Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In : *Climate Change in Continental Isotopic Records* (P. K. Swart, K. C. Lohman, J. McKenzie and S. Savin, Eds.), American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 78: 1-36.

ROZANSKI, K.; Froehlich, K.; Mook, W.G. (2000) – *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. Volume III: Surface Water*. UNESCO/IAEA, Paris/Vienna, 118 p.

SALOMONS, W ; MOOK, W.G., 1976. Isotope geochemistry of carbonate dissolution and reprecipitation in soils. Soil Science, Baltimore, v. 122, p. 15-24.

SERRALHEIRO, A., 1976. A geologia da ilha de Santiago (Cabo Verde). Universidade de Lisboa. Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa.

SILVA, A.S. Sistemas pressurizados de irrigação: aspersão convencional e localizada. Universidade Federal do Rio de Janeiro 1994, 257 p.

SZIKSZAY, M. (1993), Geoquímica das águas, Boletim IG-USP, Série Didática, 166 páginas. São Paulo.

TEIXEIRA A.J.S. & BARBOSA, L.A.G., 1958. A agricultura de Cabo Verde. Cartas agrícolas. Problemas agrários. Memórias, 2ª Ser., Ministério do Ultramar. Memórias da Junta de Investigação do Ultramar, Lisboa, 2: 179 pp, 77 estampas, 10 mapas.

USA SOIL TAXONOMY, 1975. Soil Survey Staff: Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.

USDA Soil Conservation Service Agricultural Handbook vol. 436, US Gov. Printing Office, Washington, DC, 1982.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO - A

Pontos de Água: localização, geologia e coordenadas.

ANEXO - A

ANEXO - A

Pontos de Água

N.º	Código	Localidade	UTM_X	UTM_Y	Tipo	Geologia	Alt (m)	Unidade	Prof. (m)
1	FT-21	Pico de Antónia	218070	1665968	Furo	PA(Sub)	370	Intermédia	50
2	FT-63	Cutelo Coelho	227753	1670027	Furo	PA(Lri)	29	Intermédia	63
3	FT-09	Macati – Ribeira Seca	232398	1666219	Furo	PA(Lri)	23	Intermédia	31,5
4	FT-23	Chã de Vaca S. Jorge	219403	1665844	Furo	CB	235	Base	43,5
5	FBE-145	Rubon Galinha Flamengo	218937	1678057	Furo	λp	15	Base	58
6	FT-47	Salτος	220450	1677468	Furo	λp	22	Base	55
7	52-81	Salτος	221915	1678502	Poço	al	36	Recente	7,88
8	FT-59	Poilãozinho Rib .Picos	226185	1672352	Furo	PA(Lri)	25	Intermédia	49,6
9	54-456	Boa Entradinha	218457	1672680	Nascente	al/PA(Sub)	143	Intermédia	9,7
10	FT-12	Jaracunda Chã Grande	226380	1671965	Furo	PA(Lri)	22	Intermédia	50
11	FT-109	Praia Baixo	232398	1666219	Furo	PA(Sub)	27	Intermédia	66
12	FBE-53	Ribeirão Chiqueiro	228117	1659204	Furo	PA(Sub)	314	Intermédia	113,75
13	FT-44	Baía	235190	1662089	Furo	PA(Sub)	17	Intermédia	52
14	FT-208	Dobe	234324	1661445	Furo	λp	59	Intermédia	43
15	FBE-56	Caiumbra S. Domingos	225525	1665963	Furo	PA(Lri)	132	Intermédia	105
16	FT-05	Ribom Bedjo Flamengos	217553	1677782	Furo	λp	86	Base	70
17	FT-81	Telha	229124	1662598	Furo	λp	140	Base	51
18	FT-13	Neta Gomes	224304	1662236	Furo	CA	260	Base	50
19	FT-14	Variante vacaria	227657	1660424	furo	Ca	187	Base	50
20	FT-40	Achada Baleia	234281	1663750	Furo	PA(Sub)	17	Intermédia	60
21	FT-42	Achada Baleia	233570	1662620	Furo	PA(Sub)	37	Intermédia	51
22	PT-29	S. Domingos Diocese	222858	1663017	Furo	CA	318	Base	29
23	FT-78	Monte Negro	230570	1668059	Furo	PA(Sub)	18	Intermédia	52
24	51-273	Boca Ribeira Principal	213873	1686514	Poço	al	29	Recente	15,37
25	SP-12	Flamengo	220531	1679773	Furo	al	38	Recente	22,35
26	56-111	Castelinho	231766	1666546	Nascente	al	25	Recente	5,1
27	56-44	Praia Baixo	232335	1665946	Poço	al	11	Recente	12,36
28	PT-31	Ribeirão Seco S. Cruz	223116	1674172	Furo	PA(Lri)	47	Intermédia	40
29	FT-39	Ribeireta S. Miguel	219311	1680507	Furo	PA(Lri)	13	Intermédia	43,5
30	FBE-144	Ribeireta S. Miguel	218981	1680371	Furo	PA(Lri)	19	Intermédia	30
31	FT-25	Achada Baleia	233089	1663982	Furo	PA(Sub)	23	Intermédia	41
32	FBE-156	Ribeirão Chiqueiro	225505	1666053	Furo	PA(Sub)	*	Intermédia	124
33	FT-62	Flam. Cabeça d'Horta	220719	1679760	Furo	λp	36	Base	42,7
34	FBE-188	Hortelã Principal	213634	1683606	Furo	PA(Sub)	75	Intermédia	91
35	55-76	Bom Pó	223013	1667463	Nascente	al	146	Recente	4,85

ANEXO - A

Pontos de Água

N.º	Código	Localidade	UTM_X	UTM_Y	Tipo	Geologia	Alt (m)	Unidade	Prof. (m)
36	SP-34	Várzea Nova	225227	1673429	Furo	CB	27	Base	45
37	FBE-26	S.Jorge INIDA	218922	1665273	Furo	CB	314	Base	111
38	FT-84	J. Teves - Canária	220366	1666642	Furo	CB	202	Base	76
39	FT-65	Pinga Mel	222155	1674943	Furo		34		45
40	51-201	Machado S. Miguel	215226	1680642	Nascente	PA(Sub)	233	Intermédia	*
41	52-29	Ponta Verde S. Miguel	219102	1681950	Poço	al	34	Recente	8,4
42	56-114	Moia-Moia	236735	1660336	Poço	al	14	Recente	*
43	FBE-157	Portal Capela	232578	1661869	Furo	PA(Sub)	81	Intermédia	34,75
44	52-33	Ribeirão Boi	220187	1674250	Nascente	lp	73	Base	*
45	FT-198	Pinga Mel	222797	1674994	Furo	PA(Lri)	21		19
46	55-204	Jaracunda	*	*	Poço	PA(Lri)	*	Intermédia	17,3
47	52-42	Ribeira Seca	*	*	Poço	PA(Lri)	*	Intermédia	11,08
48	FT-67	Ribeirão Boi	*	*	Furo	PA(Lri)	*	Intermédia	63
49	55-199	Godim	*	*	Poço	PA(Lri)	*	Intermédia	8,1
50	55-245	Ribeira dos Picos	*	*	Poço	al/PA(Sub)	*	Intermédia	20,89
51	56-88	Baía	235416	1662376	Poço	al	17	Recente	4,44
52	FBE-169	Ribeira Seca Paulado	226573	1670753	Furo	PA(Lri)	38	Intermédia	54

- Sem registos no banco de dados do INGRH. A maior parte utilizada para rega e associações de agricultores.

ANEXO - B

Resultados das análises físico-químico

ANEXO - B

ANEXO - B

Resultado das análises físico-químicas

Data	Amost.	CE	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	N-NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ba ⁺²
19/06/03	FT-21	1351	7,1	566	85,1	82	54	64	243	25	4,3	16,9	-
9/12/03		880	6,6	362	92,2	27	47	75	98,4	13	11	8,6	-
17/08/05		1369	7,1	437	112	54	65	76	198	17	9,9	16,2	-
24/06/03	FT-63	1030	7,1	164	141	40	46	72	52	6	11,2	22	0,9
13/12/03		1150	7,0	217	156	55	51	45	118	11	10,9	15	-
17/08/05		1047	6,8	231	191	61	66	72	85	9	12,1	18	-
26/06/03	FT-09	1020	7,1	156	142	36	40	35	97	8	13,3	16	0,2
13/12/03		1260	7,0	217	145	46	51	51	98	10	12,11	14	0,4
17/08/05		975	7,2	176	166	48	42	36	101	11	13,2	19	0,2
17/08/05	FT-23	1076	7,3	287	178	56	38	32	108	9	13,9	37	0,3
19/06/03		1041	7,2	312	106	64	31	40	166	18	12,11	16	-
29/11/03		1101	7,0	232	113	55	50	29	79	12	6,06	11	-
17/08/05	FBE-145	1189	7,1	323	193	84	22	26	97	8,5	12,17	24	0,4
10/06/03		1380	7,3	305	227	76	30,1	22	243	47	1,21	15,3	-
29/11/03		1202	7,2	298	170	36	44	17	167	10	4,85	16,4	-
17/08/05	FT-47	1454	6,8	238	227	57	37	25	213	18	7,12	12,2	-
01/08/03		1622	7,2	267	272	36	81,4	69	113	19	8,02	30	0,6
29/11/03		1315	7,1	232	285	51	74	56	132	15	9,7	26	0,8
19/06/03	52-81	7300	7,0	110	2300	137	454	572	389	37	6,1	9	-
07/12/03		2760	7,2	100	758	39	122	204	187	29	9,56	7	-
27/06/03		913	7,0	315	113	26	46	72	87	12	8,55	18	-
13/12/03	FT-59	950	7,1	266	156	39	41	71	78	11	7,98	15	-
17/08/05		1389	7,1	328	154	34	49	77	84	13	9,03	17	-
11/06/03	54-456	1369	7,3	183	199	64	56,4	58	97,3	17	8,5	19	-
07/12/03		1159	7,2	247	215	59	46	93	117	19	10,1	16,4	-
27/06/03		1311	7,1	176	229	23	65	83	87	6	7,1	23	0,3
13/12/03	FT-12	1440	7,1	212	329	36	71	85	111	12	6,3	15	0,4
18/08/05		1523	7,0	198	226	27	63	78	98	11	5,5	17	-
10/06/03	FT-109	7968	7,1	253	2641	67	312	789	452	19	6,16	21	-
13/12/03		8180	6,8	332	2715	85	396	880	592	21	7,25	14	-
18/08/05		9820	6,9	349	2888	92	377	893	623	20	8,18	17	-
01/08/03	FBE-53	739	7,2	161	85,7	19,1	31	38	98	8	18,6	16,9	0,6
09/12/03		610	6,9	242	70,2	45,5	29	37	146	11	15,9	13,1	0,5
05/04/05		815	7,1	167	63,2	27	22	31	112	13	9,5	21	0,3
17/08/05		723	7,2	129	75	31	33	26	86	9	9,1	18	0,5
10/06/03	FT-44	2060	7,1	164	549	76	66	75	292	17	5,45	15	-
02/12/03		2038	7,3	193	538	39	72	56	286	25	4,76	15	-
15/08/05		2217	7,2	219	611	41	84	88	365	32	6,13	19	-
11/06/03	FT-208	1263	7,2	159	267	36,4	40	75	156	17	8,48	17	-
02/12/03		1260	7,3	188	266	27	45	46	158	10	6,07	19	-
17/08/05		1318	7,1	211	259	32,7	48	59	149	15	7,94	15	-
11/06/03	FBE-56	1223	7,1	295	217	38,5	38	76	77	4	4,02	27	0,7
02/12/03		1240	7,0	315	259	29	25	91	164	9	2,49	8,9	0,67
17/08/05		1265	7,2	300	237	31,6	33	84	99	7,5	3,18	31	0,5

Nota: Todos os dados são em mgL⁻¹ com exceção da CE que está em µS/cm.

Valores em negrito, considerados superiores ou no limite da norma da OMS situação de perigo.

ANEXO - B

Resultado das análises físico-químicas

Data	Amost.	CE	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	N-NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ba ⁺²
10/06/03	FT-05	1218	7,2	293	251	37	19	38	153	12	3,63	18	-
29/11/03		769	7,3	300	93	36,4	36	22	89	12	4,0	7,6	-
18/08/05		1127	7,1	372	167	46,3	21	23	95	11	5,03	13,4	0,2
10/06/03	FT-81	1282	6,9	288	273	38	51	86	85	8	11,75	25	0,5
29/11/03		1270	7,1	227	270	82	48	42	158	11	11	13	0,3
18/08/05		1135	7,3	189	212	49	72	49	79	7	13,3	44	0,6
19/06/03	FT-13	1634	6,9	481	184	127	77,8	48	224	9,9	0	15,8	0
29/11/03		1610	6,6	613	205,6	109	47,6	17,6	394	11	3,63	11,7	-
18/08/05		1815	7,2	333	268	120	61	50	187	12	6,8	13,8	-
10/06/03	FT-14	1557	6,8	193	241	91	75	67	136	7	14,5	15,8	-
29/11/03		1560	7,0	220	239	82	70	37	98,4	9	17,0	12,2	-
18/08/05		1447	6,9	185	217	87	69	41	100	12	13,3	17,5	-
10/06/03	FT-40	1394	7,2	193	313	37	63	82	93	6	3,58	23	-
29/11/03		1400	7,1	217	316	27,3	61	45	148	11	4,85	13	-
18/08/05		1432	7,0	211	336	32,7	66	72	137	13	3,19	18	-
10/06/03	FT-42	1418	7,0	207	321	47	58	80	91	9	18,78	17	-
29/11/03		1420	6,9	198	323	27	62	50	158	9	4,85	13	-
18/08/05		1476	7,1	217	316	43	61	65	121	11	11,6	15	-
10/06/03	PT-29	2110	7,0	661	127	228	44	50	438	10	4,85	21	-
29/11/03		2010	6,6	342	92	332	53	48	318	15	6,61	17	-
18/08/05		2113	6,9	455	111	256	49	52	356	13	7,1	16	-
10/06/03	FT-78	2980	7,0	190	875	84,6	140	202	151	9	9,01	30,1	0,2
29/11/03		2900	6,8	164	846	46,3	130	155	256	16	8,5	13,5	0,3
18/08/05		2885	7,1	153	912	56,4	122	146	183	13	11,2	21,5	-
10/06/03	51-273	1071	6,9	122	199	64	44	63	127	10	8,48	13	-
29/11/03		1087	7,1	210	205	36	42	61	138	20	7,27	13	-
10/06/03		2680	6,8	110	769	81,9	116	109	263	23	9,69	13	-
29/11/03	SP-12	2520	6,8	168	712	73	107	56	226	10	8,48	12	-
10/06/03	56-111	1107	7,3	178	212	72,8	37	56	146	8	3,63	19,8	-
29/11/03		1300	7,2	305	280	27,3	49	40	148	8	7,27	17,1	-
10/06/03	56-44	1535	7,0	156	364	55	66	50	175	9	10,9	23,2	-
29/11/03		1770	7,1	237	447	36,4	75	74	197	25	9,69	14,3	-
10/06/03	PT-31	852	6,8	187	142	21	87	67	97	11	4,8	15,3	0,03
29/11/03		680	6,9	154	136	29,5	83	73	93	14	5,1	14,4	0,05
10/06/03	FT-39	1439	6,9	276	312	50,3	71	57	113	10	3,38	30,1	0,49
29/11/03		1290	7,0	405	277	46	61,2	58	197	16	3,63	16,4	-
10/06/03	FBE-144	1138	7,3	201	194	48	134	165	254	17	5,5	13,3	0,07
29/11/03		1226	7,1	222	201	53	149	174	269	11	7,3	17,3	0,06
10/06/03	FT-25	1096	7,3	234	214	45	167	132	98	13	2,8	16	0,5
29/11/03		1197	7,3	251	212	48	174	128	112	15	3,4	12	0,45
10/06/03	FBE-156	546	7,1	149	128	19	30	34	56	5	2,1	9,7	0,1
29/11/03		764	7,2	166	135	27	22	41	71	4	2,9	11	-
10/06/03	FT-62	1975	6,8	181	519	54,6	87	126	136	21	9,69	12,6	-
29/11/03		1629	6,9	264	269	46	71	55	167	30	8,48	11,2	-
10/06/03	FBE-188	627	7,0	227	42	18,2	29	43	68	8	6,06	13,9	-
29/11/03		629	6,8	271	43	9,1	28	42	69	26	7,27	13,5	-
10/06/03		1809	7,1	207	461	163	68	83	195	8	0,12	11,8	0,1
29/11/03	55-76	1760	7,3	220	398	121	35	78	189	10	2,42	8,4	0,3

ANEXO - B

Resultado das análises físico-químicas

Data	Amost.	CE	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	N-NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ba ⁺²
10/6/03	SP-34	1730	7,7	139	429	91	58	74,2	170	11	10,1	18,2	-
29/11/3		1487	7,6	122,3	368	53	45,4	62,9	112	10,7	10,02	13,1	-
18/08/05		1779	6,9	205	181	25	91,2	61,3	90	7,5	16,6	39,7	0,4
10/06/03	FBE-26	1696	7,1	201,2	296	98,1	62,3	79,6	115	16,3	6,87	21,6	-
29/11/03		1262	7,0	155,5	254	85,6	63,9	80,5	92,5	7,8	4,05	25,2	0,1
18/08/05		1315	7,1	190,7	273	96,2	41,7	53,8	160	17,9	3,42	22,3	-
10/06/03	FT-84	1629	7,1	411,8	675	112,3	68,1	129	317	16,8	0,13	16,3	-
29/11/03		1528	7,1	407,5	643	101,7	71,4	132	312	12,4	0,17	18,5	-
18/08/05		1555	6,9	400,2	633	99,8	73,3	138	301	13,7	0,2	17,5	-
10/06/03	FT-65	1319	7,9	137,5	396	71,3	43,2	55,6	196	31	0,02	12,9	-
29/11/03		1412	7,6	158,6	402	83,4	55,6	62,0	199	45	0,02	14,2	-
18/08/05		1514	7,7	171,4	527	87,6	61,4	71,4	202	15,9	0,03	17,7	-
10/6/03	51-201	527	7,2	220	56	91,1	23,3	27	78	9	4,85	16,7	-
2/12/03		532	7,3	254	51	128,2	24,3	13	78,8	10	6,06	14,3	-
18/08/05		1118	7,8	293	243	30	55	60	78	6,1	25	42	0,7
10/06/3	52-29	2500	6,9	303	705	72,8	122	176	204	18	4,85	11,4	-
29/11/3		2240	6,7	217	612	73	112	79	187	24	8,48	11,0	-
10/6/03	56-114	1727	7,3	207	432	91,1	51	66	292	6	6,06	17,7	-
2/12/03		1720	7,4	142	429	128	55,4	65	256	12	6,0	12,2	-
11/06/3	FBE-157	1413	7,4	225	320	58,6	53	44	141	28	14,25	21,1	-
2/12/03		1375	7,8	115	307	45,6	50	31	158	48	20,6	11,8	-
19/6/03	52-33	1182	7,4	205	238	45,5	53	37	117	19	8,48	11,4	0,56
7/12/03		1220	7,3	234	252	55	46	46	128	20	9,1	10,0	-
10/6/03	FT-198	1273	7,1	155	167	46	63	80	42	12	3,2	16,4	-
29/11/3		1120	7,0	148	159	54	31	37	36	9	4,7	19,2	-
10/6/03	55-204	2080	7,3	237	615	62,4	63,2	108	233	18,3	0,06	13,4	-
18/08/05		2210	7,2	225	632	71,3	55,8	87,2	226	16,4	0,13	12,1	-
11/6/03	55-42	12680	7,3	108	4309	209	885	940	487	56	0,61	13,1	-
7/12/03		16600	6,9	107	5696	9,1	1139	1280	620	65	0,7	7,2	-
10/6/03	FT-67	1125	7,1	146	250	51,8	38	36,2	108	8,5	0,13	12,1	0,07
18/08/05		1217	7,1	158	254	63,5	63	80	43	7,9	0,05	15	-
11/6/03	55-199	1894	7,2	314,8	262	49,2	54,8	46,1	391	34,7	0,22	12,3	-
7/12/03		2055	7,1	230,6	388	31,6	55,6	47,2	534	19,5	0,09	11,3	-
11/6/03	55-245	1507	7,3	176,4	412	94,1	26,3	27	169	9,15	0,07	13,6	-
7/12/03		1380	7,2	165,5	378	73,6	23,7	22	172	5,3	0,04	12,2	-
24/7/03	56-88	5620	7,3	110	1809	137	278	306	448	22	7,27	15,6	-
13/12/3		6470	7,2	143	2561	349	476	245	470	17	7	14,9	-
19/6/03	FBE-169	1192	7,1	159	127	228	44	50	438	10	4,85	21	-
9/12/03		1230	7,0	225	92	332	53	48	118	15	0,61	17	-

Nota: Todos os dados são em mgL⁻¹ com exceção da CE que está em µS/cm.
Valores em negrito, considerados superiores ou no limite da norma da OMS situação de perigo.

ANEXO - C

Razões lônicas

ANEXO - C

ANEXO - C

Razões Iônicas – bacia hidrográfica de Santa Cruz

Amost.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ / Ca ²⁺	Ca ²⁺ / Mg ²⁺	Na ⁺ / Cl ⁻	Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻
FT-63	164	141	46	72	52	6	0,6	1,6	0,4	0,9
	217	156	51	45	118	11	1,1	0,9	0,8	0,7
	231	191	66	72	85	9	0,9	1,1	0,4	0,8
FT-09	156	142	40	35	97	8	1,1	0,9	0,7	0,9
	217	145	51	51	98	10	1	1	0,7	0,7
	176	166	42	36	101	11	1,2	0,9	0,6	0,9
	287	178	38	32	108	9	1,2	0,8	0,6	0,6
FT-47	312	106	31	40	166	18	0,8	1,3	1,6	0,3
	267	272	81,4	69	113	19	1,2	0,8	0,4	1,0
	232	285	74	56	132	15	1,3	0,8	0,5	1,2
52-81	110	2300	454	572	389	37	0,8	1,3	0,2	20,1
	100	758	122	204	187	29	0,6	1,7	0,2	7,6
FT-59	315	113	46	72	87	12	0,6	1,6	0,8	0,4
	266	156	41	71	78	11	0,6	1,7	0,5	0,6
	328	154	49	77	84	13	0,6	1,6	0,5	0,5
PT-31	187	142	87	67	97	11	1,3	0,8	0,7	0,8
	154	136	83	73	93	14	1,1	0,9	0,7	0,9
FT-65	137,5	396	43,2	55,6	196	31	0,8	1,3	0,5	2,9
	158,6	402	55,6	62	199	45	0,9	1,1	0,5	2,5
	171,4	527	61,4	71,4	202	15,9	0,9	1,2	0,4	3,1
52-33	205	238	53	37	117	19	1,4	0,7	0,5	1,2
	234	252	46	46	128	20	1	1	0,5	1,1
55-42	108	4309	885	940	487	56	0,9	1,1	0,1	39,9
	107	5696	1139	1280	620	65	0,9	1,1	0,1	53,2
FBE-169	159	127	44	50	438	10	0,9	1,1	3,4	0,8
	225	92	53	48	118	15	1,1	0,9	1,3	0,4

Nota: Todos os dados são em mgL⁻¹ com exceção da C.E. que está em µS/cm.
Valores à vermelho, considerados como indicadores da chegada da intrusão marinha. C.E. alto.

ANEXO - C

Razões Iônicas – bacia hidrográfica de São Domingos

Amost.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ / Ca ²⁺	Ca ²⁺ / Mg ²⁺	Na ⁺ / Cl ⁻	Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻
FT-21	566	85,1	54	64	243	25	0,8	1,2	2,9	0,1
	362	92,2	47	75	98,4	13	0,6	1,6	1,1	0,3
	437	112	65	76	198	17	0,9	1,2	1,8	0,3
FT-23	312	106	31	40	166	18	0,8	1,3	1,6	0,3
	232	113	50	29	79	12	1,7	0,6	0,7	0,5
	323	193	22	26	97	8,5	0,8	1,2	0,5	0,6
FT-109	253	2641	312	789	452	19	0,4	2,5	0,2	10,4
	332	2715	396	880	592	21	0,5	2,2	0,2	8,2
	349	2888	377	893	623	20	0,4	2,4	0,2	8,3
FBE-53	161	85,7	31	38	98	8	0,8	1,2	1,1	0,5
	242	70,2	29	37	146	11	0,8	1,3	2,1	0,3
	167	63,2	22	31	112	13				
	129	75	33	26	86	9	1,3	0,8	1,1	0,6
FT-44	164	549	66	75	292	17	0,9	1,1	0,5	3,3
	193	538	72	56	286	25	1,3	0,8	0,5	2,8
	219	611	84	88	365	32	0,1	1,0	0,6	2,8
FT-208	159	267	40	75	156	17	0,5	1,9	0,6	1,7
	188	266	45	46	158	10	0,1	1,0	0,6	1,4
	211	259	48	59	149	15	0,8	1,2	0,6	1,2
FBE-56	295	217	38	76	77	4	0,5	2	0,4	0,7
	315	259	25	91	164	9				
	300	237	33	84	99	7,5	0,3	3,	0,6	0,8
FT-81	288	273	51	86	85	8	0,6	1,7	0,3	0,9
	227	270	48	42	158	11	1,1	0,9	0,6	1,2
	189	212	72	49	79	7	1,5	0,7	0,4	1,1
FT-13	481	184	77,8	48	224	9,9	1,6	0,6	1,2	0,4
	613	205,6	47,6	17,6	394	11	2,7	0,4	1,9	0,3
	333	268	61	50	187	12	1,2	0,8	0,7	0,8
FT-14	193	241	75	67	136	7	1,1	0,9	0,6	1,2
	220	239	70	37	98,4	9	1,9	0,5	0,4	1,1
	185	217	69	41	100	12	1,7	0,6	0,5	1,2
FT-40	193	313	63	82	93	6	0,8	1,3	0,3	1,6
	217	316	61	45	148	11	1,4	0,7	0,5	1,5
	211	336	66	72	137	13				1,6
							0,9	1,1	0,4	

ANEXO - C

Razões Iônicas – bacia hidrográfica de São Domingos

Amost.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ / Ca ²⁺	Ca ²⁺ / Mg ²⁺	Na ⁺ / Cl ⁻	Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻
FT-42	207	321	58	80	91	9	0,7	1,4	0,3	1,5
	198	323	62	50	158	9	1,2	0,8	0,5	1,6
	217	316	61	65	121	11	0,9	1,1	0,4	1,5
PT-29	661	127	44	50	438	10	0,9	1,1	3,4	0,2
	342	92	53	48	318	15	1,1	0,9	3,5	0,3
	455	111	49	52	356	13	0,9	1,1	3,2	0,2
FT-78	190	875	140	202	151	9	0,7	1,4	0,2	4,6
	164	846	130	155	256	16	0,8	1,2	0,3	5,2
	153	912	122	146	183	13	0,8	1,1	0,2	6,0
56-111	178	212	37	56	146	8	0,7	1,5	0,7	1,2
	305	280	49	40	148	8	1,2	0,8	0,5	0,9
56-44	156	364	66	50	175	9	1,3	0,8	0,5	2,3
	237	447	75	74	197	25	1,0	0,1	0,4	1,9
FT-25	234	214	167	132	98	13	1,3	0,8	0,5	0,9
	251	212	174	128	112	15	1,4	0,7	0,5	0,8
FBE-156	149	128	30	34	56	5	0,9	1,1	0,4	0,9
	166	135	22	41	71	4	0,5	1,9	0,5	0,8
56-88	110	1809	278	306	448	22	0,9	1,1	0,2	16,4
	143	2561	476	245	470	17	1,9	0,5	0,2	18,0

Nota: Todos os dados são em mgL⁻¹ com excepção da C.E. que está em µS/cm. Valores à vermelho, considerados como indicadores da chegada da intrusão marinha. C.E. alto.

ANEXO C

Razões Iônicas – bacia hidrográfica de São Miguel

Amost.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ / Ca ²⁺	Ca ²⁺ / Mg ²⁺	Na ⁺ / Cl ⁻	Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻
FBE-145	305	227	30,1	22	243	47	1,4	0,7	1,1	0,7
	298	170	44	17	167	10	2,6	0,4	0,1	0,6
	238	227	37	25	213	18	1,5	0,7	0,9	0,9
FT-05	293	251	19	38	153	12	0,5	2,0	0,6	0,9
	300	93	36	22	89	12	1,6	0,6	0,1	0,3
	372	167	21	23	95	11	0,9	1,1	0,6	0,4
51-273	122	199	44	63	127	10	0,7	1,4	0,6	1,6
	210	205	42	61	138	20	0,7	1,5	0,7	0,1
SP-12	110	769	116	109	263	23	1,1	0,9	0,3	7,0
	168	712	107	56	226	10	1,9	0,5	0,3	4,2
FT-39	276	312	71	57	113	10	1,2	0,8	0,4	1,1
	405	277	61,2	58	197	16	1,1	0,9	0,7	0,7
FBE-144	201	194	134	165	254	17	0,8	1,2	1,3	0,1
	222	201	149	174	269	11	0,9	1,2	1,3	0,9
FT-62	181	519	87	126	136	21	0,7	1,4	0,3	2,9
	264	269	71	55	167	30	1,3	0,8	0,6	1,0
FBE-188	227	42	29	43	68	8	0,7	1,5	1,6	0,2
	271	43	28	42	69	26	0,7	1,5	1,6	0,2
51-201	220	56	23,3	27	78	9	0,9	1,2	1,4	0,2
	254	51	24,3	13	78,8	10	1,9	0,5	1,5	0,2
	293	243	55	60	78	6,1	0,9	1,1	0,3	0,8
52-29	303	705	122	176	204	18	0,7	1,4	0,3	2,3
	217	612	112	79	187	24	1,4	0,7	0,3	2,8

Nota: Todos os dados são em mgL⁻¹ com exceção da C.E. que está em µS/cm.
Valores à vermelho, considerados como indicadores da chegada da intrusão marinha. C.E. alto.

