

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Paula Stein

**HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA
BACIA SEDIMENTAR POTIGUAR/RN E
CARACTERIZAÇÃO DA SALINIZAÇÃO DO AQUÍFERO
CÁRSTICO JANDAÍRA.**

Tese de Doutorado
2013

PAULA STEIN

Geóloga, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
Mestra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

**HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA SEDIMENTAR
POTIGUAR/RN E CARACTERIZAÇÃO DA SALINIZAÇÃO DO AQUIFERO CÁRSTICO
JANDAÍRA.**

Tese que apresentou ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Prof. Dr. Almany Costa Santos e co-orientada pelo Prof. Dr. Germano Melo Júnior (UFRN) e pelo Prof. Dr. José Braz Diniz Filho (UFRN), em preenchimento parcial para obter o grau de Doutora em Geociências, área de concentração Hidrogeologia e Geologia Aplicada, defendida e aprovada em 05 de agosto de 2013.

RECIFE, PE
2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S819h Stein, Paula.
Hidrogeoquímica das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar Potiguar/RN e caracterização da salinização do aquífero cárstico Jandaíra / Paula Stein. - Recife: O Autor, 2013.
204 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Almany Costa Santos.
Coorientador: Prof. Dr. Germano Melo Júnior.
Coorientador: Prof. José Braz Diniz Filho.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2013.
Inclui Referências.

1. Geociências. 2. Aquífero cárstico. 3. Salinização. 4. Semiárido. 5. Intrusão marinha. I. Santos, Almany Costa. (Orientador). II. Melo Júnior, Germano. (Coorientador). III. Diniz Filho, José Braz. (Coorientador). IV. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2013-285

**HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA
SEDIMENTAR POTIGUAR/RN E CARACTERIZAÇÃO DA SALINIZAÇÃO
DO AQUIFERO CARSTICO JANDAÍRA**

Paula Stein

APROVADA

Almany Costa Santos

05 de agosto de 2013

João Manoel Filho

05 de agosto de 2013

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

05 de agosto de 2013

Germano Melo Júnior

05 de agosto de 2013

José Braz Diniz Filho

05 de agosto de 2013

APRESENTAÇÃO

Este trabalho constitui a Tese de Doutorado da Geóloga Paula Stein, elaborada em conformidade com as normas estabelecidas pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

A tese foi elaborada no âmbito do projeto "*Estabelecimento de Valores de Background para Solos e Águas Subterrâneas nos Campos de Produção da UN-RNCE na Bacia Potiguar (Onshore)*" executado com recursos da PETROBRAS/UO-RNCE (Contrato Nº 2500.0011003.05.2) pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RESUMO

Os levantamentos executados numa área de aproximadamente 800 km², no âmbito da Bacia Sedimentar Potiguar, evidenciaram que nesse setor o aquífero cárstico Jandaíra, de natureza livre, é a principal unidade aquífera rasa, constituindo assim, o objeto principal desse estudo. O aquífero Barreiras, estratigraficamente superior ao Jandaíra, poroso granular e essencialmente livre, tem espessura litológica e saturada descontínua, funcionando predominantemente como uma unidade de transferência e recarga do aquífero Jandaíra subjacente.

A superfície potenciométrica do aquífero Jandaíra apresenta comportamento uniforme e contínuo, refletindo a ocorrência de uma rede de condutos e cavidades interligadas, impondo condições que definem um padrão regular de escoamento das águas subterrâneas que coincide com a declividade geral do terreno.

A caracterização hidrogeoquímica do aquífero Jandaíra evidenciou mudanças significativas na concentração iônica dessas águas, onde o nível de salinização apresenta relação com os componentes geográficos e climáticos que imperam nesse domínio. Esse cenário permitiu a separação das águas amostradas em dois grupos principais com características distintas, onde a hidroquímica do aquífero Jandaíra é determinada pela combinação de fatores diversos, como: a interações entre a água e a litologia aquífera durante o processo de circulação; a presença de sais na zona insaturada que atingem a zona saturada durante os eventos de recarga e a distância em relação à linha de costa.

No Grupo 1 foram agrupadas as águas de salinidade inferior, classificadas como doces a ligeiramente salobras, STD médio de 1116 mg/L e fácies predominantemente bicarbonatada cloretada mista. Além dos processos naturais de interação água-rocha, o quimismo dessas águas se dá em resposta aos mecanismos de concentração cíclica de sais por evaporação, os quais atingem a zona saturada durante os eventos de recarga.

No Grupo 2 estão as águas altamente mineralizadas, classificadas como moderadamente salobras a salgadas, STD médio de 6888 mg/L e fácies cloretadas mistas. Além da ocorrência dos mesmos processos referidos para o Grupo 1, destaca-se para o Grupo 2 que a assinatura geoquímica dessas águas pode ser influenciada pela intrusão salina natural. As condições climáticas em domínio semiárido propiciam uma recarga pouco eficiente e, portanto, uma frente de escoamento subterrâneo reduzida e incapaz de evitar o avanço da cunha salina no interior do continente.

Palavras-Chave: aquífero cárstico, salinização, semiárido, intrusão marinha.

ABSTRACT

The research surveys carried out in an area circa 800 km², in the domains of the Potiguar Sedimentary Basin, evidenced that in this sector the Jandaíra non-confined karstic aquifer is the main shallow aquifer unit, being the main goal of this study. The Barreiras aquifer, stratigraphically above Jandaíra, granular porous and essentially non-confined, has discontinuous lithological and saturated thicknesses, acting mainly as a transfer and recharge unit to the underlying Jandaíra aquifer.

The potentiometric surface of the Jandaíra aquifer has uniform and continuous behavior, reflecting a framework of interconnected conducts and cavities, imposing conditions that define a regular flow pattern for the groundwater which mimics the overall surface topography.

The hydrogeochemical characterization of the Jandaíra aquifer evidenced significant changes in ionic concentrations of these waters, where salinization depicts relationships with geographical and climatic components that govern this domain. This scenario allowed separation of the sampled waters into two main groups with distinct characteristics, where the hydrochemistry of the Jandaíra aquifer is determined by combination of distinct factors, such as: interaction between water and aquifer lithology during circulation, presence of salts in the unsaturated zone, which reach the saturated zone during recharge events, and distance from coast line.

Group 1 encompasses lower salinity waters, classified as fresh to mildly brackish, 1116 mg/L average TDS and dominantly bicarbonate-chloride facies. In addition to the natural processes of rock-water interaction, the chemistry of these waters reflects mechanisms of cyclical salt concentration due to evaporation, which reaches the saturated zone during recharge events.

Group 2 encompasses highly mineralized waters, classified as moderately brackish to salty, 6888 mg/L average TDS and mixed chloride facies. In addition to the interplay of the same processes referred to for Group 1, it is highlighted that the geochemical signature of these waters may be influenced by the natural marine intrusion. Climate conditions in semi-arid domain favor a poorly efficient recharge and, hence, a reduced underground flow front unable to avoid penetration of the saline intrusion into the continent.

Key words: karstic aquifer, salinization, semi-arid, saline intrusion.

ÍNDICE

Capítulo I: INTRODUÇÃO	01
1.1 REFERENCIAIS TEÓRICOS	01
1.2 OBJETIVOS	02
1.3 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO E ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS	02
1.4 METODOLOGIA	04
1.4.1 Climatologia	04
1.4.2 Hidrogeologia	04
1.4.3 Hidrogeoquímica	05
Capítulo II: CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO	11
2.1 ELEMENTOS DO CLIMA	15
2.1.1 Precipitação Pluviométrica	15
2.1.2 Temperatura	15
2.1.3 Ventos	16
2.1.4 Umidade Relativa do Ar	16
2.1.5 Insolação	16
2.1.6 Evaporação	16
2.1.7 Evapotranspiração Potencial	17
2.2 BALANÇO HÍDRICO E CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA	17
Capítulo III: CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	22
3.1 GEOLOGIA REGIONAL	22
3.2 GEOLOGIA LOCAL	26
3.3 HIDROGEOLOGIA REGIONAL	34
3.3.1 Embasamento Cristalino	35
3.3.2 Bacias Sedimentares	36
Capítulo IV: HIDROGEOLOGIA	38
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS	38
4.2 ESTRUTURA HIDROGEOLÓGICA	50
4.2.1 Aquífero Barreiras	50
4.2.2 Aquífero Jandaíra	51
4.3 VARIAÇÃO SAZONAL DO NÍVEL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	59
4.4 COMPORTAMENTO DO FLUXO SUBTERRÂNEO	62
4.4.1 Potenciometria da Área de Canto do Amaro	63
4.4.2 Potenciometria da Área de Estreito	63
4.4.3 Potenciometria da Área de Salina Cristal	63
4.4.4 Considerações sobre fluxo das águas nas áreas de estudo	66
4.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	69
Capítulo V: HIDROGEOQUIMICA	71
5.1 INTRODUÇÃO	71
5.2 AMOSTRAGEM DE ÁGUAS	72
5.2.1 Seleção do Método de Amostragem	72
5.2.1.1 <i>Classificação dos poços quanto à recarga</i>	73
5.2.1.2 <i>Método de purga de baixa vazão</i>	74
5.2.1.3 <i>Método de purga mínima</i>	75
5.2.2 Procedimentos Amostrais	76
5.3 HIDROQUÍMICA DE CANTO DO AMARO	86
5.3.1 Aquífero Jandaíra	86
5.3.1.1 <i>Salinidade do aquífero Jandaíra em Canto do Amaro</i>	88
5.3.1.2 <i>Distribuição dos cátions no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro</i>	94

5.3.1.3	<i>Distribuição dos ânions no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro</i>	106
5.3.2	Aquífero Barreiras	113
5.3.2.1	<i>Salinidade do aquífero Barreiras em Canto do Amaro</i>	114
5.3.2.2	<i>Cátions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro</i>	115
5.3.2.3	<i>Ânions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro</i>	115
5.3.3	Fácies hidroquímicas em Canto do Amaro	116
5.4	HIDROQUÍMICA DE ESTREITO	120
5.4.1	Aquífero Jandaíra	120
5.4.1.1	<i>Salinidade do aquífero Jandaíra em Estreito</i>	122
5.4.1.2	<i>Distribuição dos cátions no aquífero Jandaíra em Estreito</i>	126
5.4.1.3	<i>Distribuição dos ânions no aquífero Jandaíra em Estreito</i>	135
5.4.2	Aquífero Barreiras	142
5.4.2.1	<i>Salinidade do aquífero Barreiras em Estreito</i>	142
5.4.2.2	<i>Cátions no aquífero Barreiras em Estreito</i>	143
5.4.2.3	<i>Ânions no aquífero Barreiras em Estreito</i>	143
5.4.3	Fácies hidroquímicas em Estreito	144
5.5	HIDROQUÍMICA DE SALINA CRISTAL	146
5.5.1	Aquífero Jandaíra	146
5.5.1.1	<i>Salinidade do aquífero Jandaíra em Salina Cristal</i>	147
5.5.1.2	<i>Distribuição dos cátions no aquífero Jandaíra em Salina Cristal</i>	152
5.5.1.3	<i>Distribuição dos ânions no aquífero Jandaíra em Salina Cristal</i>	161
5.5.2	Aquífero Barreiras	167
5.5.2.1	<i>Salinidade do aquífero Barreiras em Salina Cristal</i>	168
5.5.2.2	<i>Cátions no aquífero Barreiras em Salina Cristal</i>	169
5.5.2.3	<i>Ânions no aquífero Barreiras em Salina Cristal</i>	171
5.5.3	Fácies hidroquímicas em Salina Cristal	173
Capítulo VI: IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS HIDROGEOQUÍMICOS NO AQUÍFERO JANDAÍRA		176
6.1	ANÁLISE GLOBAL DOS DADOS HIDROQUÍMICOS	176
6.2	GRUPOS DE ÁGUAS	179
6.2.1	Avaliação estatística das amostras agrupadas	180
6.2.2	Correlação entre os Íons	182
6.2.3	Percentual Iônico	183
6.2.4	Fácies Hidroquímicas	184
6.2.5	Índices de Saturação	186
6.2.6	Troca Catiônica	188
6.2.7	Intrusão Marinha	189
6.2.7.1	<i>Avaliação da influência marinha no aquífero Jandaíra</i>	190
Capítulo VII: CONCLUSÕES		197
REFERÊNCIAS		201

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Localização das áreas de estudo.	03
Figura 1.2	Localização das áreas estudo plotadas em imagem de satélite.	06
Figura 1.3	Área de Canto do Amaro.	07
Figura 1.4	Área de Estreito.	08
Figura 1.5	Área de Salina Cristal.	09
Figura 1.6	Aspectos de ocupação das áreas de estudo.	10
Figura 2.1	Gráficos dos principais elementos climatológicos.	14
Figura 2.2	Evolução mensal da precipitação pluviométrica no ano de 2007.	15
Figura 2.3	Representação gráfica do Balanço Hídrico mensal pelo método de Thorntwaite, com base nos dados climáticos da Estação de Mossoró/RN.	18
Figura 2.4	Representação gráfica do Balanço Hídrico mensal pelo método de Thorntwaite, com base nos dados climáticos da Estação de Macau/RN.	18
Figura 3.1	Localização da Bacia Potiguar, com suas principais formações estratigráficas aflorantes na sua parte emersa (adaptado de Dantas, 1998).	22
Figura 3.2	Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar.	23
Figura 3.3	Seção típica da Bacia Potiguar, mostrando seu estilo estrutural e estratigráfico em terra.	23
Figura 3.4	Coluna Estratigráfica da Bacia Potiguar.	25
Figura 3.5	Unidades geológicas aflorantes no setor estudado.	27
Figura 3.6	Afloramento de bancos de calcário da Formação Jandaíra, na área de Canto do Amaro.	28
Figura 3.7	Margas e lamas calcárias da Formação Jandaíra, na área de Estreito.	28
Figura 3.8	Contato discordante entre banco de calcário da Formação Jandaíra e sedimentos siliciclásticos da Formação Barreiras, na área de Estreito.	29
Figura 3.9	Alternância de arenitos e conglomerados pertencentes à Formação Barreiras, na área de Estreito.	29
Figura 3.10	Arenitos conglomeráticos da Formação Barreiras, na área de Canto do Amaro.	30
Figura 3.11	Aspecto dos arenitos da Formação Barreiras sob influência de frentes redox, na área de Estreito.	30
Figura 3.12	Arenitos da Formação Tibau intrudidos por basaltos da Formação Macau, na área de Salina Cristal.	31
Figura 3.13	Aspecto geral dos arenitos oxidados da Formação Tibau, sob influência do vulcanismo da Formação Macau, na área de Salina Cristal.	31
Figura 3.14	Contato discordante entre arenitos lateritizados da Formação Barreiras e arenitos não lateritizados da Formação Potengi, na área de Salina Cristal.	32
Figura 3.15	Padrão suave de processos redox em arenitos da Formação Potengi, na área de Salina Cristal.	32
Figura 3.16	Cascalheira de coloração variável, com seixos de tamanho igualmente variável, na área de Estreito.	33
Figura 3.17	Aspecto da superfície do terreno em trecho de ocorrência de cascalheira, na área de Estreito.	33
Figura 3.18	Detalhe das cascalheiras da Figura 3.16, evidenciando a ação redox, na área de Estreito.	34
Figura 3.19	Mapa simplificado de ocorrência dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Norte e parte do Ceará.	37

Figura 4.1	Perfuração de sondagem de reconhecimento em Canto do Amaro, com máquina perfuratriz percussora.	39
Figura 4.2	Revestimento provisório de 6" em ferro galvanizado utilizado na execução de sondagem na área de Canto do Amaro.	39
Figura 4.3	Operação de instalação do revestimento em PVC geomecânico.	39
Figura 4.4	Aspecto do revestimento interno e tampão do poço, antes da construção da caixa de proteção.	39
Figura 4.5	Poço de monitoramento concluído na área de Canto do Amaro, com detalhe da caixa de proteção construída ao redor da boca do poço.	40
Figura 4.6	Disposição das sondagens de reconhecimento (PS) e poços de monitoramento executados na área de Canto do Amaro.	41
Figura 4.7	Disposição das sondagens de reconhecimento (PS) e poços de monitoramento executados na área de Estreito.	42
Figura 4.8	Disposição das sondagens de reconhecimento (PS) e poços de monitoramento executados na área de Salina Cristal.	43
Figura 4.9	Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento executados na área de Canto do Amaro.	44
Figura 4.10	Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento executados na área de Estreito.	45
Figura 4.11	Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento executados na área Salina Crista.	46
Figura 4.12	Seção hidrogeológica A-A' da área de Canto do Amaro.	53
Figura 4.13	Seção hidrogeológica B-B' da área de Canto do Amaro.	54
Figura 4.14	Seção hidrogeológica C-C' da área de Canto do Amaro.	55
Figura 4.15	Seção hidrogeológica A-A' da área de Estreito.	56
Figura 4.16	Seção hidrogeológica B-B' da área de Estreito.	57
Figura 4.17	Seção hidrogeológica A-A' da área de Salina Cristal.	58
Figura 4.18	Seção hidrogeológica B-B' da área de Salina Cristal.	59
Figura 4.19	Pluviometria mensal (mm) no ano de 2007. A coleta representativa do período de maior estiagem ocorreu no mês de janeiro, e a representativa do período das chuvas em julho de 2007.	60
Figura 4.20	Mapa de fluxo do aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro no período úmido.	64
Figura 4.21	Mapa de fluxo do aquífero Jandaíra na área de Estreito no período úmido.	65
Figura 4.22	Mapa de fluxo do aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal no período úmido.	66
Figura 4.23	Afloramento de arenitos e conglomerados pertencentes à Formação Barreiras, na área de Estreito.	67
Figura 4.24	Pacote de calcário da Formação Jandaíra subjacente aos sedimentos siliciclásticos da Formação Barreiras, na área de Estreito.	68
Figura 4.25	Carstes em superfície, desenvolvidos nos calcários da Formação Jandaíra, na área de Canto do Amaro.	68
Figura 4.26	Modelo hidrogeológico conceitual esquematicamente ilustrado, retratando as diferentes situações hidrogeológicas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra nas três áreas de estudo.	70
Figura 5.1	Instalação da bomba de bexiga no poço.	75
Figura 5.2	Funcionamento do sistema de bombeamento e detalhe da célula de fluxo para leitura e estabilização dos parâmetros.	76

Figura 5.3	Gráfico da média pluviométrica mensal (mm) de agosto de 2006 à agosto de 2007 e indicação da etapa de amostragem realizada.	77
Figura 5.4	Localização dos poços de monitoramento amostrados na área de Canto do Amaro	78
Figura 5.5	Localização dos poços de monitoramento amostrados na área de Estreito.	79
Figura 5.6	Localização dos poços de monitoramento amostrados na área de Salina Cristal.	80
Figura 5.7	Coleta da alíquota filtrada com o uso de um filtro descartável de porosidade 0,45 μm .	81
Figura 5.8	Preservação mediante a adição de HNO_3 , utilizado para acidificar as amostras na determinação analítica dos metais dissolvidos	82
Figura 5.9	Acondicionamento das amostras em caixa de <i>isopor</i> refrigeradas com gelo e inseridas em caixa de madeira para conservar a temperatura necessária.	83
Figura 5.10	Balanço iônico para determinação do erro de análise das amostras de água subterrânea e comparação com o valor de condutividade elétrica. No eixo X, a nomenclatura de cada poço é seguida da informação S ou U, que aponta para a amostragem no período Seco ou Úmido, respectivamente. A linha amarela marca a faixa de erro analítico admissível no presente trabalho.	83
Figura 5.11	Zoneamento da condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) do aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	89
Figura 5.12	Sais acumulados na superfície do terreno, ao longo de uma drenagem intermitente na área de Canto do Amaro (a); coleta desses sais (b) e gráfico da difração de raios-X da amostra (c).	90
Figura 5.13	Evolução da condutividade elétrica em relação à distância da linha de costa (gráficos à esquerda) e ao vale do rio Apodi (à direita). As séries em vermelho representam a amostragem do período seco, e as séries em azul a amostragem do período úmido. Os círculos correspondem aos poços do aquífero Jandaíra e os losangos os poços do aquífero Barreiras.	92
Figura 5.14	Distribuição espacial dos poços na área de Canto do Amaro, em relação a linha de costa (à norte) e vale fluvial do Apodi (à oeste). Base:Imagem Google Earth, julho 2012.	92
Figura 5.15	Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) do aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	94
Figura 5.16	Teor de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	95
Figura 5.17	Zoneamento do Ca^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	96
Figura 5.18	Teor de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	97
Figura 5.19	Zoneamento do Mg^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	99
Figura 5.20	Teor de Na^+ no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	100
Figura 5.21	Zoneamento do Na^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	102

Figura 5.22	Teor de K^+ no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	103
Figura 5.23	Zoneamento do K^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	105
Figura 5.24	Teor de Cl^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	106
Figura 5.25	Zoneamento do Cl^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	108
Figura 5.26	Teor de HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	109
Figura 5.27	Zoneamento do HCO_3^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	110
Figura 5.28	Teor de SO_4^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	111
Figura 5.29	Zoneamento do SO_4^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	112
Figura 5.30	Condutividade elétrica ($\mu S/cm$) do aquífero Barreiras em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	114
Figura 5.31	Teor dos cátions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	115
Figura 5.32	Teor dos ânions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	116
Figura 5.33	Diagramas hidroquímicos de Stiff e Piper para as águas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra na área de Canto do Amaro	118
Figura 5.34	Condutividade elétrica ($\mu S/cm$) do aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	123
Figura 5.35	Zoneamento da condutividade elétrica ($\mu S/cm$) do aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	125
Figura 5.36	Distribuição espacial dos poços na área de Estreito. À leste dos poços encontra-se o vale fluvial do Açú. Base: Imagem <i>Google Earth</i> , julho 2012.	126
Figura 5.37	Teor de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	127
Figura 5.38	Zoneamento do Ca^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	128
Figura 5.39	Teor de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita)	129

Figura 5.40	Zoneamento do Mg^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	130
Figura 5.41	Teor de Na^+ no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	131
Figura 5.42	Zoneamento do Na^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	132
Figura 5.43	Teor de K^+ no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	133
Figura 5.44	Zoneamento do K^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	134
Figura 5.45	Teor de Cl^- no aquífero Jandaíra em Estreito, no período seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	135
Figura 5.46	Zoneamento do Cl^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	137
Figura 5.47	Teor de HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Estreito, no período seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	138
Figura 5.48	Zoneamento do HCO_3^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	139
Figura 5.49	Teor de SO_4^- no aquífero Jandaíra em Estreito, no período seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	140
Figura 5.50	Zoneamento do SO_4^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).	141
Figura 5.51	Condutividade elétrica ($\mu S/cm$) do poço 9-VBET-05-RN no aquífero Barreiras em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	142
Figura 5.52	Teor dos cátions do poço 9-VBET-05-RN no aquífero Barreiras em Estreito, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	143
Figura 5.53	Teor dos ânions do poço 9-VBET-05-RN no aquífero Barreiras em Estreito, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	144
Figura 5.54	Diagramas hidroquímicos de Stiff e Piper para as águas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra na área de Estreito.	145
Figura 5.55	Condutividade elétrica ($\mu S/cm$) do aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	148
Figura 5.56	Zoneamento da condutividade elétrica ($\mu S/cm$) do aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	150
Figura 5.57	Distribuição espacial dos poços na área de Salina Cristal, em relação a linha de costa. Base:Imagem Google Earth, julho 2012.	151

Figura 5.58	Evolução da condutividade elétrica em relação à distância da linha de costa. As séries em vermelho representam a amostragem do período seco, e as séries em azul a amostragem do período úmido. Os círculos correspondem aos poços do aquífero Jandaíra e os losangos os poços do aquífero Barreiras.	151
Figura 5.59	Teor de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	153
Figura 5.60	Zoneamento do Ca^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	154
Figura 5.61	Teor de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	155
Figura 5.62	Zoneamento do Mg^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	156
Figura 5.63	Teor de Na^+ no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	157
Figura 5.64	Zoneamento do Na^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	158
Figura 5.65	Teor de K^+ no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	159
Figura 5.66	Zoneamento do K^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	160
Figura 5.67	Teor de Cl^- no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	161
Figura 5.68	Zoneamento do Cl^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	162
Figura 5.69	Teor de HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	163
Figura 5.70	Zoneamento do HCO_3^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	164
Figura 5.71	Teor de SO_4^- no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	165
Figura 5.72	Zoneamento do SO_4^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).	166
Figura 5.73	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Barreiras em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	168
Figura 5.74	Teor dos cátions no aquífero Barreiras em Salina Cristal, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	171

Figura 5.75	Teor dos ânions no aquífero Barreiras em Salina Cristal, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).	172
Figura 5.76	Diagramas hidroquímicos de Stiff e Piper para as águas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra na área de Salina Cristal.	175
Figura 6.1	Distribuição das principais fácies hidroquímicas através do diagrama de Piper, no aquífero Jandaíra nas três áreas de estudo.	176
Figura 6.2	Indicação dos principais mecanismos que governam a geoquímica do aquífero Jandaíra, através do diagrama de Gibbs. Íons são expressos em meq/L.	177
Figura 6.3	Gráfico Mg^{2+}/Ca^{2+} versus Cl^-/HCO_3^- .	179
Figura 6.4	Distribuição dos grupos de águas nas áreas de estudo. Grupo 1 (baixa salinidade) – 12 amostras no total (3 em Canto do Amaro, 7 em Estreito e 2 em Salina Cristal). Grupo 2 (alta salinidade) – 8 amostras no total (4 em Canto do Amaro e 4 em Salina Cristal).	180
Figura 6.5	Gráficos do percentual médio de íons para os grupos de água, calculados em concentração expressa em meq/L.	183
Figura 6.6	Distribuição das principais fácies hidroquímicas das amostras agrupadas em 2 grupos.	185
Figura 6.7	Variação do IS da calcita, em função do IS da dolomita.	187
Figura 6.8	Percentual de IS da calcita e da dolomita para as amostras do Grupo 1 e Grupo 2.	187
Figura 6.9	Gráficos da razão Na^+/Cl^- versus STD (a) e da razão Ca^{2+}/HCO_3^- versus STD (b) para as amostras do Grupo 1 e Grupo 2.	189
Figura 6.10	Percentual da fração marinha nas amostras do aquífero Jandaíra (Grupo 1 e 2) no período seco e úmido, para as áreas de Canto do Amaro (esquerda) e Salina Cristal (direita).	195
Figura 6.11	Resultados de $e_{i,reação}$ do Na^+ e K^+ em relação ao percentual de água marinha nas amostras do Grupo 1 e 2, em ambos os períodos amostrais.	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Áreas de estudo e características geográficas.	03
Tabela 2.1	Valores médios mensais dos elementos climáticos no município de Mossoró.	12
Tabela 2.2	Valores médios mensais dos elementos climáticos no município de Assú.	12
Tabela 2.3	Valores médios mensais dos elementos climáticos no município de Macau.	13
Tabela 2.4	Evapotranspiração Potencial (mm).	17
Tabela 2.5	Balanço Hídrico pelo Método de Thornthwaite. Estação Climatológica de Mossoró/RN (1961 – 1990).	20
Tabela 2.6	Balanço Hídrico pelo Método de Thornthwaite. Estação Climatológica de Macau/RN (1961 – 1990).	20
Tabela 2.7	Cálculo de índices climáticos.	21
Tabela 2.8	Classificação Climática.	21
Tabela 4.1	Dados das sondagens executadas nas áreas de estudo.	47
Tabela 4.2	Principais parâmetros dos poços de monitoramento do aquífero Barreiras.	48
Tabela 4.3	Principais parâmetros dos poços de monitoramento do aquífero Jandaíra.	48
Tabela 4.4	Precipitação total mensal para o ano de 2007. Os dados de Mossoró (área de Canto do Amaro) e Macau (área de Salina Cristal) foram fornecidos pelo INMET e para Assú (área de Estreito) fornecidos pela EMPARN.	60
Tabela 4.5	Variações do nível estático (m) dos poços, obtidos ao final da estação seca e úmida.	61
Tabela 5.1	Classificação dos poços dentro de faixas de recarga em função do tempo de recuperação do nível da água no poço.	73
Tabela 5.2	Faixas de variação para a estabilização dos parâmetros indicativos da qualidade da água amostradas pelo método de Purga de Baixa-Vazão.	74
Tabela 5.3	Quantitativo de poços amostrados nas áreas de estudo, por unidade aquífera e período amostral.	77
Tabela 5.4	Parâmetros analisados limite de detecção, método analítico e laboratório responsável pela determinação.	82
Tabela 5.5	Erro de balanço e sua relação com a condutividade elétrica da água.	83
Tabela 5.6	Resultados analíticos dos poços amostrados no período seco, considerando as três áreas de estudo e ambas as unidades aquíferas.	84
Tabela 5.7	Resultados analíticos dos poços amostrados no período úmido, considerando as três áreas de estudo e ambas as unidades aquíferas.	85
Tabela 5.8	Resultado analítico da água do mar, coletada na costa da Praia de Areia Branca/RN, em 2010.	86
Tabela 5.9	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Canto do Amaro para o período seco.	86
Tabela 5.10	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Canto do Amaro para o período úmido.	87
Tabela 5.11	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Canto do Amaro para o período seco.	113
Tabela 5.12	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Canto do Amaro para o período úmido.	113
Tabela 5.13	Classificação das águas e condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas da área de Canto do Amaro	119

Tabela 5.14	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Estreito para o período seco.	121
Tabela 5.15	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Estreito para o período úmido.	122
Tabela 5.16	Classificação das águas e condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas da área de Estreito.	146
Tabela 5.17	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=4), na área de Salina Cristal para o período seco.	146
Tabela 5.18	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=4), na área de Salina Cristal para o período úmido.	147
Tabela 5.19	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Salina Cristal para o período seco.	167
Tabela 5.20	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Salina Cristal para o período úmido.	167
Tabela 5.21	Classificação das águas e condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas da área de Salina Cristal	173
Tabela 6.1	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra Grupo 1, para ambos os períodos amostrais (n=20)	181
Tabela 6.2	Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra Grupo 2, para ambos os períodos amostrais (n=14)	181
Tabela 6.3	Coefficiente de correlação (<i>r</i>) das águas do Grupo 1 para ambos os períodos amostrais (n=20).	182
Tabela 6.4	Coefficiente de correlação (<i>r</i>) das águas do Grupo 2 para ambos os períodos amostrais (n=14).	183
Tabela 6.5	Fácies hidroquímicas predominante no Grupo 1 e Grupo 2.	185
Tabela 6.6	Índice de Saturação (IS) da calcita e dolomita para as amostras do Grupo 1 e Grupo 2.	186
Tabela 6.7	Constituintes químicos da água do mar, água fresca (9-VBET-02-RN) e amostras (Grupos 1 e 2); cálculo da fração de água do mar nas amostras e concentração da mistura conservativa e da reação (troca iônica). Dados obtidos da amostragem representativa do período seco. Resultados expressos em meq/L (exceto quando indicado).	193
Tabela 6.8	Constituintes químicos da água do mar, água fresca (9-VBET-02-RN) e amostras (Grupos 1 e 2); cálculo da fração de água do mar nas amostras e concentração da mistura conservativa e da reação (troca iônica). Dados obtidos da amostragem representativa do período úmido. Resultados expressos em meq/L (exceto quando indicado).	194

Capítulo I: INTRODUÇÃO

1.1 – REFERENCIAIS TEÓRICOS

Os aquíferos cársticos têm a sua formação e evolução fundamentada por três condicionantes principais (Freeze & Cherry, 1979; Mandel & Shiftan, 1981; Costa, 1990; Domenico & Schwartz, 1990):

- **Tipologia litológica:** As características composicionais das rochas carbonáticas possibilitam que o maciço rochoso seja susceptível ao ataque químico e dissolução dos minerais por águas de precipitação, com formação de porosidade secundária (condutos, canais, cavernas, etc.).
- **Componente estrutural:** As fraturas, falhas e planos de estratificação otimizam os processos de dissolução da rocha na medida em que facilitam a infiltração e aumentam a área de contato da água percolante com os blocos rochosos.
- **Fator climático:** Em climas úmidos, as feições de dissolução de rochas carbonáticas são mais desenvolvidas e ocorre predominantemente próximas a superfície. Em condições de climas secos essas feições desenvolvem-se preferencialmente em subsuperfície e em menor proporção.

A evolução da carstificação está diretamente associada ao fluxo das águas subterrâneas. Num estágio mais avançado de dissolução, a erosão química vai alargando e aprofundando os condutos à medida que o fluxo subterrâneo transporta quimicamente o material dissolvido. Com isso, há um rebaixamento progressivo do nível das águas subterrâneas e evolução vertical dos carstes, que comprova o caráter de interligação dos condutos do sistema cárstico, podendo resultar no surgimento de fontes secas e topograficamente suspensas (Deller, 1999; Goldscheider & Drew, 2007).

Na área de estudo, o aquífero cárstico Jandaíra é condicionado pelo clima semiárido com chuvas reduzidas e elevadas taxas de evaporação, que dificultam o desenvolvimento de cavernas e condutos cársticos superficiais. De fato, em subsuperfície tem-se a ocorrência reduzida de cavidades de dissolução, dada por descontinuidades definidas em sistemas de juntas e/ou planos de estratificação abertos pela dissolução da rocha carbonática (Mistreta, 1984). Os condutos cársticos interligados favorecem a uma superfície hidrostática bem definida e movimento de águas através de fluxo difuso.

A salinidade excessiva do aquífero Jandaíra em alguns setores acarreta num grave problema de gestão, uma vez que torna por limitar ou inviabilizar o uso da água subterrânea para abastecimento humano e utilização agrícola (SERHID, 1998a). Muitas vezes, o consumo humano dessas águas é possibilitado apenas após tratamento pelo processo de dessalinização por osmose reversa.

Atualmente, diversos países localizados principalmente em regiões áridas e semiáridas têm em seu território porções de aquíferos comprometidos pela salinização progressiva de suas águas, destacando-se setores da América do Sul e do Norte, Austrália, China, Índia, regiões do Mediterrâneo e sudeste da Ásia (Salama *et al.*, 1999). Nas regiões costeiras, os problemas relacionados à salinização das águas subterrâneas estão geralmente relacionados com os efeitos da água do mar, seja por intrusão marinha ocasionada por exploração excessiva do aquífero ou por contribuição dos aerossóis marinhos através de sua concentração na água de chuva (Holland, 1978; Berner and Berner, 1996). Secundariamente a salinização pode ser induzida por atividades humanas como a agricultura (Jiang *et al.*, 2009).

1.2 – OBJETIVOS

O presente trabalho de investigação integra informações sobre o clima, a geologia, a hidrogeologia, a geoquímica e o fluxo subterrâneo em três setores da Bacia Sedimentar Potiguar no Rio Grande do Norte.

Os objetivos específicos deste estudo incluem:

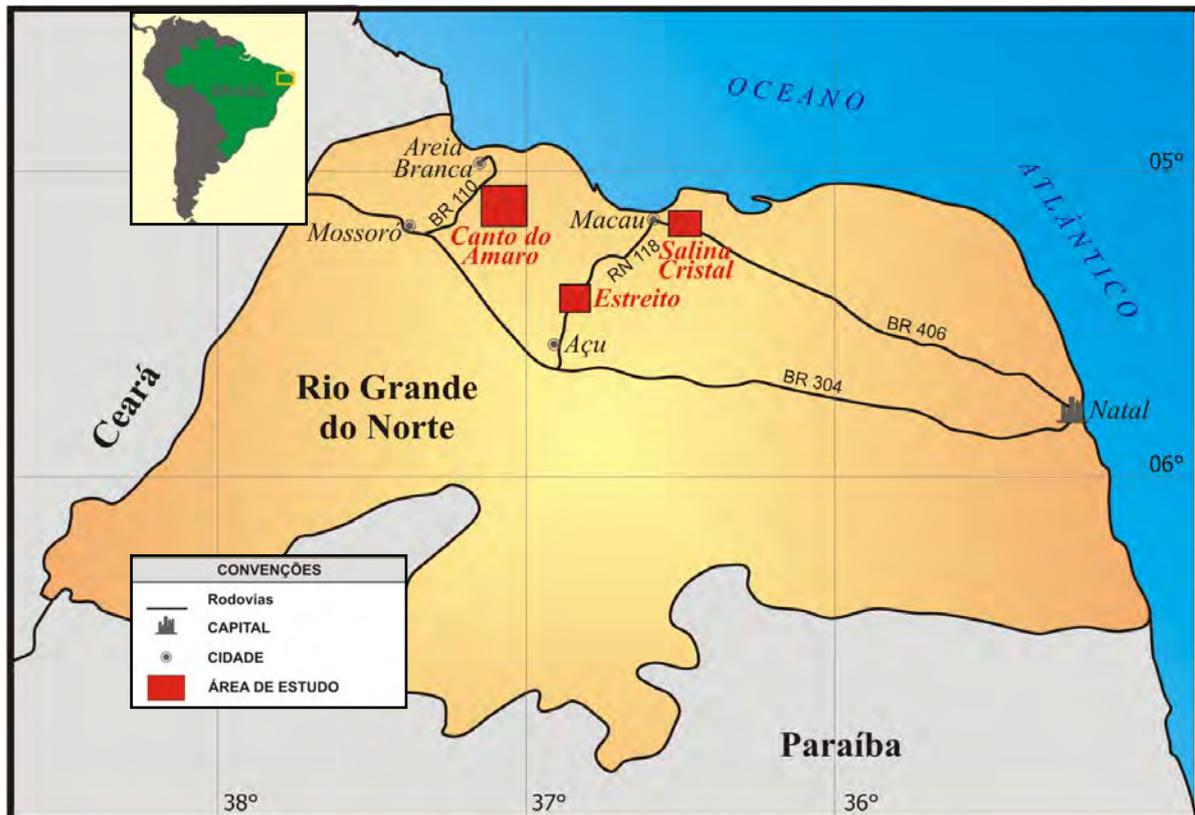
- a contextualização das unidades aquíferas inseridas na área;
- a definição do fluxo subterrâneo do aquífero cárstico Jandaíra;
- o estabelecimento de um modelo hidrogeológico conceitual;
- a avaliação do efeito sazonal na qualidade das águas;
- a interpretação dos principais processos hidrogeoquímicos e mecanismos que controlam a salinização das águas;
- a avaliação da influência da intrusão salina no quimismo das águas subterrâneas;
- a integração das informações hidrogeológicas e geoquímicas para melhor entendimento da ocorrência de água subterrânea na região.

1.3 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Os estudos foram realizados para um conjunto de três áreas selecionadas na parte emersa de ocorrência da Bacia Sedimentar Potiguar, no Estado do Rio Grande do Norte, as quais recebem denominações segundo as localidades geográficas existentes, que são: Canto do Amaro, Estreito e Salina Cristal (**Tabela 1.1**, **Figura 1.1** e **Figura 1.2**).

Tabela 1.1 - Áreas de estudo e características geográficas.

Área de estudo	Municípios parcialmente inseridos	Área (km ²)
Canto do Amaro	Mossoró, Areia Branca e Serra do Mel	378,67
Estreito	Assu e Carnaubais	203,02
Salina Cristal	Macau	192,27
Total		773,96

**Figura 1.1** - Localização das áreas de estudo.

A área de Canto do Amaro está inserida na Bacia Hidrográfica do Apodi/Mossoró, mais precisamente na margem direita do baixo curso do referido rio. As áreas de Estreito e Salina Cristal localizam-se na Bacia Hidrográfica do Piranhas/Açu, a área de Estreito situa-se na margem esquerda do médio a baixo curso do Rio Açu e Salina Cristal na margem direita do baixo curso do Rio Açu.

As **Figuras 1.3 a 1.5** apresentam mapas de detalhe das áreas de estudo. O padrão de ocupação das áreas é predominantemente rural, na forma de pequenas comunidades, onde se destaca a agricultura de subsistência sem o uso de fertilizantes e a atividade pecuária pouco expressiva. As três áreas de estudo mantêm significativas extensões de mata nativa (vegetação de caatinga). No uso do solo destacam-se atividades ligadas à indústria petrolífera, com a locação de poços de produção de petróleo ou poços de injeção de água ou vapor para recuperação secundária de petróleo, principalmente nas áreas de

Canto do Amaro e Estreito. Esses setores podem ser visualizados nas imagens Landsat apresentadas nas **Figuras 1.3 e 1.4**, através da junção de pontos esbranquiçados localizados no setor noroeste de Canto do Amaro e na faixa de direção leste-oeste da área de Estreito.

Localizadas no setor noroeste e norte de Canto do Amaro e Salina Cristal estão as áreas de salinas de produção de sal marinho, onde a água do mar é represada em grandes tanques de evaporação que captam água do mar através de canais. A produção do sal marinho representa uma importante atividade econômica aos municípios de Areia Branca, Mossoró e Macau. Na **Figura 1.6** pode-se visualizar fotografias das áreas de estudo.

1.4 – METODOLOGIA

A presente investigação está estruturada em três grandes tópicos, os quais Condicionamento Climático, Hidrogeologia e Hidrogeoquímica, cujas atividades realizadas em cada um deles consta na descrição que se sucede. Para auxiliar na interpretação dos dados foram utilizados os seguintes recursos computacionais:

- Tratamentos e gráficos estatísticos: *Office Excel 2007*.
- Elaboração de figuras: *CoreIDRAW X5*.
- Mapas de isovalores: *Golden Software Surfer 9*.
- Gráficos e índices hidroquímicos: *AquaChem 5.1 e PREEQC*.

1.4.1 - Condicionamento Climático

Foram obtidos dados hidrometeorológicos das estações em funcionamento na área de estudo, e o respectivo tratamento que teve como objetivo o cálculo do balanço hídrico.

1.4.2 - Hidrogeologia

A avaliação hidrogeológica partiu do reconhecimento das unidades hidroestratigráficas em campo. Essa ação permitiu o planejamento das seguintes atividades:

- execução de 26 sondagens investigativas (10 em Canto do Amaro, 9 em Estreito e 6 em Salina Cristal);
- perfuração de 25 poços de monitoramento, (9 em Canto do Amaro, 8 em Estreito e 8 em Salina Cristal).

Com as informações obtidas nas perfurações (sondagens e poços) foi possível a identificação das principais unidades hidrogeológicas mediante a análise dos perfis litológicos, e a sua compartimentação e distribuição espacial, que culminou na elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual do setor investigado.

Os poços de monitoramento consistiram, efetivamente, no objeto de aquisição dos dados principais, onde foram realizadas as seguintes atividades:

- duas campanhas de medição de nível das águas subterrâneas, para avaliação do efeito sazonal na recarga das águas;
- nivelamento topográfico e obtenção das cotas potenciométricas;
- elaboração de mapa de fluxo das águas subterrâneas.

1.4.3 – Hidrogeoquímica

Nos poços de monitoramento foram realizadas duas campanhas de campo para a coleta de amostras de água, sendo a primeira realizada no mês de janeiro de 2007, período de maior estiagem na área e a segunda realizada no mês de julho de 2007, logo após a época de chuvas, portanto representativo do período úmido.

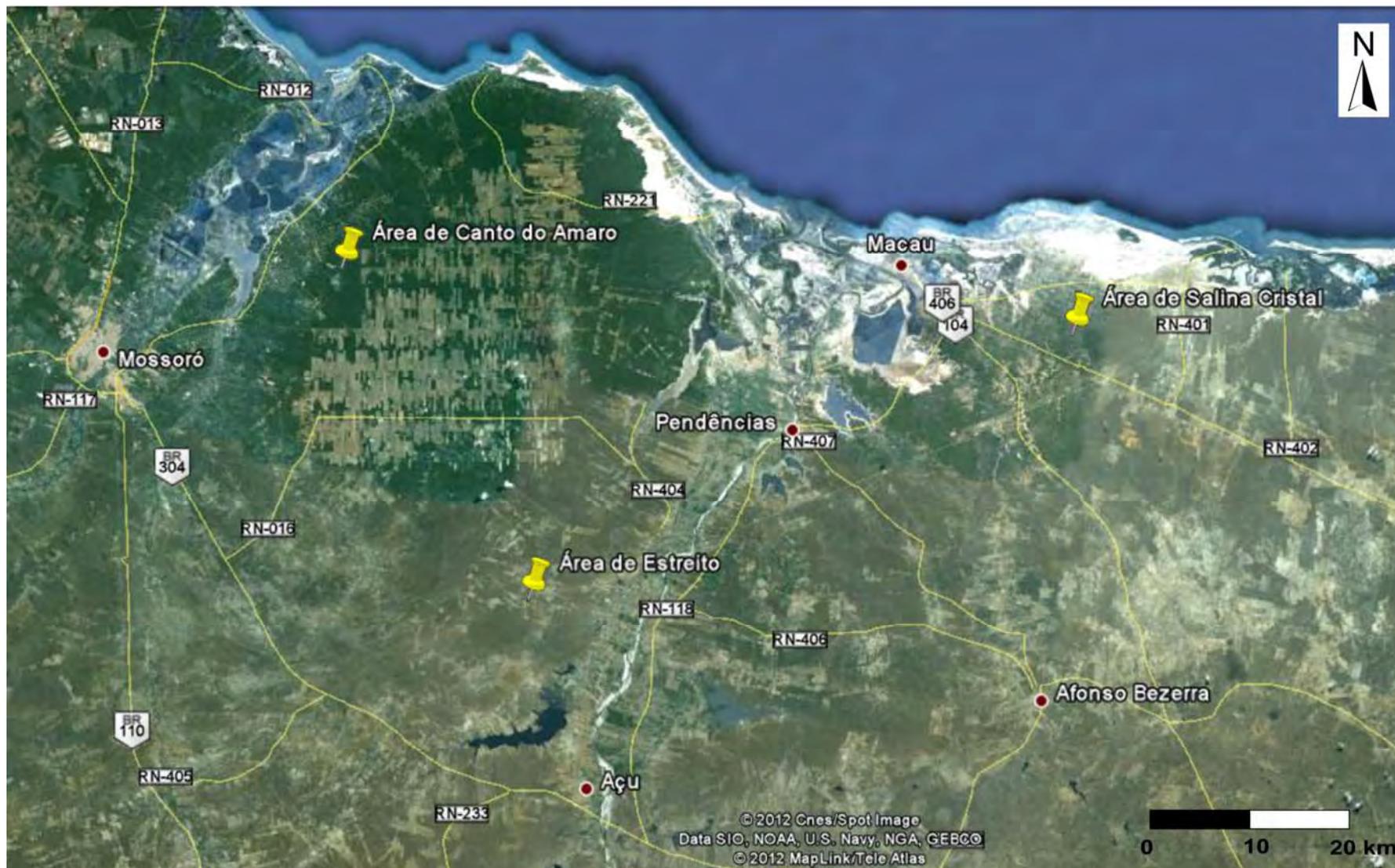


Figura 1.2 - Localização das áreas estudo plotadas em imagem de satélite. Fonte: imagem Google Earth, julho 2012.

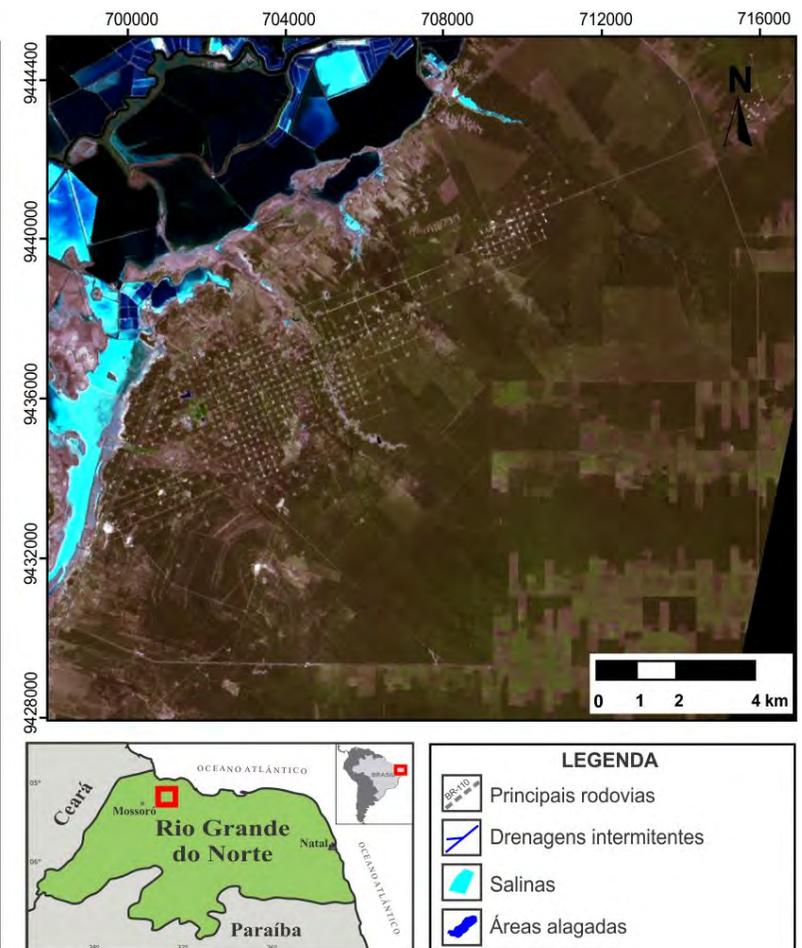
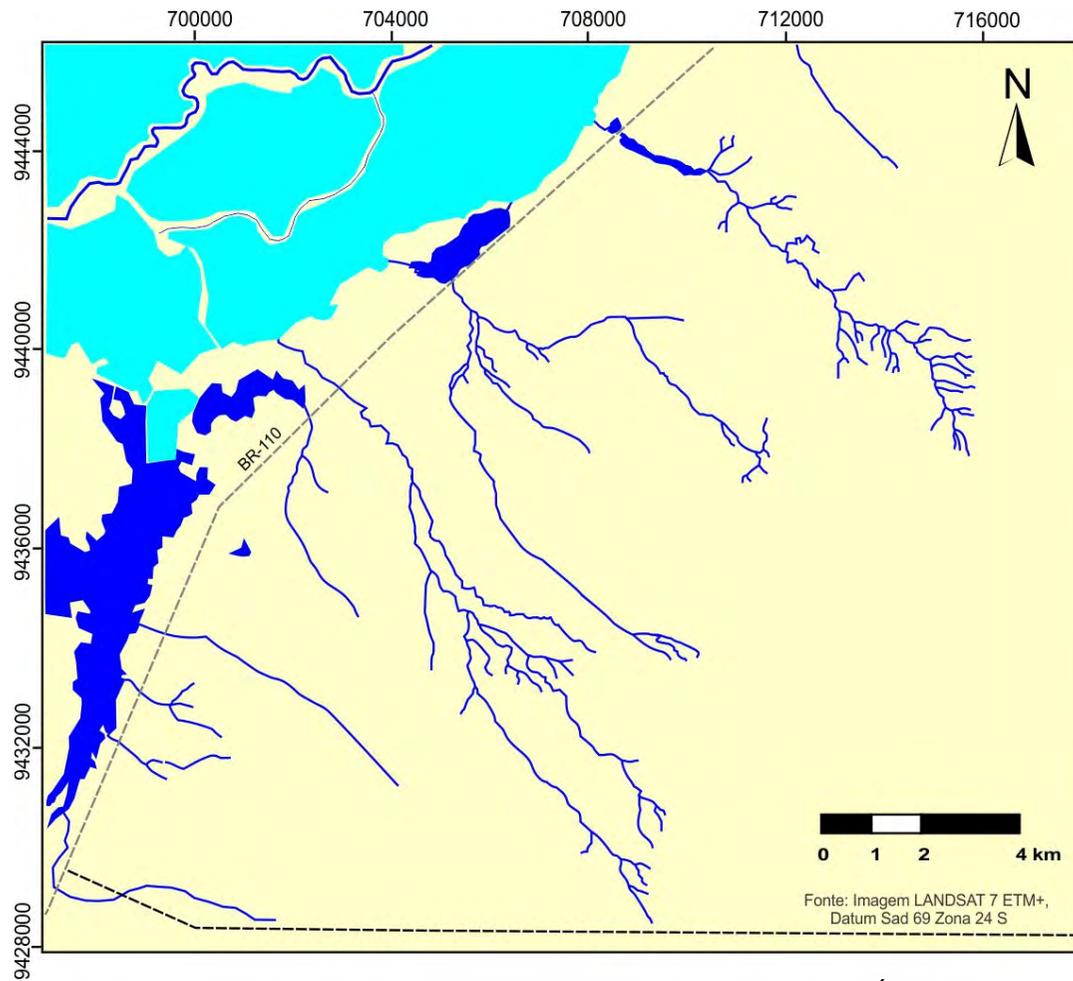


Figura 1.3 – Área de Canto do Amaro.

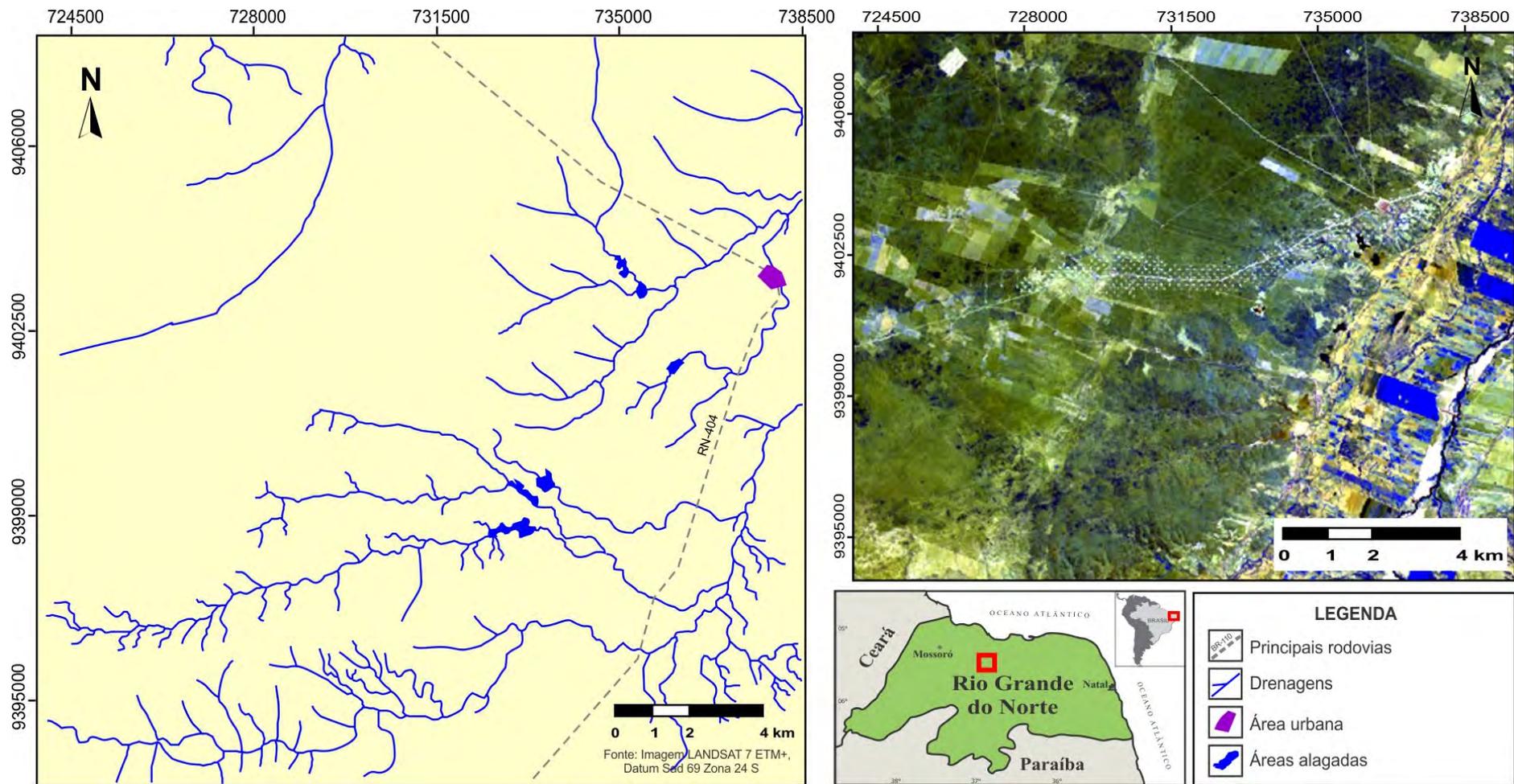


Figura 1.4 – Área de Estreito.

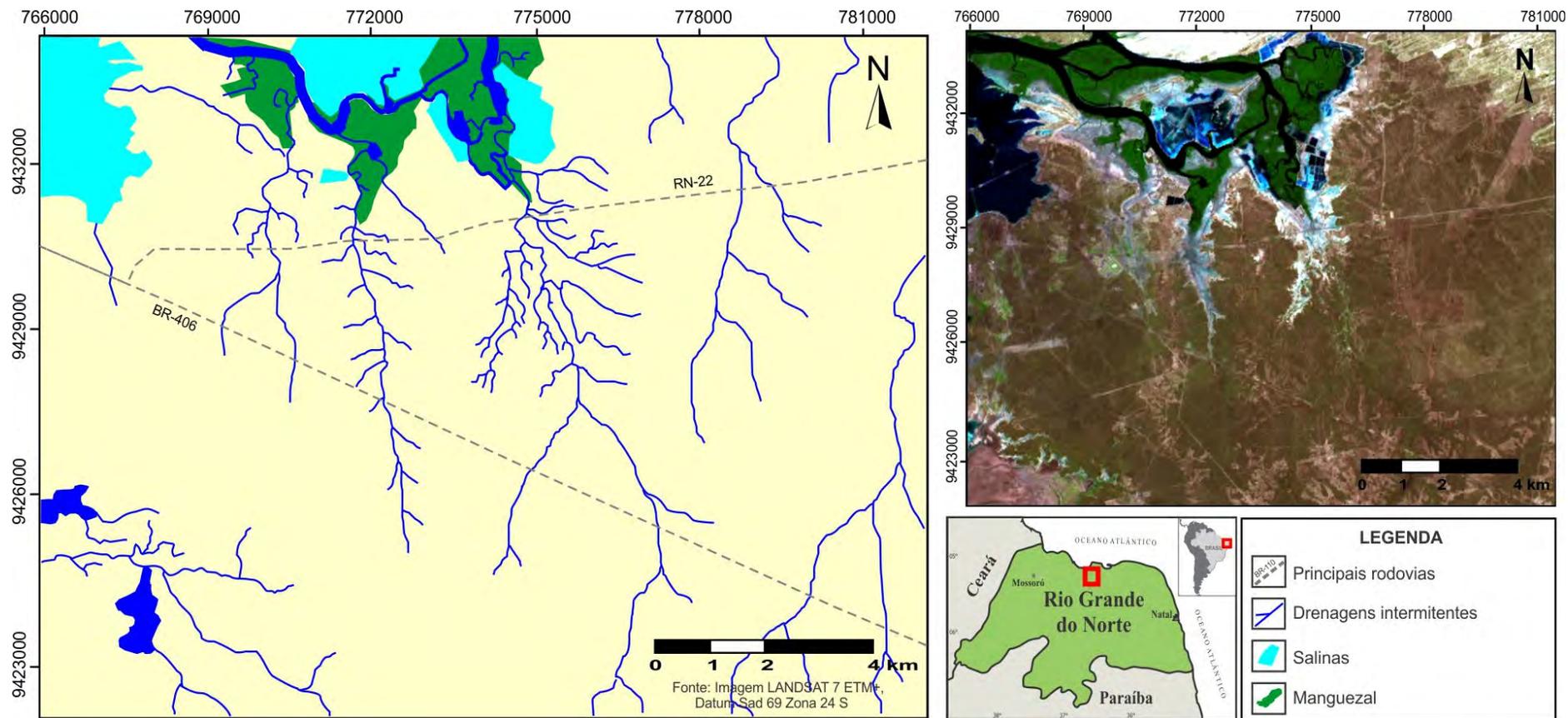


Figura 1.5 – Área de Salina Cristal.



Figura 1.6 – Aspectos de ocupação das áreas de estudo. (Fonte da foto da salina: Site da prefeitura de Macau - <http://www.macau.com.br>).

Capítulo II: CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO

Os aspectos climáticos influenciam na ocorrência, quantidade e qualidade das águas subterrâneas. No presente capítulo serão abordados elementos referentes ao clima da região de estudo, como a precipitação pluviométrica, temperatura, insolação, ventos, umidade relativa do ar, evaporação e evapotranspiração. O objetivo principal é a elaboração do balanço hídrico para a região em apreço, baseado no cálculo das entradas e saídas de água no solo durante o ciclo hidrológico. Além disso, os dados foram utilizados para embasar a análise dos processos de salinização das águas avaliadas.

A caracterização dos elementos climáticos no âmbito estudado se procedeu com a utilização dos dados adquiridos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) através do 3º Distrito de Meteorologia (DISME - SEOMA) e dados da EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio Grande do Norte). Os dados obtidos são apresentados nas **Tabelas 2.1 a 2.3** e ilustrados na **Figura 2.1** e tiveram a seguinte distribuição:

- Normal Climatológica de **Mossoró**: obtido do INMET para o período de 1961 a 1990, e de 2007 apenas para a precipitação pluviométrica. Estação 82591 (latitude: 05°11'S; longitude: 37°20' W);
- Normal Climatológica de **Assú**: obtido da EMPARN para o período de 1993 a 2005, e de 2007 apenas para a precipitação pluviométrica. Estação Agrometeorológica do Município de Ipanguaçu (latitude: 05°25'36"S; longitude: 36°52'18"W);
- Normal Climatológica de **Macau**: obtido do INMET para o período de 1961 a 1990, e de 2007 apenas para a precipitação pluviométrica. Estação 82594 (latitude: 05°07'S; longitude: 36°38' W).

Tabela 2.1- Valores médios mensais dos elementos climáticos no município de Mossoró.

Elementos do clima		Médias Mensais											Média ou Total Anual	
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov		Dez
Precipitação (MM) MÉDIA: 1961-1990		66,5	122,9	186,2	189,3	104,0	56,2	38,2	10,0	6,3	8,6	3,2	20,6	812
Precipitação (mm): 2007		14,7	205,2	386,5	141,2	106,5	42,4	5,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	905,1
Temperatura (°C): 1961-1990	Mínima	20,5	18,8	18,5	16,2	18,0	18,4	18,0	16,9	17,1	17,6	18,9	20,8	16,2
	Máxima	37,3	38,3	37,6	37,1	36,8	37,4	36,4	37,2	37,8	37,8	37,8	37,8	38,3
	Média	28,3	27,8	27,2	27,2	27,0	26,6	26,5	27,1	27,7	28,0	28,2	28,8	27,5
Evaporação (mm): 1961-1990		191,6	149,1	106,4	100,0	111,3	126,5	162,8	213,9	233,7	224,6	237,3	225,5	2082,6
Insolação (horas): 1961-1990		234,9	196,2	191,0	192,9	220,1	218,7	232,6	268,2	271,3	295,3	284,0	259,3	2864,7
Umidade Relativa (%): 1961-1990		68	71	79	78	76	72	69	62	60	61	63	62	68
Ventos: 1961-1990	Velocidade (m/s)	4,6	3,6	3	2,4	2,5	2,6	2,9	3,9	5	5,5	5,8	4,9	3,9
	Direção predominante	NE/E	E/E	NE	E	S	SE/E	SE/S	SE/NE	SE/NE	SE/NE	NE/E	NE/E	-

Tabela 2.2 - Valores médios mensais dos elementos climáticos no município de Assú.

Elementos do clima		Médias Mensais											Média ou Total Anual	
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov		Dez
Precipitação (mm) média: 1993-2005		62,6	89,44	160,2	129,7	91,1	43,3	26,3	7,5	4,66	3,85	5,25	15,63	639,5
Precipitação (mm): 2007		41,3	304,0	147,3	142,3	86,2	24,3	1,1	0	0	0	0	0	746,5
Temperatura (°C) 1993-2005	Mínima	21,3	21,7	21,4	21,2	20,7	19,7	19,6	18,4	18,9	19,9	20,3	20,5	20,30
	Máxima	35,6	35,7	34,2	33,7	33,7	33,6	34,1	35,2	36,2	36,7	36,5	36,5	35,13
	Média	28,6	28,6	28,0	27,5	27,3	26,6	26,4	26,7	27,2	28,2	28,2	28,3	27,64
Evaporação (mm): 1993-2005		249,0	219,3	206,3	186,0	194,8	181,7	215,7	275,7	298,8	313,5	291,7	287,3	2919,9
Insolação (horas): 1993-2005		236,4	223,8	215,4	208,8	231,8	206,8	225,7	269,9	281,3	300,1	288,1	274,1	2900,4
Umidade Relativa (%): 1993-2005		66,2	67,6	75,3	76,3	72,6	69,2	64,0	56,4	54,8	54,5	56,5	59,1	64,4

Tabela 2.3 - Valores médios mensais dos elementos climáticos no município de Macau.

Elementos do clima		Médias Mensais											Média ou Total Anual	
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov		Dez
Precipitação (mm) média: 1961-1990		31,8	66,2	141,4	173,7	86,7	36,6	32,0	8,4	5,4	1,0	3,6	11,0	597,8
Precipitação (mm): 2007		26	165,4	73,3	69,1	74,1	28,9	4,5	0,8	0	0	0	0	442,1
Temperatura (°C) 1961-1990	Mínima	22,9	23,0	23,1	22,9	22,5	22,0	21,2	21,2	21,6	21,9	22,1	22,9	22,3
	Máxima	31,2	31,3	31,2	31,3	31,4	31,3	30,9	31,7	31,9	31,5	31,1	31,2	31,3
	Média	27,4	27,4	27,4	27,2	27,0	26,5	26,1	26,3	26,7	27,0	27,1	27,4	27
Evaporação (mm): 1961-1990		229,2	180,5	182,9	188,6	202,3	195,9	207,5	247,4	246,1	266,8	250,2	222,5	2620,0
Insolação (horas): 1961-1990		200,5	163,7	163,8	148,9	171,0	176,7	196,0	239,2	248,9	234,0	213,8	198,2	2354,5
Umidade Relativa (%): 1961-1990		71	73	74	76	76	73	72	69	68	69	69	70	72
Ventos: 1961-1990	Velocidade (m/s)	6,1	5,3	4,7	4,4	4,6	5,0	5,5	6,5	7,0	7,1	6,7	6,5	5,8
	Direção predominante	E/NE	E/NE	E/NE	E/NE	SE/E	SE/E	SE/E	SE/E	E/NE	E/NE	E/NE	E/NE	-

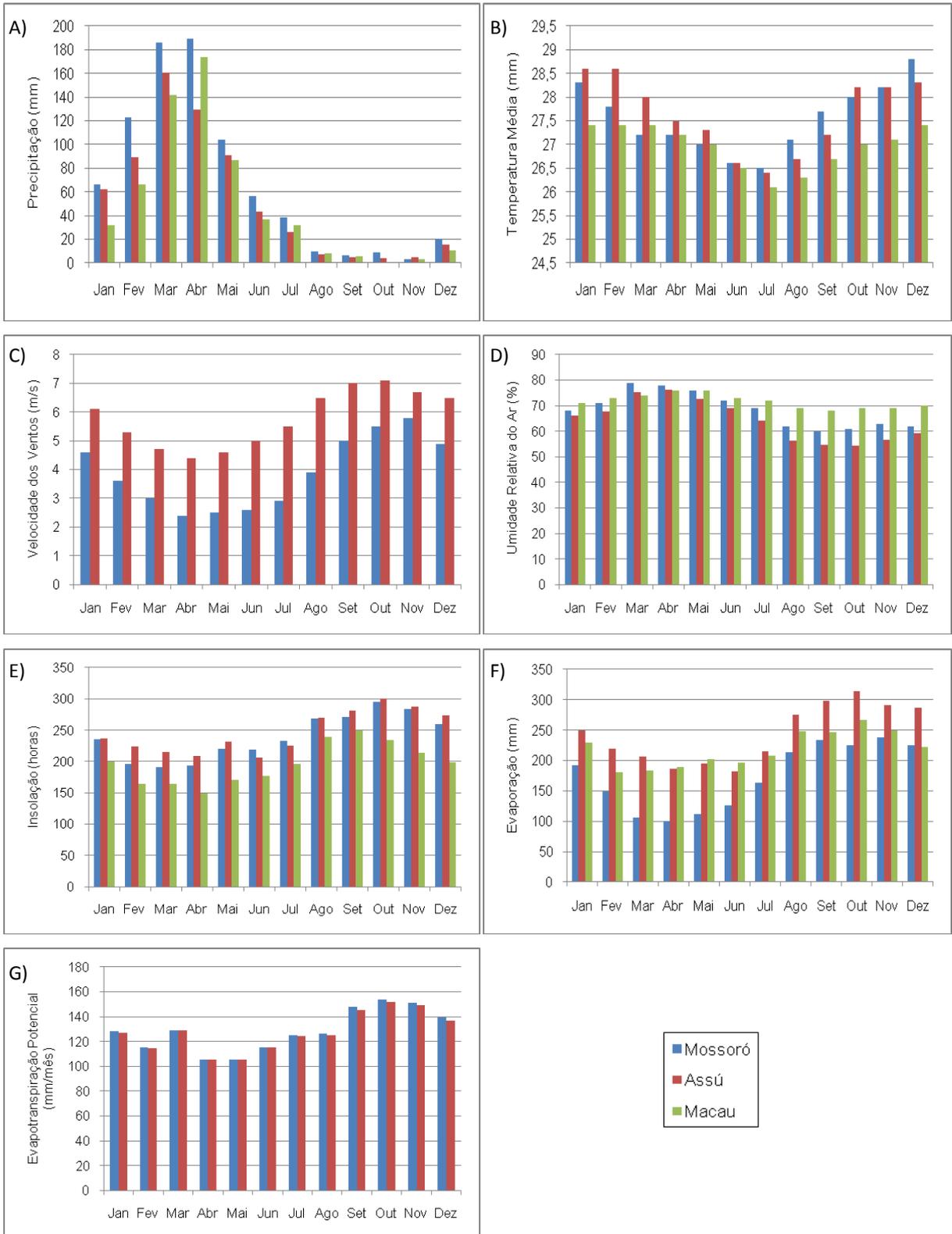


Figura 2.1 – Gráficos dos principais elementos climatológicos.

2.1 – ELEMENTOS DO CLIMA

2.1.1 – Precipitação Pluviométrica

Na **Figura 2.1**, gráfico A, é apresentado um comparativo da evolução mensal da precipitação pluviométrica nas áreas de trabalho.

Na análise da série histórica da precipitação total anual (**Tabelas 2.1 a 2.3**) observa-se que os maiores valores correspondem ao município de Mossoró (812 mm), seguido de Assú (639,5 mm) e por fim Macau (597,8 mm). Essa mesma tendência é observada nos dados isolados obtidos para o ano de 2007 (**Figura 2.2**) (Mossoró: 905,1 mm; Assú: 746,5 mm e Macau: 442,1mm) que corresponde ao ano de execução desse estudo, embora o total anual se apresente mais elevado quando comparado às séries históricas.

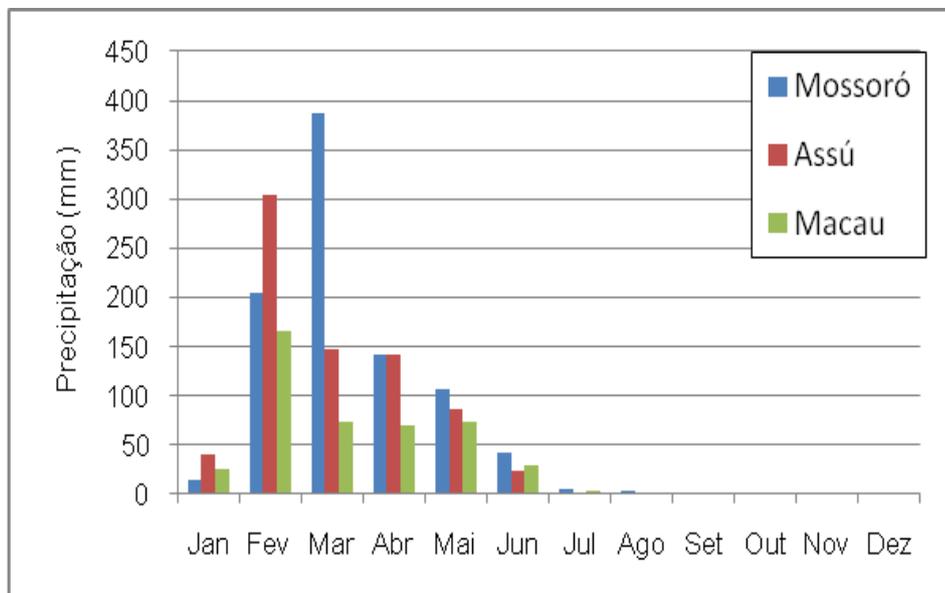


Figura 2.2 – Evolução mensal da precipitação pluviométrica no ano de 2007.

De acordo com o gráfico comparativo as precipitações médias mensais históricas, considerando as três áreas, apresentam similaridade nos resultados apresentados. Fica caracterizado um período chuvoso de janeiro a junho e um período de estiagem que se estende de julho até dezembro com baixíssimos índices de precipitação pluviométrica. Entre abril e junho, ao final da época chuvosa, é provável que as chuvas já tenham superado a capacidade de retenção e atendido as demandas do solo, necessárias ao escoamento superficial e infiltração para recarga dos aquíferos.

2.1.2 – Temperatura

Na **Figura 2.1**, gráfico B, são representados os valores da temperatura média mensal, que nas três áreas de estudo são bastante similares: da ordem de 27°C. De um

modo geral, os menores valores mensais de temperatura média são encontrados no município de Macau.

Na análise conjunta dos dados verifica-se que os menores valores de temperatura média mensal estão entre os meses de junho e julho e coincidem com o final da quadra chuvosa. Nos demais meses, a temperatura média apresenta pouca oscilação.

2.1.3 – Ventos

Os dados relativos aos ventos no âmbito estudado pertencem aos municípios de Mossoró e Macau, inexitem informações para Assú.

Predominam nas áreas duas direções preferenciais de ventos:

- Entre os meses de maio a julho a direção predominante do vento é do quadrante SE, trazidos pela Massa Tropical Atlântica (mEa);
- Entre os meses de setembro a abril domina a direção NE, com ventos relacionados à Massa Equatorial Continental (mEc).

Na **Figura 2.1**, gráfico C, pode-se verificar que a velocidade média mensal dos ventos é bastante superior em Macau (5,8 m/s) quando comparado a Mossoró (3,9 m/s). De um modo geral, os ventos atingem as maiores velocidades médias mensais na época de temperatura elevadas e escassez de chuvas (estação seca).

2.1.4 – Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar média nas três áreas de estudo é de 68%. Na **Figura 2.1**, gráfico D, observa-se que os valores mensais ao longo do ano não apresentam variações significativas. Entretanto, pode-se afirmar que os maiores valores de umidade relativa do ar coincidem com as épocas de maior precipitação pluviométrica, maior temperatura média mensal e menor velocidade de ventos.

2.1.5 – Insolação

A insolação total anual é maior no município de Assu (2900 horas), seguido de Mossoró (2865 horas) e Macau (2354 horas). Da análise da **Figura 2.1**, gráfico E, verifica-se que os meses de maior insolação correspondem às épocas de estiagem, maiores temperaturas médias, maior intensidade de ventos e menor umidade relativa do ar.

2.1.6 – Evaporação

A evaporação total anual é maior no município de Assú (2920 mm), seguido de Macau (2620 mm) e Mossoró (2083 mm). Na **Figura 2.1**, gráfico F, observa-se que ocorre maior evaporação nos meses de menor precipitação pluviométrica, maior temperatura média, maior intensidade de vento, menor umidade relativa do ar e maior insolação.

2.1.7 – Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração é a evaporação da água causada pela radiação solar e a transpiração da água nas folhas das plantas. A evapotranspiração potencial (ETp), para Thornthwaite (1944) *apud* Fetter (1994) corresponde a perda de água que irá ocorrer se não houver em nenhum momento falta de água no solo para o uso da vegetação. Enquanto a evapotranspiração real (ETr) é a quantidade de água que realmente volta à atmosfera por evaporação e transpiração. A Etp é calculada por fórmulas empíricas, no presente caso foi utilizada a fórmula de Turc (Castany, 1975 e Fetter 1994) e a Etr estimada através do balanço hídrico de Thornthwaite (Castany, 1975 e Fetter 1994).

O principal objetivo para a determinação da ETp é o estabelecimento do balanço hídrico, o qual deve englobar dados de séries históricas significativas. O município de Assú não foi considerado nessa avaliação, justamente por contar com dados históricos de apenas 13 anos, enquanto que Mossoró e Macau possuem dados de 30 anos. Seguramente, os resultados obtidos para Mossoró e Macau podem ser extrapolados para Assú conforme foi verificado da análise dos parâmetros climatológicos ao longo do presente capítulo, os quais se apresentam semelhantes para as três áreas de trabalho.

Os resultados do cálculo da ETp são apresentados na **Tabela 2.4** e a evolução mensal desse parâmetro ao longo do ano é ilustrada na **Figura 2.1**, gráfico G.

Tabela 2.4 - Evapotranspiração Potencial (mm)

Mês	Mossoró	Macau
Jan	128,10	126,66
Fev	115,36	114,77
Mar	128,91	129,25
Abr	105,71	105,71
Mai	105,43	105,43
Jun	115,10	114,94
Jul	125,16	124,47
Ago	126,17	124,81
Set	147,91	145,10
Out	153,67	151,71
Nov	151,44	149,34
Dez	139,40	137,00
Total Anual	1542,36	1529,19

2.2 – BALANÇO HÍDRICO E CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

O Balanço Hídrico apresentado segue a metodologia desenvolvida por Thornthwaite, cujo princípio se baseia na conservação de massa, ou seja, a diferença entre o ganho (precipitação) e o consumo (escoamento superficial e profundo, evaporação ou evapotranspiração) do sistema (área geográfica). Nas **Figuras 2.3** e **2.4** constam as

representações gráficas do Balanço Hídrico e nas **Tabelas 2.5** e **2.6** constam os dados e resultados do cálculo.

Verifica-se que o início das precipitações se dá entre os meses de março e abril, época marcada pela entrada de água no solo. Parte das chuvas precipitadas e infiltradas vão se acumulando como uma frente de umidade no subsolo, cuja resposta no lençol freático deverá se dar com certo retardo. Com o declínio das precipitações a partir de maio inicia-se a retirada de água do solo. As reservas são esgotadas no mês de julho e agosto, caracterizando o período de déficit hídrico que se estende até fevereiro, marcado por poucas precipitações e intensa evapotranspiração.

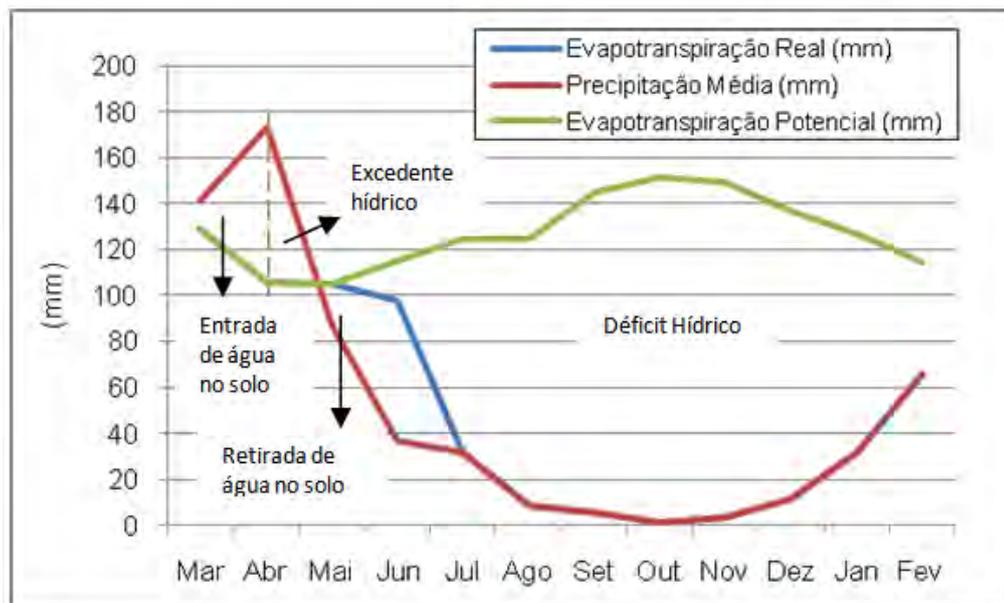


Figura 2.3 - Representação gráfica do Balanço Hídrico mensal pelo método de Thornthwaite, com base nos dados climáticos da Estação de Mossoró/RN.

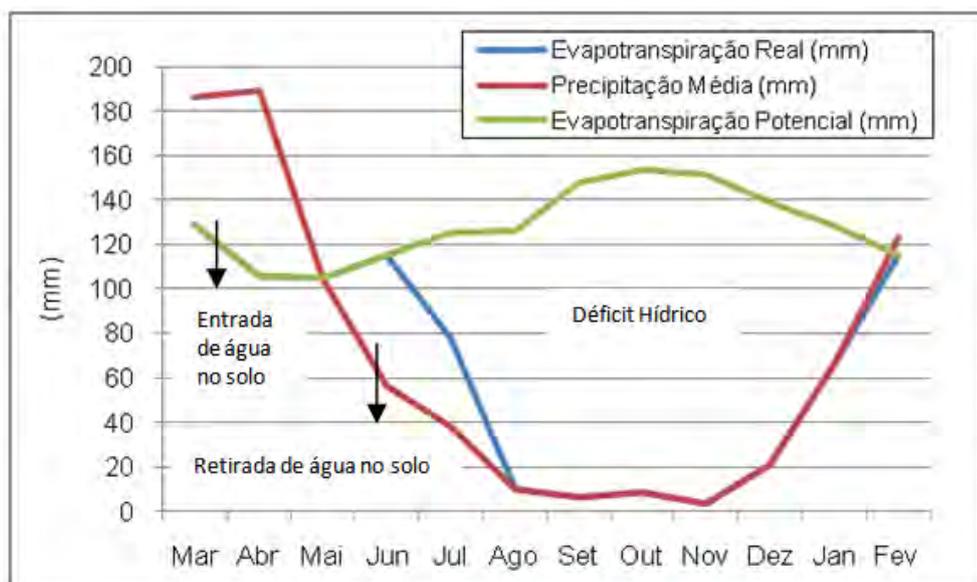


Figura 2.4 - Representação gráfica do Balanço Hídrico mensal pelo método de Thornthwaite, com base nos dados climáticos da Estação de Macau/RN.

Visando estabelecer uma classificação climática para a região em apreço, utilizaram-se os resultados obtidos no balanço hídrico, fundamentados no sistema de classificação de Thornthwaite. Os índices foram obtidos a partir das equações detalhadas a seguir e os resultados estão apresentados na **Tabela 2.7**.

- **Índice de umidade (Ih)**: resultante de seguinte equação:

$$I_h = 100 \frac{S}{ET_p} \quad \text{Onde, S é o excedente e } ET_p \text{ é a evapotranspiração potencial.}$$

- **Índice de aridez (Ia)**: obtido conforme a seguinte equação:

$$I_a = 100 \frac{D}{ET_p} \quad \text{Onde, D é o déficit hídrico e } ET_p \text{ é a evapotranspiração potencial.}$$

$$i = \frac{(S * 100) - (D * 60)}{ET_p} \quad \text{Onde, S é o excedente, D é o déficit hídrico e } ET_p \text{ é a evapotranspiração potencial.}$$

- **Índice de umidade efetiva (i)**: determina o tipo climático, e pode ser estimado por meio da relação entre o excesso e o déficit hídrico, e a necessidade de potencial de água:

Tabela 2.5 - Balanço Hídrico pelo Método de Thornthwaite. Estação Climatológica de Mossoró/RN (1961 – 1990).

Parâmetro	Mês												Total anual
	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	
Precipitação (mm)	122,9	186,2	189,3	104,0	56,2	38,2	10,0	6,3	8,6	3,2	20,6	66,5	812,0
ETP	115,4	128,91	105,71	105,4	115,1	125,2	126,17	147,91	153,67	151,44	139,40	128,1	1542,36
P – ETP	7,54	57,29	83,59	-1,43	-58,9	-86,96	-116,17	-141,61	-145,07	-148,25	-118,8	-61,6	-730,37
ΔH_2O Solo	+7,54	+57,29	+35,17	-1,43	-58,9	-39,67	----	----	----	----	----	----	-----
Reserva água útil (mm)	7,54	64,83	100,00	98,57	39,67	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-----
ETR	115,4	128,91	105,71	105,4	115,1	77,87	10,0	6,3	8,6	3,2	20,6	66,5	763,58
Déficit hídrico (D)	----	----	-----	----	----	47,29	116,17	141,61	145,07	148,25	118,8	61,6	778,79
Excedente hídrico (S)	----	----	48,42	----	----	---	---	---	---	---	---	----	48,42
Escoamento (R)	0,0	0,0	24,21	12,11	6,00	3,0	1,5	0,75	0,38	0,19	0,094	0,05	48,28

Tabela 2.6 - Balanço Hídrico pelo Método de Thornthwaite. Estação Climatológica de Macau/RN (1961 – 1990).

Parâmetro	Mês												Total anual
	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	
Precipitação (mm)	66,2	141,4	173,7	86,7	36,6	32,0	8,4	5,4	1,0	3,6	11,0	31,8	597,8
ETP	114,77	129,25	105,71	105,43	114,94	124,47	124,81	145,10	151,71	149,34	137,0	126,66	1529,19
P – ETP	-48,57	12,15	67,99	-18,73	-78,34	-92,47	-116,4	-139,70	-150,71	-145,74	-126,0	-94,86	-931,39
ΔH_2O Solo	----	+12,15	+67,99	-18,73	-61,41	---	----	----	----	----	----	---	-----
Reserva água útil (mm)	0,0	12,15	80,14	61,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-----
ETR	66,2	129,25	105,71	105,43	98,01	32,0	8,4	5,4	1,0	3,6	11,0	31,8	597,8
Déficit hídrico (D)	48,57	----	----	----	16,93	92,47	116,41	139,70	150,71	145,74	126,0	94,86	931,39
Excedente hídrico (S)	-----	-----	----	0,0	0,0	---	---	---	---	---	---	----	0,0
Escoamento (R)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 2.7 - Cálculo de índices climáticos.

Índices	Mossoró	Macau
Umidade (Ih)	3,1	0
Aridez (Ia)	50,5	60,9
Umidade efetiva (i)	- 27,2	- 36,54

O clima segundo o índice de umidade efetiva e quanto à evapotranspiração potencial é classificado de acordo com a **Tabela 2.8**.

Tabela 2.8 – Classificação Climática.

Tipo Climático	i	Tipo Climático	Etp
Muito úmido	$i > 100$	Megatérmico	> 1140
Úmido	20 a 100	Mesotérmico	1140 a 570
Sub-úmido úmido	0 a 20	Microtérmico	570 a 142
Sub-úmido seco	- 20 a 0	Gelo	< 142
Semiárido	- 40 a - 20		
Árido	- 60 a - 40		
Híper-árido	$i < - 60$		

Com base nos valores encontrados, o clima na região estudada (Mossoró, Macau e extrapolação para Assú) é classificado como Semiárido Megatérmico.

Capítulo III: CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

3.1 - GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia Potiguar localiza-se na porção setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, com uma pequena porção na parte leste do Estado do Ceará (Figura 3.1). Apresenta-se como a mais oriental das bacias da Margem Equatorial Brasileira, estando a sua origem relacionada a uma série de bacias intracontinentais que compõem o Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro, geneticamente ligado à abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior (Matos, 1987). Geologicamente, é limitada a sul, leste e oeste pelo embasamento cristalino Pré-Cambriano, estendendo-se ao domínio marinho para norte até a isóbata de 2.000 m. O Alto de Fortaleza define seu limite oeste com a Bacia do Ceará, enquanto que o Alto de Touros define seu limite leste. A bacia abrange uma área de aproximadamente 48.000 km² sendo que 21.500 km² (45%) encontram-se emersos e 26.500 km² (55%) submersos (Pessoa Neto *et al.* 2007).

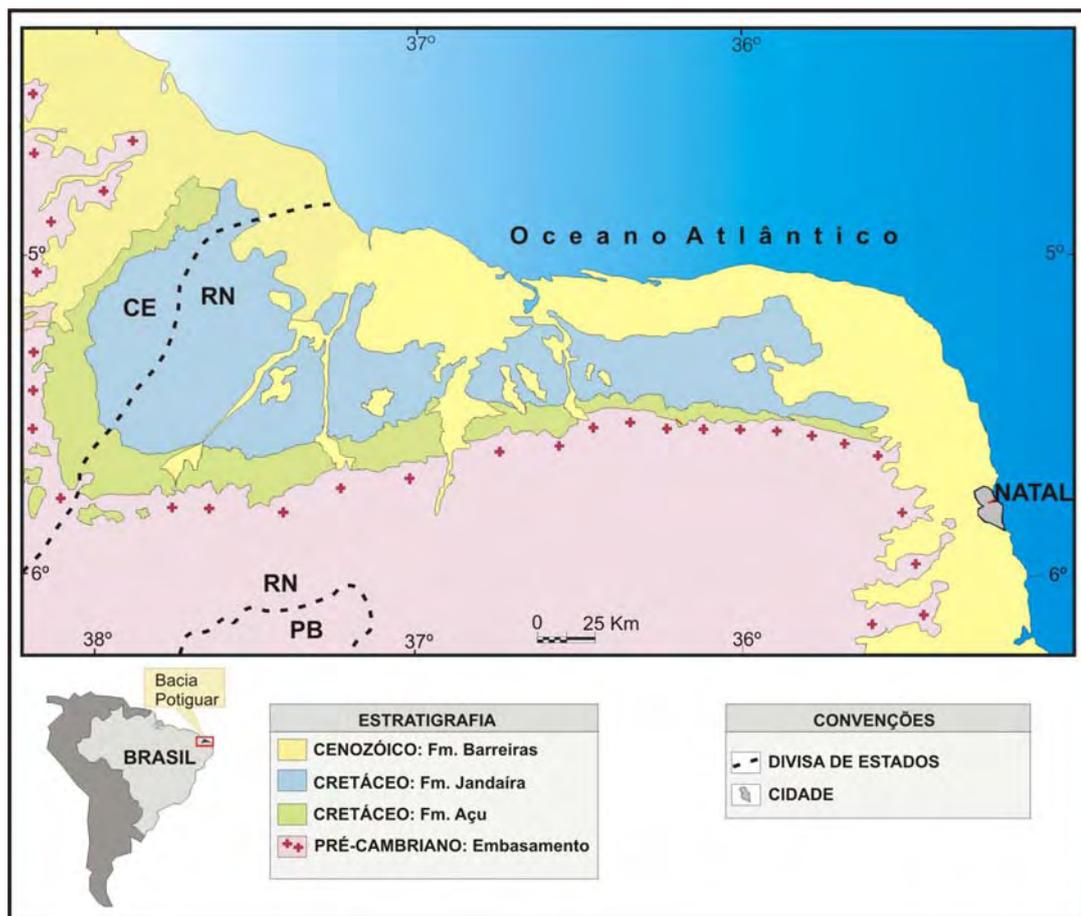


Figura 3.1 - Localização da Bacia Potiguar, com suas principais formações estratigráficas aflorantes na sua parte emersa (adaptado de Dantas, 1998).

O arcabouço estrutural da bacia é composto por três unidades básicas: *grabens*, altos internos e plataformas do embasamento (**Figuras 3.2 e 3.3**), sendo preenchidas por seqüências sedimentares neocomianas a terciárias distintas para cada compartimento morfo-estrutural. Os *grabens* na porção terrestre possuem orientação regional NE-SW e na porção submersa apresentam-se aproximadamente paralelos a linha de costa atual. Os altos internos constituem cristas alongadas do embasamento cristalino que separam os principais *grabens*. A leste e a oeste dos *grabens* centrais ocorrem as plataformas rasas do embasamento, denominadas respectivamente de Touros e Aracati (Bertani *et al.*, 1990).

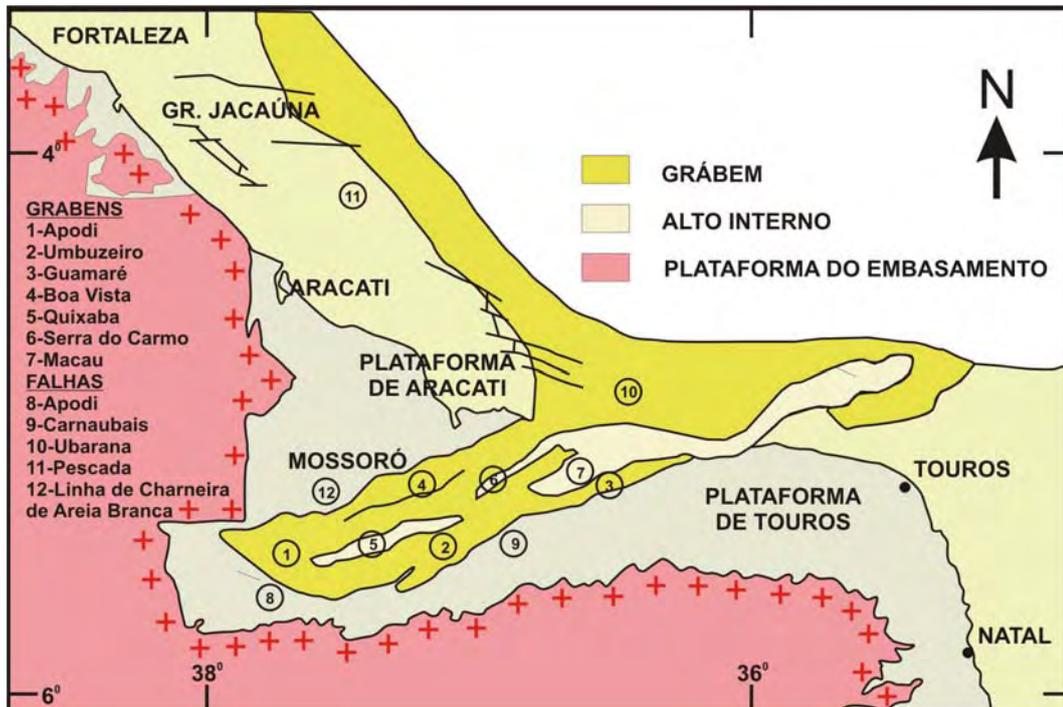


Figura 3.2 - Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar (adaptado de Bertani *et al.*, 1990).

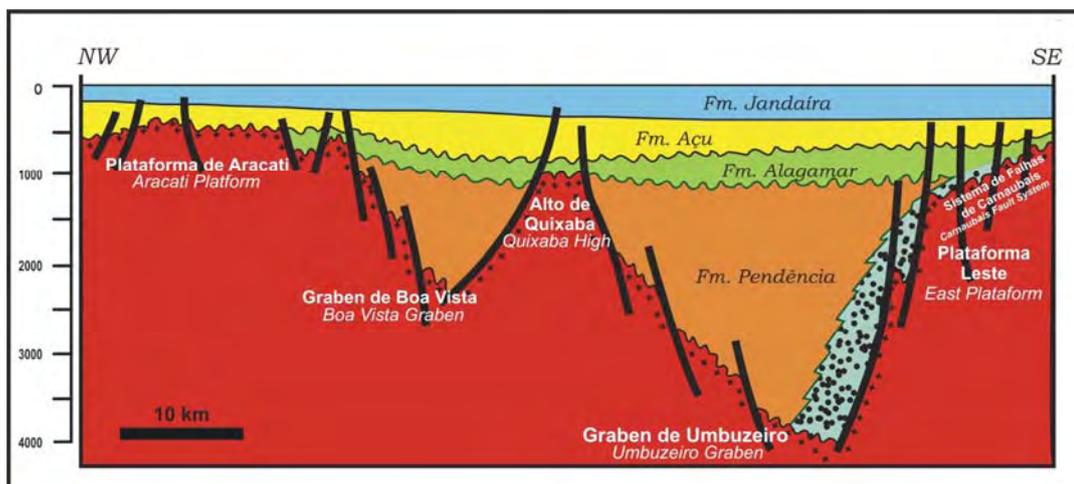


Figura 3.3 - Seção típica da Bacia Potiguar, mostrando seu estilo estrutural e estratigráfico em terra. (Bertani *et al.*, 1990).

O registro estratigráfico inclui três superseqüências: uma Superseqüência Rifte, depositada no Cretáceo Inferior; uma Superseqüência Pós-rifte, depositada durante o Andar Alagoas; e uma Superseqüência Drifte, depositada entre o Albiano e o Recente (Pessoa Neto *et al.* 2007) (**Figura 3.4**):

- (i) A **Superseqüência Rifte** é representada pelos depósitos flúvio-deltaicos e lacustres das Formações Pendência e Pescada (Berriasiano/Eo-Aptiano);
- (ii) A **Superseqüência Pós-rifte** é caracterizada pela deposição de uma Seqüência flúvio-deltaica, com os primeiros registros de ingressão marinha (Formação Alagamar);
- (iii) A **Superseqüência Drifte** é caracterizada por uma seqüência flúvio-marinha transgressiva (Formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas, Jandaíra e Ubarana) recoberta por uma seqüência clástica e carbonática regressiva (Formações Ubarana, Tibau e Guamaré). Rochas vulcânicas associadas à Formação Macau foram depositadas entre o Eoceno e o Oligoceno na bacia.

O preenchimento sedimentar da Bacia Potiguar está intimamente relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica: duas fases de rifteamento (Rifte I e Rifte II), cujo registro estratigráfico é correspondente ao conjunto de seqüências continentais que compõem a Superseqüência Rifte; uma fase aqui denominada pós-Rifte, que corresponde a Superseqüência do mesmo nome, e a fase Termal constituída pelos conjuntos de seqüências marinhas transgressivas e regressivas, que compõem a Super seqüência Drifte (Pessoa Neto *et al.* 2007).

No âmbito de sua sedimentação, a Bacia Potiguar é marcada por três eventos magmáticos (Pessoa Neto *et al.* 2007):

- (i) **Formação Rio Ceará Mirim**: ocorre na forma de diques de diabásio com forte orientação E-W no embasamento adjacente à borda sul da Bacia Potiguar. Este enxame de diques está relacionado à gênese do rifte. A ocorrência de rochas vulcanoclásticas intercaladas aos sedimentos da porção basal da Formação Pendência, na porção emersa da bacia, também é correlacionada com este evento.
- (ii) **Formação Serra do Cuó**: definido com base em afloramento localizado na borda sul da Bacia Potiguar, ocorre na forma de derrames de basalto com tendência alcalina.

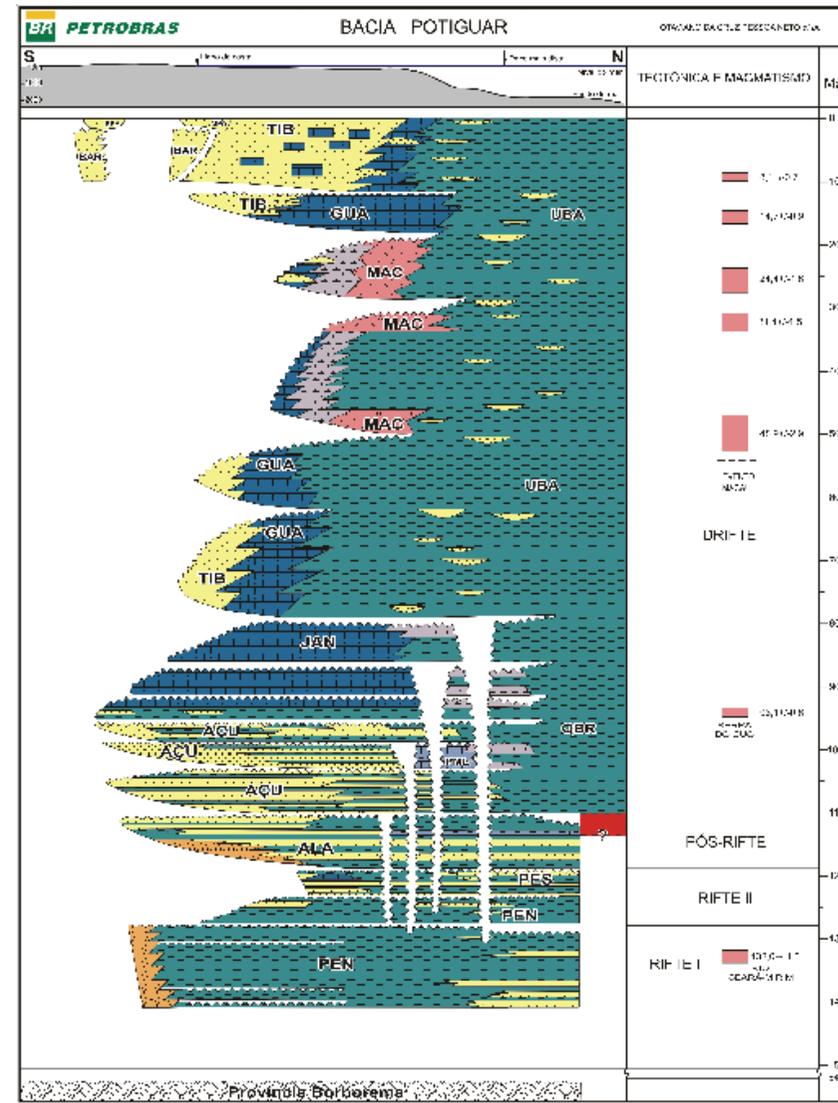
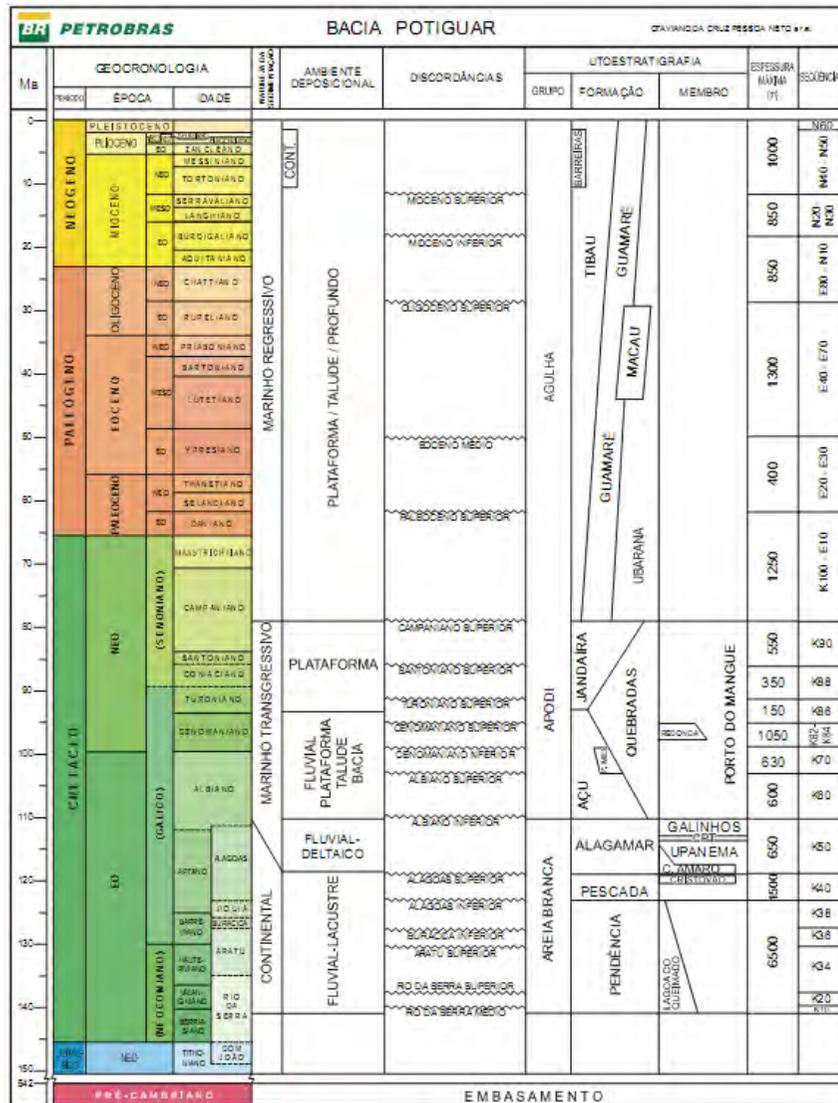


Figura 3.4 – Coluna Estratigráfica da Bacia Potiguar (Pessoa Neto *et al.* 2007).

- (iii) **Formação Macau:** ocorre intercalado aos sedimentos da seqüência regressiva e no embasamento adjacente à bacia. As rochas magmáticas são principalmente olivina-basaltos que ocorrem sob diversas formas no Alinhamento Macau – Queimadas (AMQ). A espessura total desses derrames atinge até 1.500 m na região dos cânions de Agulha e Ubarana, evidenciando a grande magnitude desse evento. A origem desse vulcanismo pode estar associada à passagem da margem equatorial sobre o *hot spot* de Fernando de Noronha ou ainda estar relacionado à colocação de magmas em zonas de alívio, a partir de ajustes tectônicos intraplaca.

Além das unidades estratigráficas mostradas na **Figura 3.4**, a Bacia Potiguar possui ainda sedimentos quaternários sub-recentes e recentes (Farias, 1998). Os sedimentos sub-recentes são representados por *beach rocks*, dunas fixas, colúvios e cascalheiras e também pela Formação Potengi (arenitos). Os sedimentos recentes são representados por dunas móveis, aluviões, sedimentos praias e sedimentos de planície de maré.

Os campos de óleo e gás situam-se essencialmente em reservatórios siliciclásticos depositados durante as fases rifte, transicional e drifte. Em cada seqüência, o habitat do óleo está relacionado a estilos estruturais e tipos de reservatórios específicos. As trapas atuantes nos prospectos da Bacia Potiguar são predominantemente do tipo estrutural ou combinado estrutural-estratigráfico, ocorrendo também paleogeomórficos (Bertani *et al.*, 1990).

3.2 - GEOLOGIA LOCAL

A **Figura 3.5** apresenta o mapa das unidades geológicas aflorantes da área de estudo, obtido de CPRM (2006) realizado na escala 1:500.000. A seguir são descritas as principais unidades mapeadas em campo no âmbito do presente estudo, as quais nem todas estão individualizadas no referido mapa, devido à escala adotada pela CPRM.

Os dados coletados em campo permitiram identificar seqüências sedimentares siliciclásticas e carbonáticas, as quais:

- (i) **Depósitos Terciários-Quaternários:** Recobrem os calcários da Formação Jandaíra em manchas descontínuas. São representados por sedimentos arenosos inconsolidados e arenitos finos a médios ou conglomeráticos com intercalações de siltitos e argilitos correlacionados às formações Barreiras, Tibau e Potengi, paleocascalheiras e sedimentos aluvionares do rio Açú.

- (ii) **Depósitos Mesozóicos:** representados por calcários e calcarenitos diversos correlacionados à Formação Jandaíra, que pertence a porção superior do Grupo Apodi.

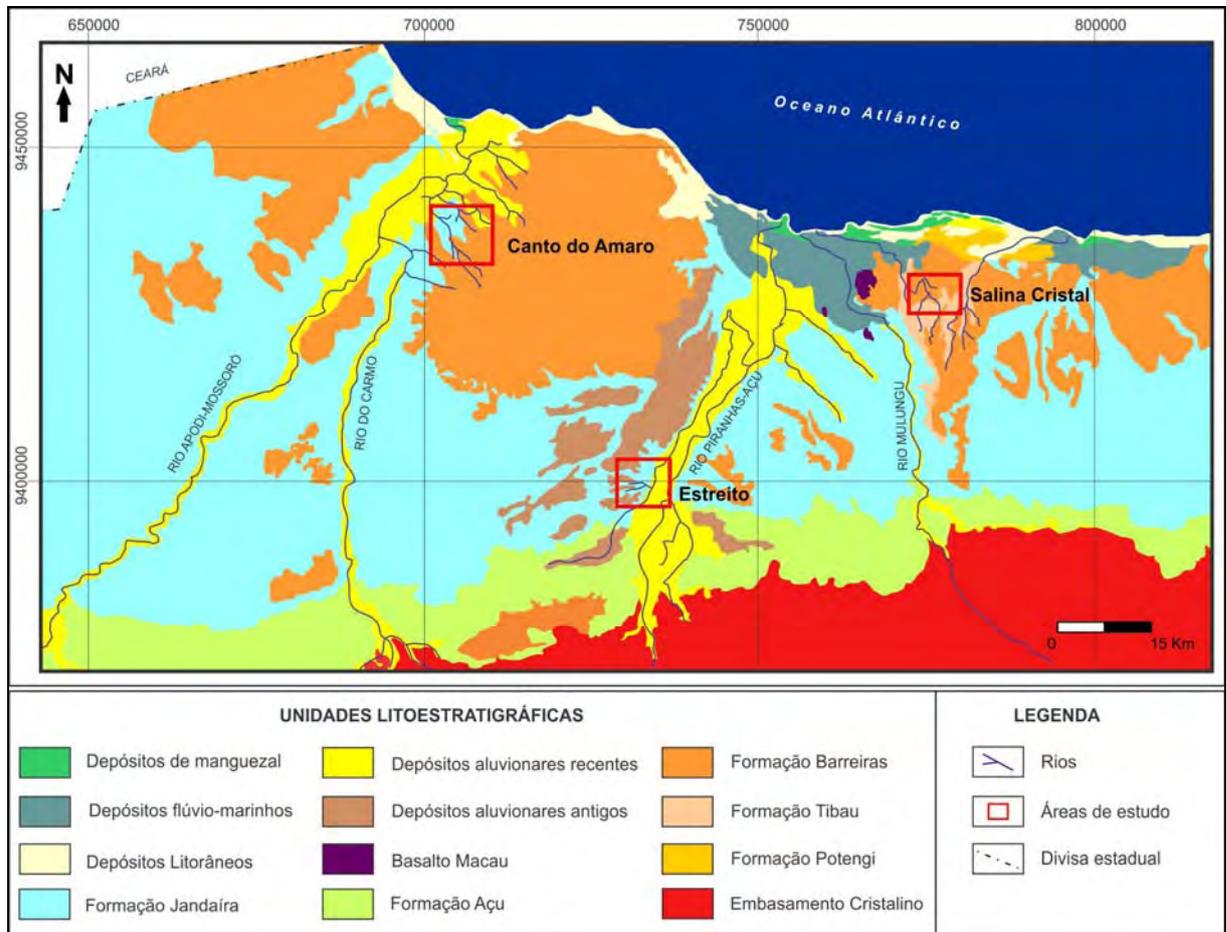


Figura 3.5 – Unidades geológicas aflorantes no setor estudado (CPRM, 2006).

A **Formação Jandaíra** compõe a unidade basal nas áreas estudadas e constitui-se numa alternância margo-calcária. Os calcários apresentam fácies com granulometria média a fina, coloração creme-amarelada a bege e formam bancos de rocha dura (**Figura 3.6**). Alternando com os bancos ocorrem margas e lamas calcárias com teor variável de carbonato (testes com HCl diluído a 10%) e coloração creme a esbranquiçada (**Figura 3.7**). Nas três áreas, a Formação Jandaíra encontra-se recoberta em discordância por sedimentos siliciclásticos das unidades superiores (**Figura 3.8**).



Figura 3.6 - Afloramento de bancos de calcário da Formação Jandaíra, na área de Canto do Amaro.



Figura 3.7 - Margas e lamas calcárias da Formação Jandaíra, na área de Estreito.

A **Formação Barreiras** é caracterizada por uma alternância de argilo-siltitos, arenitos de granulometria média a grossa e teores variados de silte e argila e conglomerados polimíticos (**Figuras 3.9 e 3.10**). Além da alternância vertical, essas litologias comumente se interrelacionam através de uma intensa variação lateral. Processos redox são freqüentes nessas rochas, evidenciados pela presença de manchas irregulares com colorações avermelhadas, amarronzadas, amareladas e acinzentadas, em padrões geométricos que se repetem na escala centimétrica até a métrica (**Figura 3.11**). Localmente,

a associação entre o processo de oxi-redução e o intemperismo superficial resulta na formação de crostas lateríticas.



Figura 3.8 - Contato discordante entre banco de calcário da Formação Jandaíra e sedimentos siliciclásticos da Formação Barreiras, na área de Estreito.



Figura 3.9 - Alternância de arenitos e conglomerados pertencentes à Formação Barreiras, na área de Estreito.



Figura 3.10 - Arenitos conglomeráticos da Formação Barreiras, na área de Canto do Amaro.



Figura 3.11 - Aspecto dos arenitos da Formação Barreiras sob influência de frentes redox, na área de Estreito.

A **Formação Tibau** é composta por arenitos médios a grossos e argilo-siltitos similares aos da Formação Barreiras, com a qual apresenta relações de variação lateral de fácies. Mostra forte influência do metamorfismo de contato causado por intrusões de vulcanitos basálticos da Formação Macau (**Figura 3.12**), favorecendo uma intensa oxidação de seus sedimentos (**Figura 3.13**).



Figura 3.12 - Arenitos da Formação Tibau intrudidos por basaltos da Formação Macau, na área de Salina Cristal.



Figura 3.13 - Aspecto geral dos arenitos oxidados da Formação Tibau, sob influência do vulcanismo da Formação Macau, na área de Salina Cristal.

A **Formação Potengi** é formada por níveis espessos de arenitos homogêneos finos a médios, com coloração variando de tons avermelhados a amarelados, podendo localmente ser brancos. Contrasta, portanto com a Formação Barreiras, posicionada estratigraficamente abaixo dela (**Figura 3.14**). Além do contraste granulométrico e textural, a Formação Potengi possui um padrão redox menos intenso do que o da Formação Barreiras (**Figura 3.15**), sugerindo a presença de uma discordância selando um pacote sedimentar

(no caso, a Formação Barreiras) que já havia sofrido um ciclo anterior de intemperismo e/ou diagênese.



Figura 3.14 - Contato discordante entre arenitos lateritizados da Formação Barreiras e arenitos não lateritizados da Formação Potengi, na área de Salina Cristal.



Figura 3.15 - Padrão suave de processos redox em arenitos da Formação Potengi, na área de Salina Cristal.

As **Paleocascalheiras** são formadas por clastos ovóides com comprimento do eixo maior de até 12 cm, imersos em matriz essencialmente areno-argilosa ferruginosa (**Figura**

3.16). Em suas áreas de ocorrência, a superfície do terreno é caracterizada por uma abundância de seixos, resultante da subtração da matriz pelos processos intempéricos superficiais (**Figura 3.17**). Processos redox similares aos observadas na Formação Barreiras são freqüentes nas cascalheiras (**Figuras 3.16 e 3.18**), de tal modo que a distinção entre as cascalheiras e os níveis conglomeráticos da Formação Barreiras muitas vezes é dificultada.



Figura 3.16 - Cascalheira de coloração variável, com seixos de tamanho igualmente variável, na área de Estreito.



Figura 3.17 - Aspecto da superfície do terreno em trecho de ocorrência de cascalheira, na área de Estreito.



Figura 3.18 - Detalhe das cascalheiras da **Figura 3.16**, evidenciando a ação redox, na área de Estreito.

3.3 - HIDROGEOLOGIA REGIONAL

Os aquíferos que constituem as unidades hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Norte (**Figura 3.19**) estão inseridos em duas províncias geológicas regionais:

- Embasamento Cristalino;
- Bacias sedimentares: Bacia Potiguar e Bacia Costeira Leste.

3.3.1 - Embasamento Cristalino

No setor centro-oeste e sul do Estado afloram rochas gnáissicas e graníticas que perfazem 60% do Rio Grande do Norte e dão origem ao aquífero cristalino fissural. Representam uma unidade de baixo potencial hidrogeológico e com águas salinizadas, em geral inapropriadas para o consumo humano. Entretanto, tem um papel muito importante no suprimento da população rural para o uso na pecuária, notadamente nos locais fora da área de influência de reservatórios superficiais ou adutoras.

Os poços perfurados nesse domínio ocorrem em duas situações distintas: diretamente nas fraturas e fissuras das rochas cristalinas; e nos aluviões dos rios e riachos intermitentes. No primeiro caso a vazão específica média é de $0,45 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$; e nos aluviões desenvolvidos sobre o embasamento cristalino a vazão específica média é superior e da ordem de $3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (SERHID 1998a).

3.3.2 - Bacias Sedimentares

O setor centro-norte e toda a faixa leste do Estado são formados por rochas sedimentares e sedimentos, de idade Mesozóica e Cenozóica, que perfazem 40% da área do Estado. Nesse contexto, está localizada a Bacia Sedimentar Potiguar e a Bacia Sedimentar Costeira Leste do Estado do RN (SERHID, 1998a), cujo limite entre essas duas bacias é estrutural e representado pelo Alto de Touros (**Figura 3.19**).

➤ **Bacia Sedimentar Potiguar**

A Bacia Sedimentar Potiguar hospeda aquíferos granulares e cárstico, com destaque para o aquífero Açú e o aquífero Jandaíra, respectivamente.

O **aquífero Açú** (inserido na formação homônima) é composto por sedimentos arenosos com algum componente argiloso. A qualidade físico-química das suas águas é geralmente boa, podendo ser utilizada praticamente para todos os fins. Em grande parte da área encontra-se sotoposto ao aquífero Jandaíra que lhe confere um caráter confinado a semi-confinado. Nessa situação, representa o sistema de maior interesse hidrogeológico da Bacia Potiguar, com profundidades de captação ente 400 aos 900 m, produzindo vazões de até 300 m³/h. Na faixa de afloramento da Formação Açú localizada na borda sul da Bacia Potiguar o referido aquífero é do tipo livre. Nesse setor os poços têm profundidade variando entre 25 e 150 metros e desenvolvem vazões até 80 m³/h. O setor considerado de maior potencial hidrogeológico está localizado na faixa norte da área de afloramento da Formação Açú (**Figura 3.19**) (Stein *et al.*, 2006).

O **aquífero cárstico fissural Jandaíra** é de natureza livre e composto por calcários da Formação homônima. Estudos regionais indicam que a espessura desta formação pode chegar a 600 metros na parte mais profunda da Bacia Potiguar, embora as espessuras mais importantes, do ponto de vista hidrogeológico, estejam localizadas entre 50 e 150 metros produzindo vazões entre 10 a 50 m³/h (Mistreta,1984). As águas do aquífero Jandaíra apresentam restrições devido ao elevado grau de salinização em alguns setores. No extremo norte da Bacia Potiguar emersa, sobrejacente ao aquífero Jandaíra, o aquífero Barreiras composto por rochas e sedimentos inconsolidados siliciclásticos de idade Tércio-quadernária. Representam uma unidade de baixo potencial hidrogeológico, com poços variando entre 40 a 80 metros de profundidade e vazões de 2 a 5 m³/h. Suas águas apresentam problemas de salinização, com teores elevados cloreto e sódio, o que restringe sua utilização para diversos fins.

➤ **Bacia Sedimentar Costeira Leste**

A Bacia Sedimentar Costeira Leste se distribui ao longo do litoral leste do Estado, com largura média de aproximadamente 25 km, onde dominam os tabuleiros arenosos.

Nesse setor está localizado o **aquífero Barreiras** de maior potencial hidrogeológico, com caráter poroso granular e de natureza livre. As seqüências de sedimentos eólicos sobrejacentes a Formação Barreiras favorecem a recarga do aquífero subjacente, por meio de drenança vertical descendente. A maioria dos poços perfurados na faixa costeira apresenta profundidade na ordem de 40 a 100 m, com vazões de exploração variando de 30 a 100 m³/h (SERHID, 1998a). Em condições naturais suas águas apresentam elevada qualidade físico-química podendo ser utilizada para todos os fins.

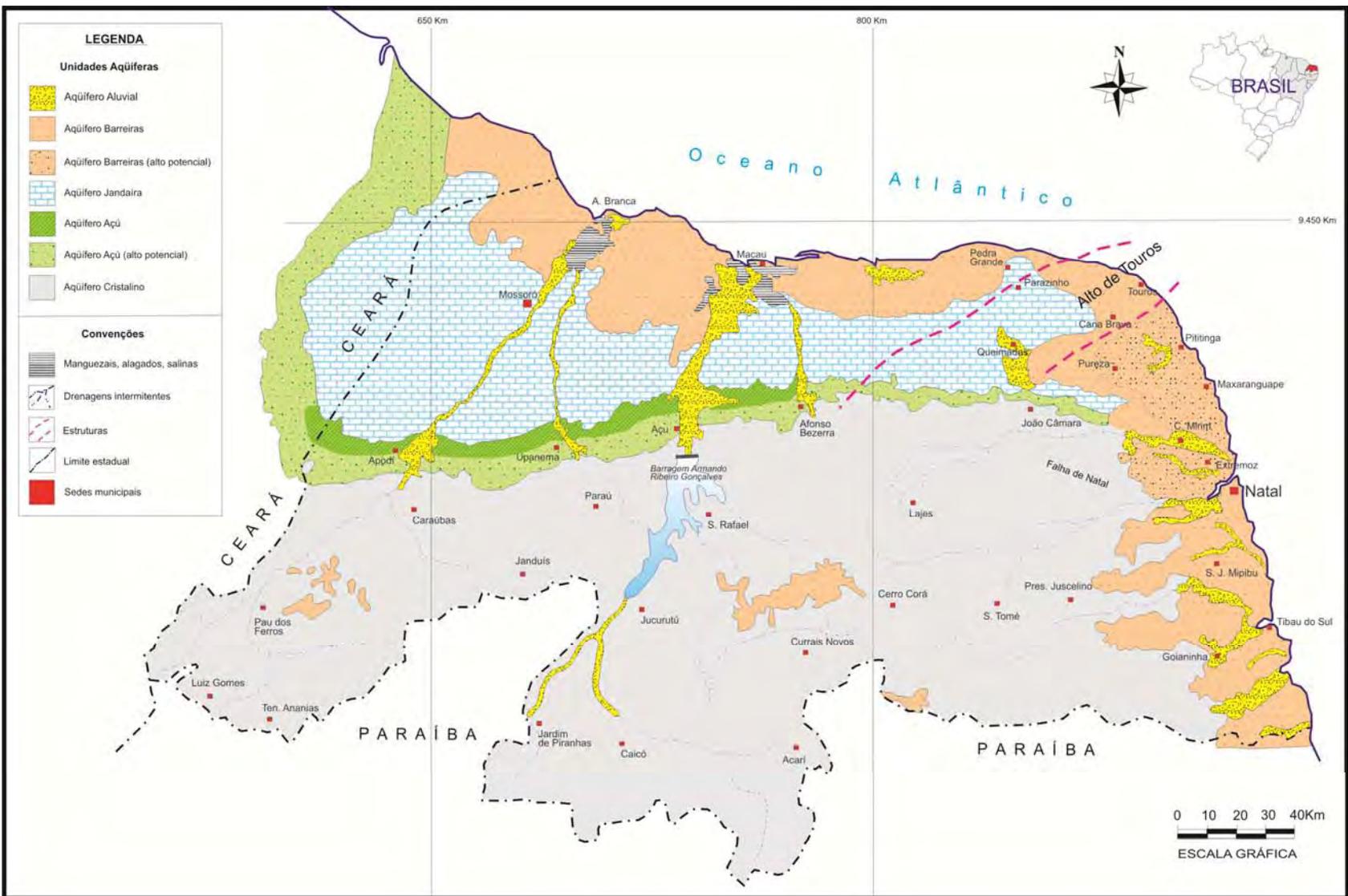


Figura 3.19 - Mapa simplificado de ocorrência dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Norte e parte do Ceará (modificado de SERHID, 1998a).

Capítulo IV: HIDROGEOLOGIA

4.1 – AQUISIÇÃO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS

A avaliação hidrogeológica foi inicialmente desenvolvida a partir do reconhecimento das unidades hidroestratigráficas e do cadastramento de poços em campo. O levantamento das captações de água subterrânea, existentes nas áreas objeto deste estudo (Canto do Amaro, Estreito, Salina Cristal), foi realizado mediante a elaboração de um inventário/cadastro dos poços com a medição do nível de água subterrânea, e coleta de informações com os proprietários acerca dos aspectos de uso, frequência de exploração e controles das captações. Foram cadastrados de 96 poços, dentre eles, 28 poços tubulares produtores de particulares, 15 poços amazonas/cacimbões de particulares, e 53 poços de monitoramento de propriedade da PETROBRAS, estes concentrados em pequenos domínios de cada área considerada.

Tendo em vista que o inventário norteou a obtenção de informações preliminares, foi então evidenciada a necessidade de serem obtidas informações hidrogeológicas adicionais, motivando a execução de sondagens de reconhecimento. Foram realizadas 26 sondagens de reconhecimento à percussão (10 em Canto do Amaro, 9 em Estreito e 6 em Salina Cristal).

De posse de um acervo de informações e dados que permitiram um primeiro cenário acerca da hidrogeologia em cada área, foi possível efetuar a locação e construção de 25 poços de monitoramento, executados pelo método de perfuração à percussão (9 em Canto do Amaro, 8 em Estreito e 8 em Salina Cristal). As **Figuras 4.1** e **4.2** ilustram a execução de sondagens de reconhecimento, e as **Figuras 4.3** a **4.5** mostram os aspectos da perfuração, completção e finalização dos poços de monitoramento.



Figura 4.1 - Perforação de sondagem de reconhecimento em Canto do Amaro, com máquina perfuratriz percussora.



Figura 4.2 - Revestimento provisório de 6'' em ferro galvanizado utilizado na execução de sondagem na área de Canto do Amaro.



Figura 4.3 - Operação de instalação do revestimento em PVC geomecânico.



Figura 4.4 - Aspecto do revestimento interno e tampão do poço, antes da construção da caixa de proteção.



Figura 4.5 - Poço de monitoramento concluído na área de Canto do Amaro, com detalhe da caixa de proteção construída ao redor da boca do poço.

Nas **Figuras 4.6 a 4.8** pode-se observar a localização das sondagens (PS) e dos poços de monitoramento executados nas áreas de estudo. Os poços de monitoramento na área de Canto do Amaro receberam a identificação “VBCA”; em Estreito a identificação é “VBET”; e em Salina Cristal “VBSC”.

Os perfis litológicos e construtivos dos poços constam nas **Figuras 4.9 a 4.11**, os quais foram perfurados em 8” e revestidos em 4” com tubulação de PVC geomecânico, seguindo os critérios e recomendações técnicas da Norma ABNT - NBR 13895 – Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem (ABNT, 1997). Posteriormente, foi feito o nivelamento topográfico dos poços com o uso de GPS geodésico, obtendo-se as cotas do terreno nos respectivos pontos em relação ao nível do mar.

Foram executados 09 poços em Canto do Amaro (desse total, 07 poços no aquífero Jandaíra, e 02 no aquífero Barreiras), 08 poços em Estreito (dos quais 07 no aquífero Jandaíra e 01 no aquífero Barreiras) e 08 poços em Salina Cristal (dos quais 06 no aquífero Jandaíra, e 02 no aquífero Barreiras).

Nas **Tabelas 4.1 a 4.3** estão os principais parâmetros hidroestratigráficos das sondagens e poços executados na área, bem como, os dados de medição de nível de água dos poços obtidos para os dois períodos amostrais (seco e úmido).

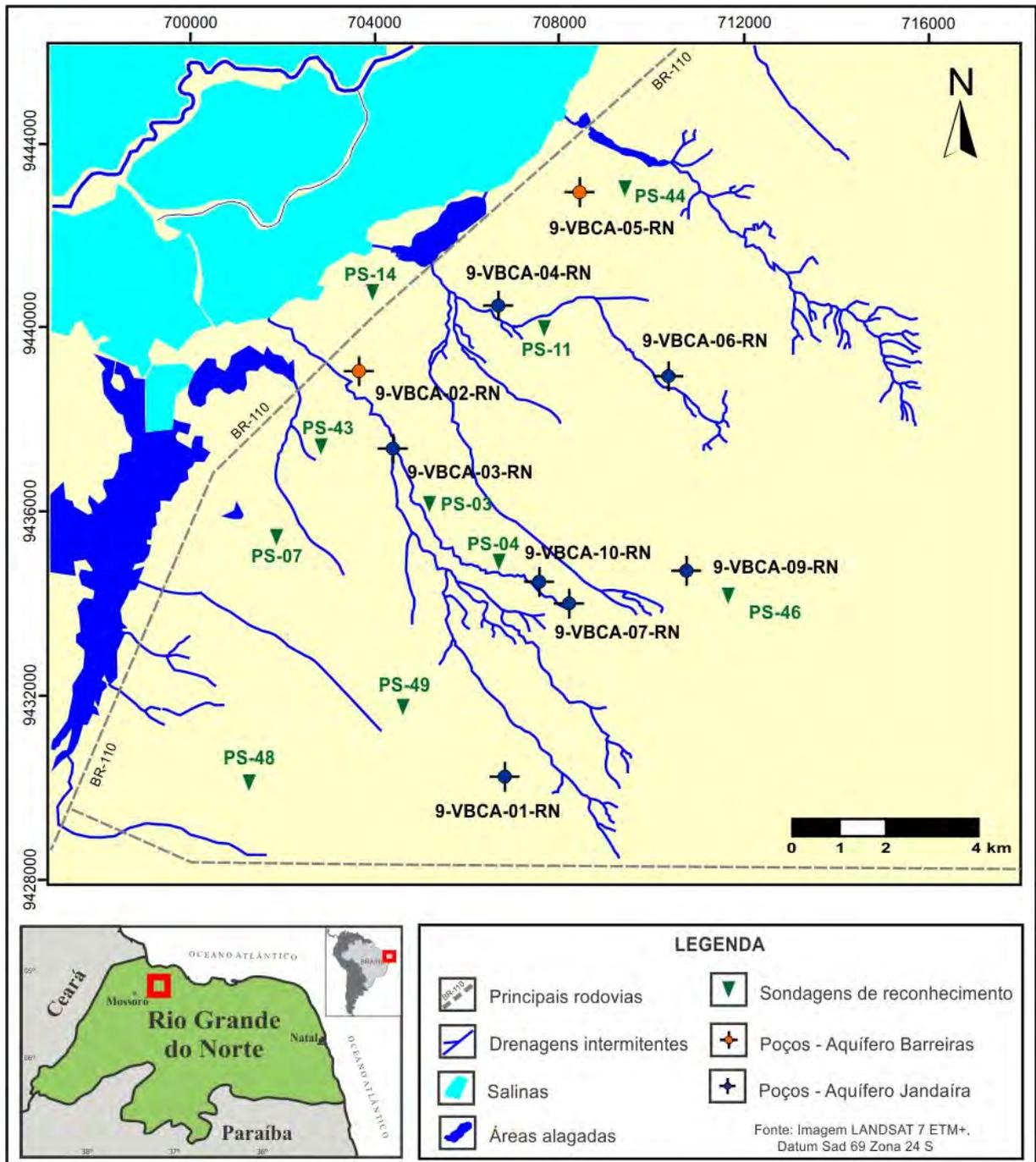


Figura 4.6 – Disposição das sondagens de reconhecimento (PS) e poços de monitoramento executados na área de Canto do Amaro.

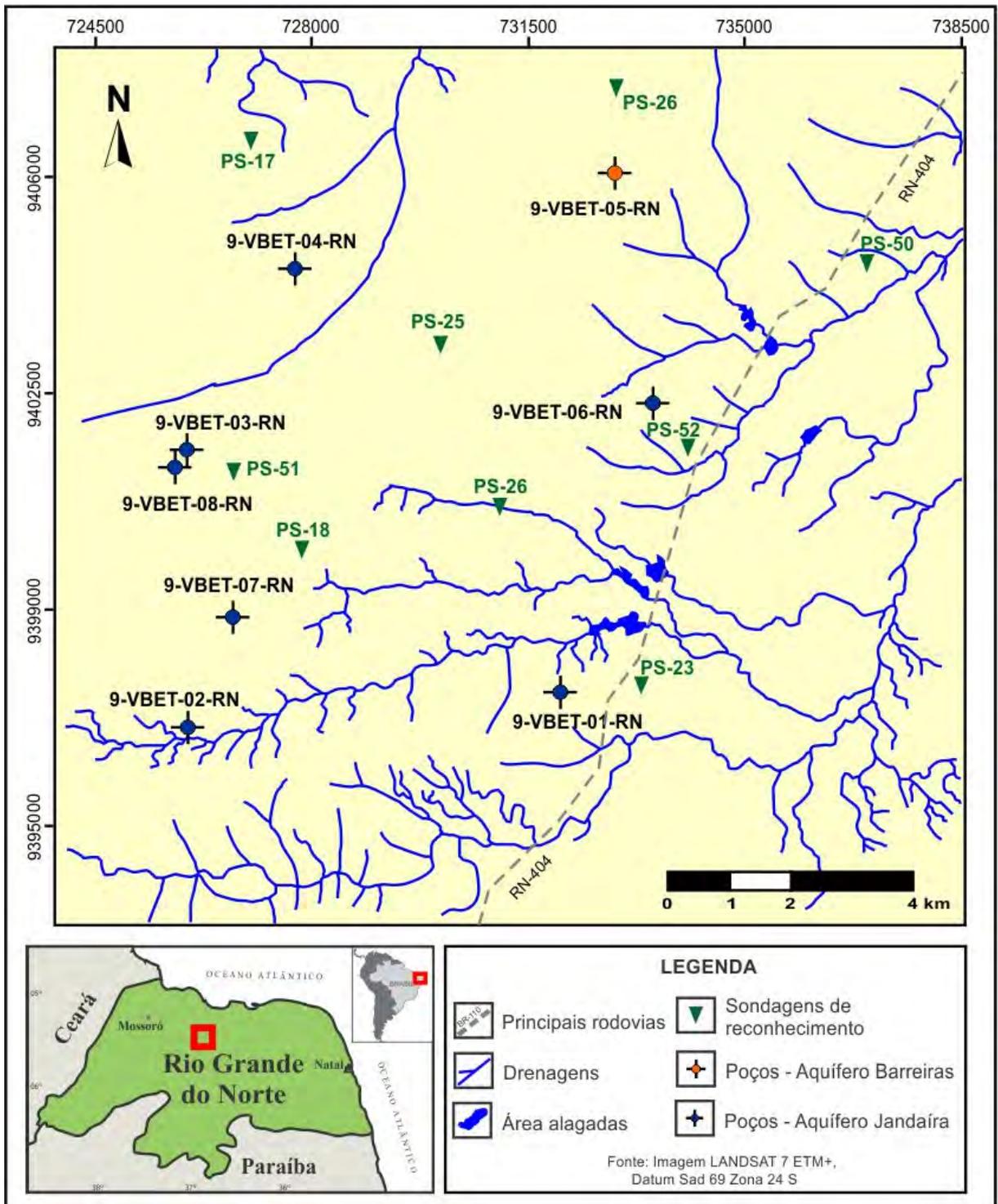


Figura 4.7 – Disposição das sondagens de reconhecimento (PS) e poços de monitoramento executados na área de Estreito.

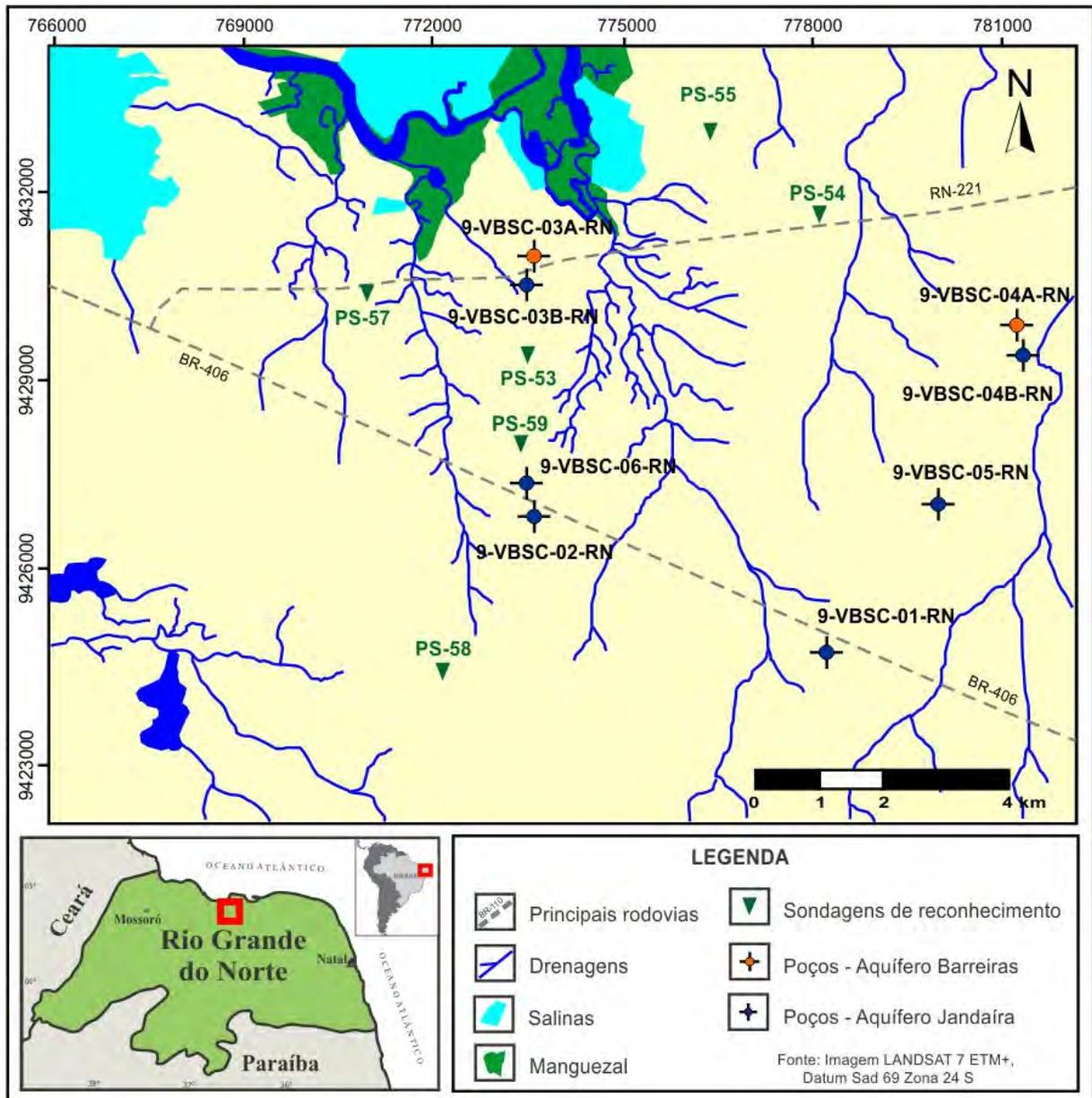


Figura 4.8 – Disposição das sondagens de reconhecimento (PS) e poços de monitoramento executados na área de Salina Cristal.

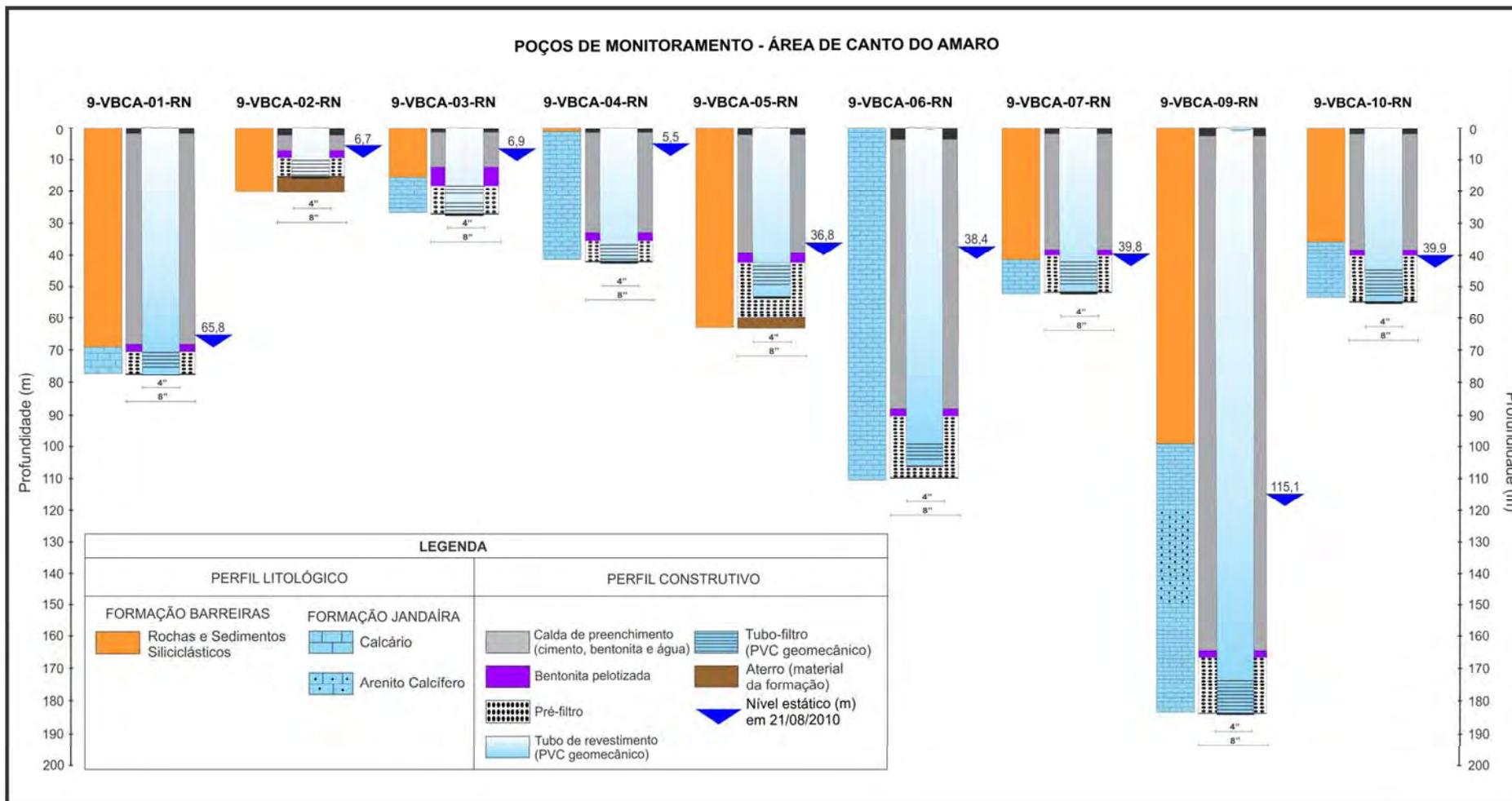


Figura 4.9 – Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento executados na área de Canto do Amaro.

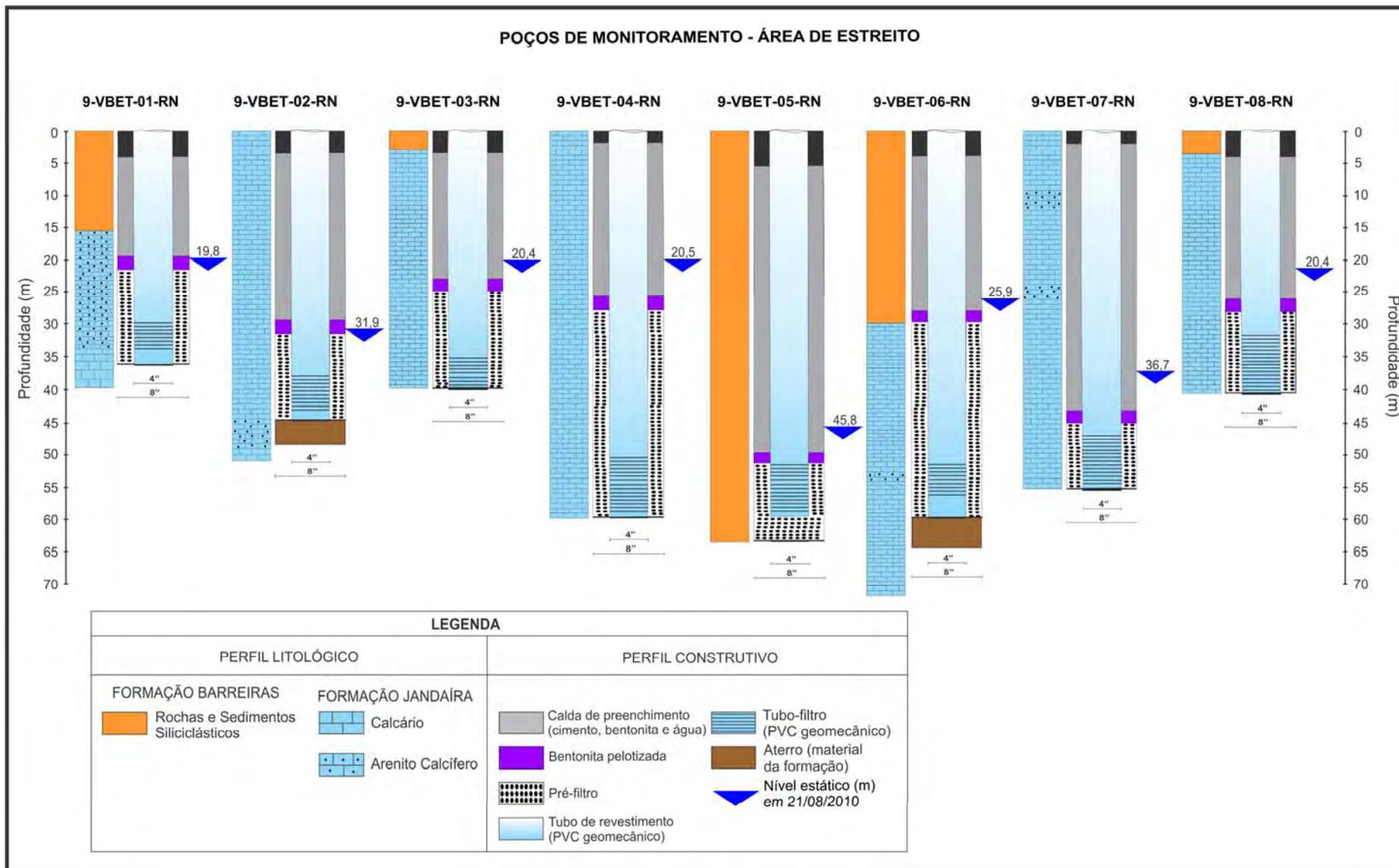


Figura 4.10 – Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento executados na área de Estreito.

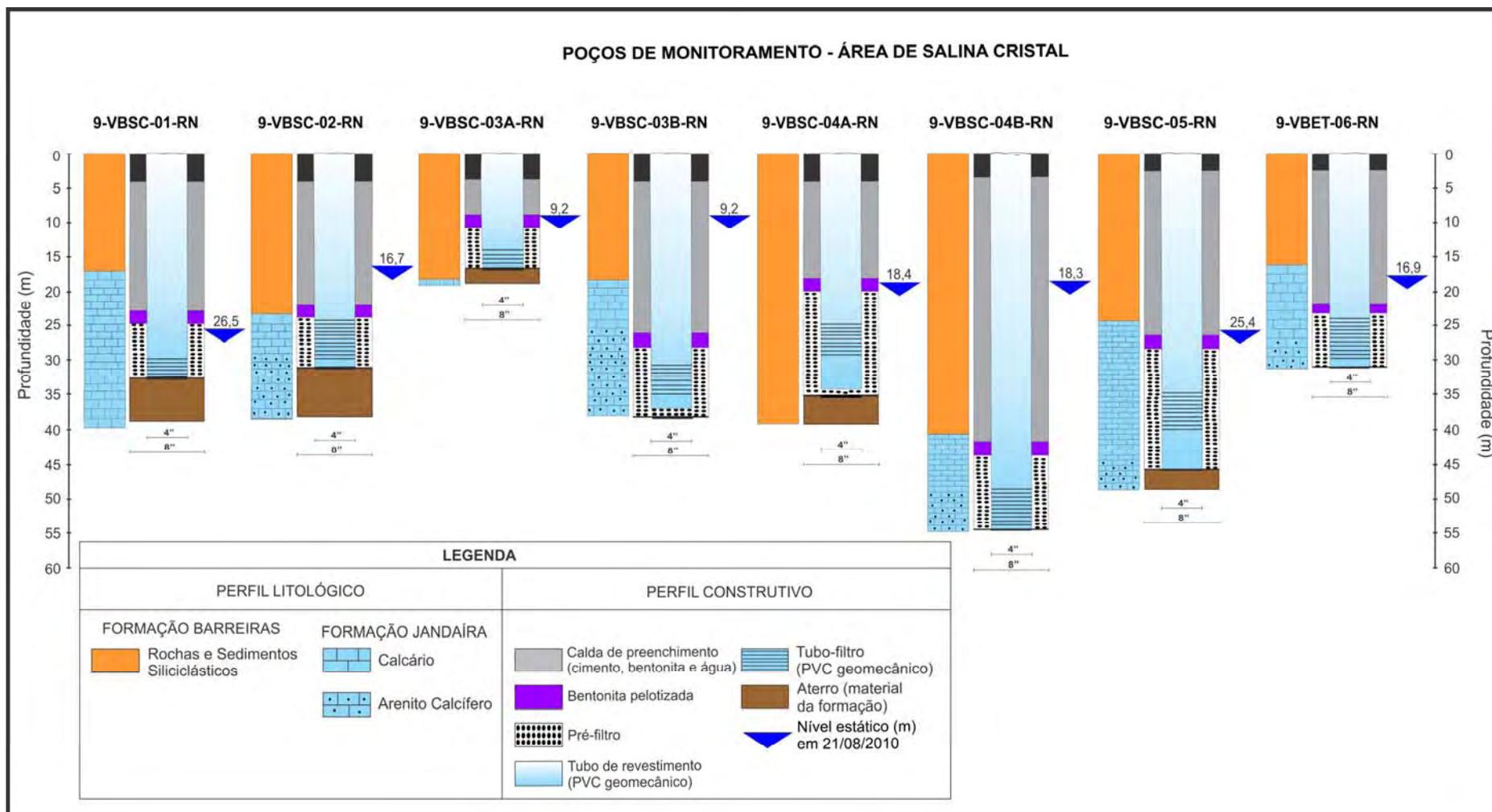


Figura 4.11 – Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento executados na área Salina Crista.

Tabela 4.1 - Dados das sondagens executadas nas áreas de estudo.

Canto do Amaro					Estreito					Salina Cristal				
Ponto	Prof. (m)	Unidade	Espessura (m)	NE (m)	Ponto	Prof. (m)	Unidade	Espessura (m)	NE (m)	Ponto	Prof. (m)	Unidade	Espessura (m)	NE (m)
PS 03	27	AqB	15	Seco	PS 17	52	AqB	3	Seco	PS 53	30	AqB	19	15,69
		AqJ	12*	5,45			AqJ	49*	38,2			AqJ	11*	9,1
PS 04	40	AqB	29	23,8	PS 18	36	AqB	8	Seco	PS 54	52	AqB	33	25,3
		AqJ	11*	24			AqJ	28*	34			AqJ	19*	16,65
PS 07	34	AqB	6	Seco	PS 23	15	AqB	6	Seco	PS 55	50	AqB	34	14,8
		AqJ	28*	14,95			AqJ	9*	6,2			AqJ	16*	9,95
PS 11	41	AqB	1	Seco	PS 25	50	AqB	2	Seco	PS 57	68	AqB	68	5
		AqJ	40*	6,8			AqJ	48*	45			AqJ	-	-
PS 14	33	AqB	22	5,6	PS 26	82	AqB	68	44	PS 58	25	AqB	7	Seco
		AqJ	11*	22,9			AqJ	14*	Seco			AqJ	18*	16,3
PS 43	22	AqB	15	6	PS 28	20	AqB	10	Seco	PS 59	37	AqB	16	Seco
		AqJ	7*	6,5			AqJ	10*	11			AqJ	21*	16,71
PS 44	68	AqB	60	40	PS 50	20	AqB	13	5,5					
		AqJ	8*	40,4			AqJ	7*	5,4					
PS 46	157	AqB	89	Seco	PS 51	22	AqB	7	Seco					
		AqJ	68*	103,53			AqJ	15*	12					
PS 48	50	AqB	3	Seco	PS 52	31	AqB	18	Seco					
		AqJ	47*	40,55			AqJ	13*	24,85					
PS 49	51	AqB	33	Seco										
		AqJ	18*	40,55										

Nota: Prof. = Profundidade do poço; NE = Nível Estático; AqB = Aquífero Barreiras; AqJ = Aquífero Jandaíra; * Espessura parcialmente penetrante.

Tabela 4.2 – Principais parâmetros dos poços de monitoramento do aquífero Barreiras.

Área	Poço	C T (m)	Espessura penetrada (m)	Período Seco			Período Úmido			Variação do NE (m)
				NE (m)	CP (m)	Espessura Saturada (m)	NE (m)	CP (m)	Espessura Saturada (m)	
Canto do Amaro	9-VBCA-02-RN	8,746	18	6,92	1,83	11,08	6,65	2,09	11,35	0,27
	9-VBCA-05-RN	40,059	63	36,71	3,35	26,29	36,76	3,30	26,24	-0,05
Estreito	9-VBET-05-RN	62,586	64	45,65	16,94	18,35	45,76	16,82	18,23	-0,11
Salina Cristal	9-VBSC-03A-RN	13,749	18	9,52	4,23	8,48	9,14	4,61	8,86	0,38
	9-VBSC-04A-RN	25,109	30	18,33	6,78	11,67	18,35	6,75	11,64	-0,02

Notas: CT = Cota Topográfica; NE = Nível Estático; CP = Cota Potenciométrica.

A medição do nível da água representativa do período seco ocorreu em Janeiro de 2007 e a do período úmido em Julho de 2007.

Tabela 4.3 – Principais parâmetros dos poços de monitoramento do aquífero Jandaíra.

	Poço	C T (m)	Prof. (m)	Espessura Litológica (m)		Profundidade das cavidades cársticas, níveis saturados ou entradas de água (m)	Período Seco		Período Úmido		Variação do NE (m)
				AqB	AqJ		NE (m)	C P (m)	NE (m)	C P (m)	
Área de Canto do Amaro	9-VBCA-01-RN	106,14	77	AqB	69	70-75	65,93	40,21	65,84	40,29	0,09
				AqJ	08*						
	9-VBCA-03-RN	11,45	27	AqB	15	17-26	6,97	4,48	6,81	4,63	0,16
				AqJ	12*						
	9-VBCA-04-RN	9,34	41	AqB	01	34-40	5,70	3,64	5,53	3,81	0,17
				AqJ	40*						
	9-VBCA-06-RN	47,68	110	AqB	-	98-104	38,32	9,36	38,37	9,31	-0,05
				AqJ	110*						
	9-VBCA-07-RN	64,84	52	AqB	41	44-50	39,78	25,06	39,76	25,08	0,02
				AqJ	11*						
9-VBCA-09-RN	136,8	182	AqB	107	172-178	115,10	21,70	115,09	21,70	0,01	
			AqJ	75*							
9-VBCA-10-RN	64,63	52	AqB	32	46-52	39,92	24,71	39,84	24,79	0,08	
			AqJ	20*							

Tabela 4.3 continuação - Principais parâmetros dos poços de monitoramento do aquífero Jandaíra.

	Poço	C T (m)	Prof. (m)	Espessura Litológica (m)		Profundidade das cavidades cársticas, níveis saturados ou entradas de água (m)	Período Seco		Período Úmido		Variação do NE (m)
				AqJ	20*		NE (m)	C P (m)	NE (m)	C P (m)	
				AqB	16						
Área de Estreito	9-VBET-01-RN	30,15	40	AqJ	24*	30-40	19,85	10,30	19,87	10,28	-0,02
				AqB	16						
	9-VBET-02-RN	58,75	52	AqB	-	38-44	31,97	26,78	31,90	26,85	0,07
				AqJ	52*						
	9-VBET-03-RN	61,08	40	AqB	03	36-39	20,46	40,62	20,38	40,69	0,08
				AqJ	37*						
	9-VBET-04-RN	49,74	60	AqB	-	51-59	20,42	29,32	20,50	29,22	-0,08
				AqJ	60*						
9-VBET-06-RN	36,28	65	AqB	19	52-56	26,05	10,23	25,96	10,32	0,09	
			AqJ	46*							
9-VBET-07-RN	59,78	56	AqB	-	47-55	-	-	36,64	23,14	-	
			AqJ	56*							
9-VBET-08-RN	62,05	40	AqB	03	32-38	-	-	20,40	41,64	-	
			AqJ	37*							
Área de Salina Cristal	9-VBSC-01-RN	33,01	39	AqB	17	29-31	26,47	6,54	26,52	6,48	-0,05
				AqJ	22*						
	9-VBSC-02-RN	22,25	38	AqB	15	24-30	16,81	5,44	16,66	5,58	0,15
				AqJ	23*						
	9-VBSC-03B-RN	13,89	38	AqB	18	32-35	9,59	4,30	9,24	4,65	0,35
				AqJ	20*						
9-VBSC-04B-RN	25,09	55	AqB	31	48-54	18,34	6,75	18,35	6,74	-0,01	
			AqJ	24*							
9-VBSC-05-RN	31,88	55	AqB	24	35-45	-	-	25,38	6,50	-	
			AqJ	31*							
9-VBSC-06-RN	22,21	32	AqB	16	24-30	-	-	16,9	5,31	-	
			AqJ	16*							

Nota: CT = Cota Topográfica; Prof. = Profundidade do poço; NE = Nível Estático; CP = Cota Potenciométrica; AqB = Aquífero Barreiras; AqJ = Aquífero Jandaíra; * Espessura parcialmente penetrante. A medição do nível da água representativa do período seco ocorreu em Janeiro de 2007 e a do período úmido em Julho de 2007. Quatro poços não foram avaliados no período seco porque não haviam sido concluídas as perfurações nesse período.

4.2 – ESTRUTURA HIDROGEOLÓGICA

A correlação estratigráfica dos perfis litológicos dos poços permitiu um melhor entendimento da estrutura hidrogeológica, da hidroestratigráfica e da interconexão hidráulica entre as duas unidades aquíferas individualizadas. Nas **Figuras 4.12 a 4.18** podem-se visualizar as seções hidrogeológicas elaboradas para as áreas de estudo.

A porção superior dos perfis é formada predominantemente por sedimentos e rochas siliciclásticas friáveis, correlacionadas a Formação Barreiras. Em alguns setores, o calcário Jandaíra encontra-se aflorante, como no setor sul/sudoeste de Canto do Amaro, sul de Estreito e setor ocidental da região de Salina Cristal.

4.2.1 - Aquífero Barreiras

Composto por sedimentos e rochas siliciclásticas, desenvolve espessuras saturadas em geral, intermitentes e implantadas apenas em alguns setores das áreas. O aquífero Barreiras, de caráter livre, é constituído por materiais arenosos (finos a médios) com variações faciológicas verticais e horizontais, desde fácies argilo-siltosas (ou siltico-argilosas) a conglomeráticas.

A espessura média do aquífero Barreiras na área de Canto do Amaro é de 33 metros, em Estreito é de 25 metros e em Salina Cristal é de 17 metros (**Tabelas 4.1 a 4.3**). De modo geral, as maiores espessuras estão associadas aos setores de topografia elevada. A exceção é a área de Estreito, na qual os sedimentos do aquífero Barreiras ocorrem associados aos aluviões da faixa leste da área (menor cota topográfica) (**Figura 4.16**).

Os sedimentos da Formação Barreiras são passíveis de formarem reservatórios de águas de forma perene em trechos restritos, como nos setores dos poços 9-VBCA-02 (**Figura 4.13**), 9-VBCA-05 (**Figura 4.14**), 9-VBET-05 (**Figura 4.16**), 9-VBSC-04A (**Figura 4.17**) e 9-VBSC-03A (**Figura 4.18**). Nesse caso, o nível potenciométrico do aquífero Barreiras se ajusta praticamente à mesma altura potenciométrica do aquífero Jandaíra, conforme se verifica nas seções supracitadas. Isso evidencia a relação hidráulica entre as unidades aquíferas Barreiras e Jandaíra, na medida em que condições estruturais e topográficas possibilitam a ocorrência das respectivas alturas potenciométricas ajustadas a um mesmo patamar.

De fato, a reduzida espessura do pacote sedimentar e a sua descontinuidade lateral, associada ao caráter predominantemente insaturado ao longo do ano, revela a pouca importância das águas subterrâneas dessa unidade em termos de potencial hidrogeológico para produção e abastecimento. Desta forma o aquífero Barreiras no contexto estudado se constitui predominantemente numa unidade de transferência de águas de recarga

pluviométrica para o aquífero Jandaíra, este subjacente ao aquífero Barreiras, com acumulação nas fraturas e cavidades cársticas dos calcários.

4.2.2 - Aquífero Jandaíra

O aquífero Jandaíra, de natureza livre, é composto por calcários puros a impuros (argilosos e/ou margosos), muito compactos e com intercalações de argilitos, siltitos e arenitos calcíferos de granulometria média a grossa com matriz areno-siltosa. A profundidade média dos poços construídos na área de Canto do Amaro é de 77 metros, em Estreito é de 50 metros e em Salina Cristal é de 43 metros (**Tabela 4.3**). A zona produtora de água está implantada frequentemente nas fraturas e/ou cavidades cársticas (condutos, canais, cavernas, planos de estratificação carstificados, etc.), e/ou, localmente, nos níveis de arenitos calcíferos porosos e permeáveis intercalados aos calcários. O posicionamento da zona produtora está localizado a uma profundidade média de 72 metros em Canto do Amaro; 44 metros em Estreito e 35 metros em Salina Cristal. O intervalo vertical entre a porção superior com condutos cársticos saturados que definem a zona produtora de água, e o topo do aquífero Jandaíra, constitui uma faixa de rocha predominantemente carbonática maciça (calcários), e/ou faixa com condutos cársticos (cavernas, fraturas, canais, etc.) insaturados.

Na área de Estreito (**Figura 4.15 e 4.16**) e Salina Cristal (**Figura 4.17 e 4.18**) as águas subterrâneas embora estejam armazenadas preferencialmente nos condutos cársticos dos calcários, ocorrem e foram também registradas localmente em arenitos calcíferos intercalados aos calcários, e nesse caso, os intervalos contínuos de rochas maciças carbonáticas se mostram menos espessos.

Os poços que interceptam o aquífero Jandaíra são parcialmente penetrantes, em média da ordem 36 metros e representam apenas a porção superior do pacote carbonático da Formação Jandaíra. Essa espessura litológica na área de Canto do Amaro varia entre 8 e 110 metros, com média de 39 metros; em Estreito varia de 24 a 60 metros, com média de 45 metros e em Salina Cristal varia entre 16 e 31 metros, com média de 23 metros (**Tabela 4.3**). Dados regionais indicam que o aquífero Jandaíra pode apresentar espessura total de até 400 metros na Bacia Potiguar (IPT, 1982).

Convém ressaltar, conforme abordado anteriormente, que, sobreposto ao aquífero Jandaíra, na maioria dos casos, tem-se um pacote sedimentar correlacionado à Formação Barreiras que constitui o aquífero homônimo.

O nível das águas do aquífero Jandaíra tende a ser mais raso nos setores topograficamente mais baixos, embora essa tendência precise de maior detalhamento e confirmação em estudos complementares. Na área de Canto do Amaro a profundidade do nível das águas subterrâneas nos poços varia de 5 a 115 metros (média de 44 metros), em

Estreito de 20 a 37 metros (média de 25 metros), e em Salina Cristal de 9 a 26 metros (média de 19 metros).

Nas áreas de Canto do Amaro (**Figuras 4.13 e 4.14**) e Salina Cristal (**Figura 4.18**) as cotas topográficas dos poços localizados próximo a linha de costa, em ambos os aquíferos, se encontram praticamente ao mesmo nível do mar, e nesse caso é provável que recebam influência da cunha salina.

Considerando o topo dos calcários como camada-guia as seções evidenciam a ocorrência de altos e baixos estruturais que devem estar ligados à estruturação regional de *horsts* e *grabens* da Bacia Potiguar. O componente estrutural provavelmente controla a espessura dos aquíferos estudados e, também, os sistemas originais de fraturas através dos quais se processou a infiltração de águas de chuva, e que ocasionaram o desenvolvimento do sistema cárstico no aquífero Jandaíra.

O nível estático dos poços do aquífero Jandaíra situa-se mais elevado (ou mais raso) em relação às profundidades das zonas produtoras. Este nível é estabelecido após serem interceptadas as cavidades cársticas saturadas em profundidade, instante no qual ocorre a ascensão da água no poço até atingir a condição de equilíbrio estático. Dessa forma, o nível potenciométrico do aquífero Jandaíra se revela como de caráter virtual. A altura potenciométrica estabelecida se ajusta espacialmente e define um padrão regular de fluxo ao longo de cada seção, caracterizando que os condutos cársticos estejam interligados.

O aquífero Jandaíra no setor estudado não apresenta carstes bem desenvolvidos na superfície do terreno, em grande parte da área, e esse fato é evidenciado pela ausência ou pouca presença de sumidouros nas áreas. A dissolução do calcário deverá se processar efetivamente na zona saturada, em subsuperfície, pela ação da percolação da água subterrânea. O condicionamento climático do setor estudado certamente interfere na menor disponibilidade de água de recarga para dissolução da rocha carbonática, o que pode ter resultado no menor desenvolvimento dos condutos e cavidades cársticas, mais próximos à superfície.

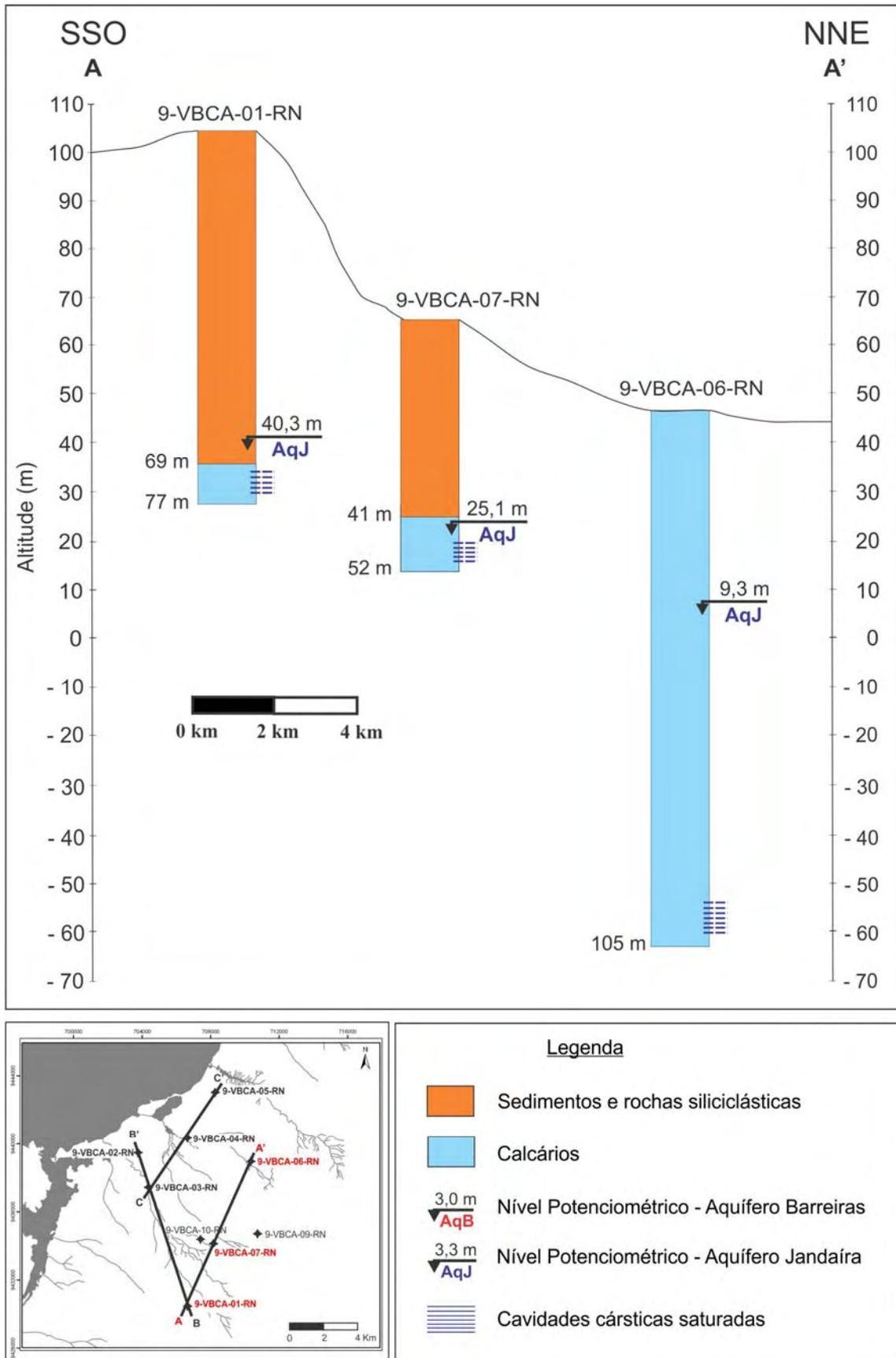


Figura 4.12 – Seção hidrogeológica A-A' da área de Canto do Amaro. (nível da água obtido em julho de 2007).

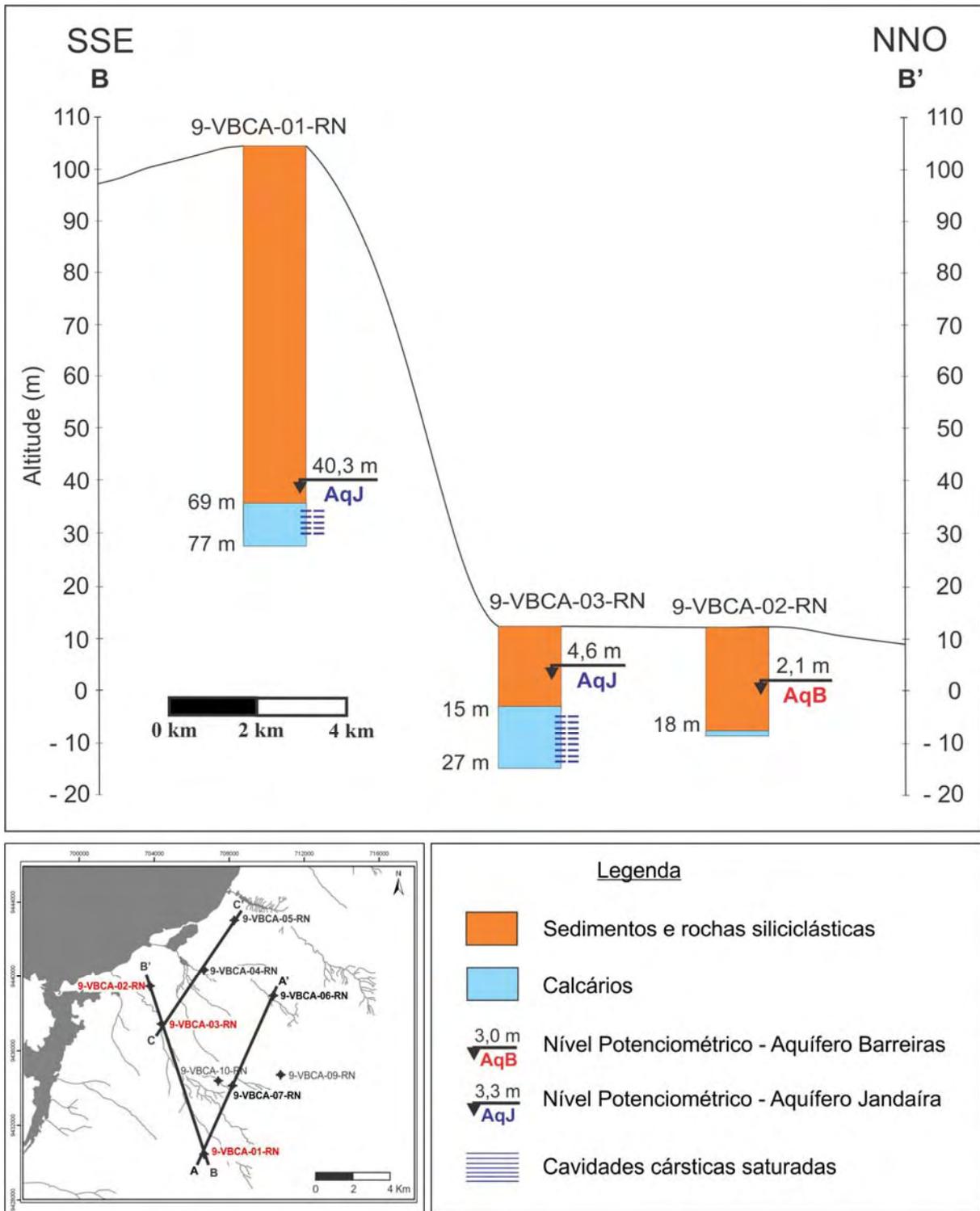


Figura 4.13 – Seção hidrogeológica B-B' da área de Canto do Amaro. (nível da água obtido em julho de 2007).

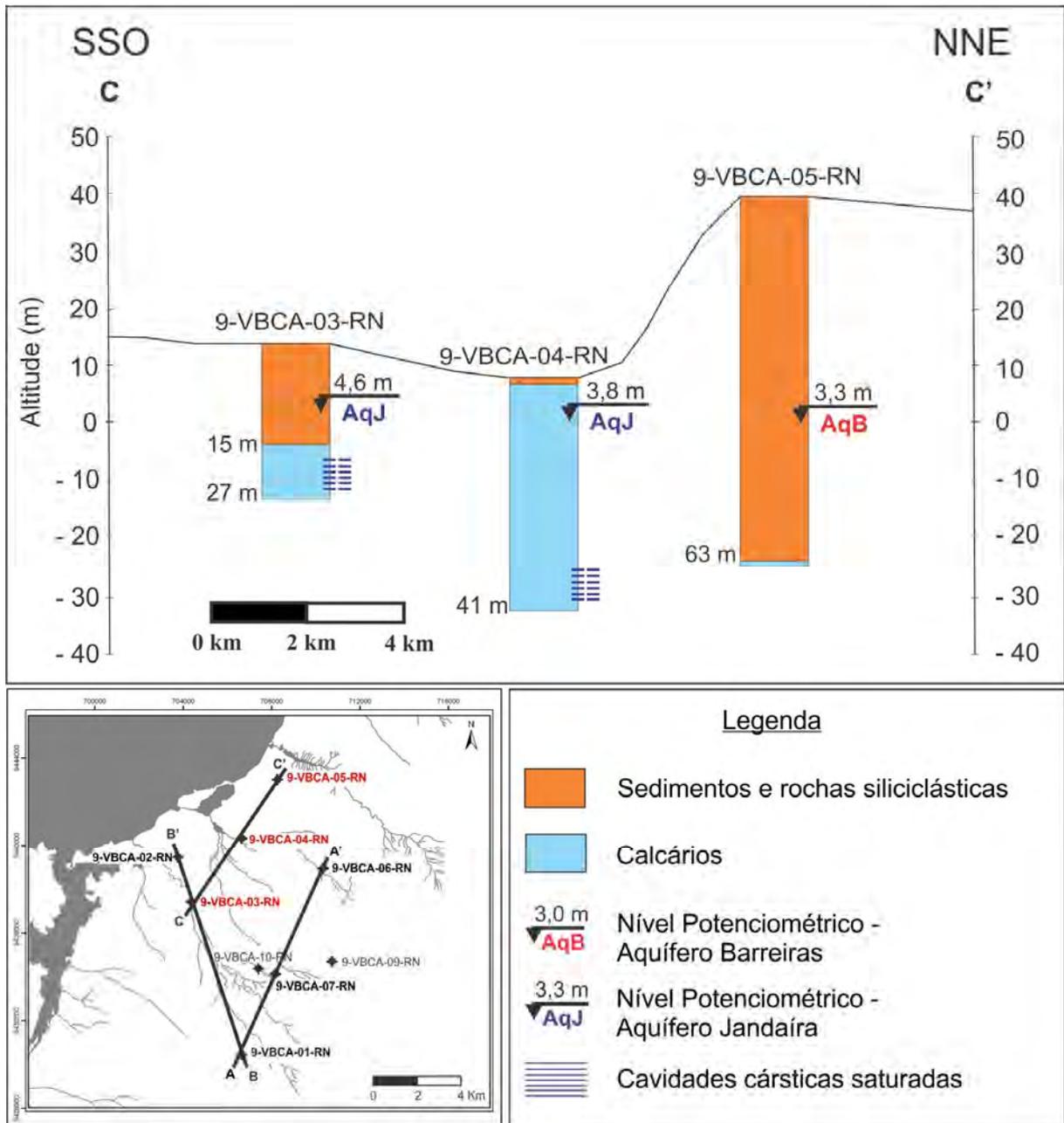


Figura 4.14 – Seção hidrogeológica C-C' da área de Canto do Amaro. (nível da água obtido em julho de 2007).

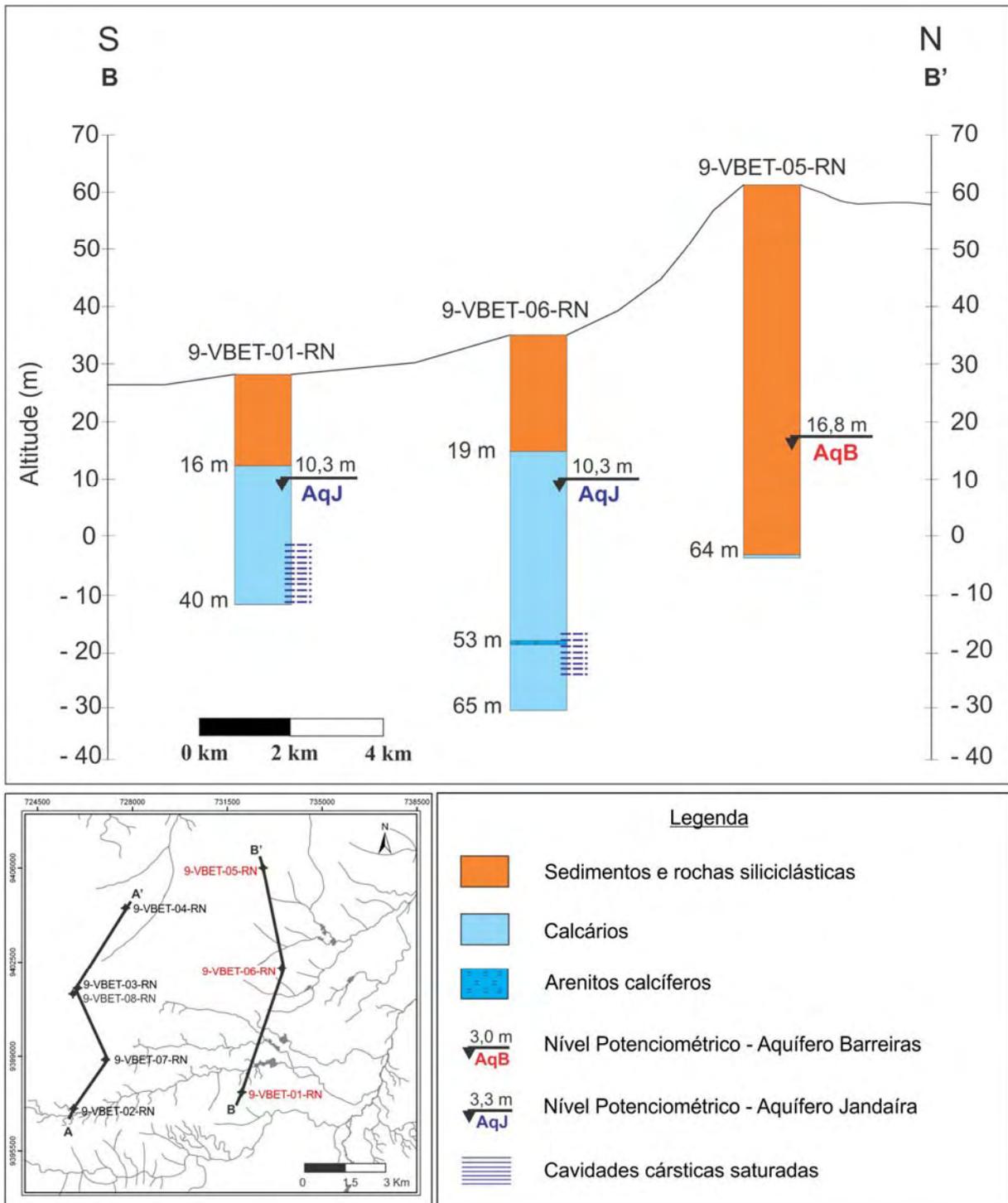


Figura 4.16 – Seção hidrogeológica B-B' da área de Estreito. (nível da água obtido em julho de 2007).

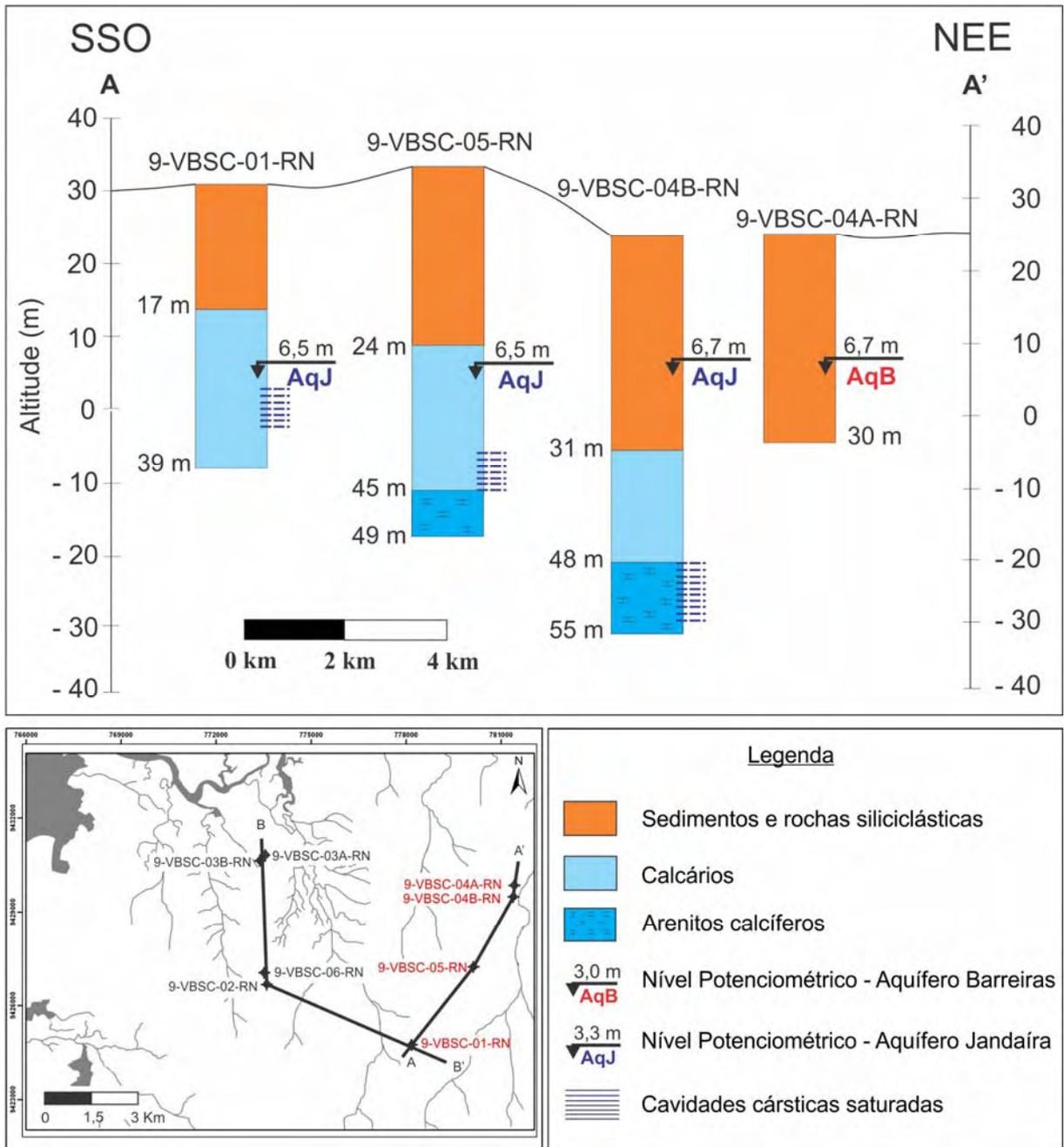


Figura 4.17 – Seção hidrogeológica A-A' da área de Salina Cristal. (nível da água obtido em julho de 2007).

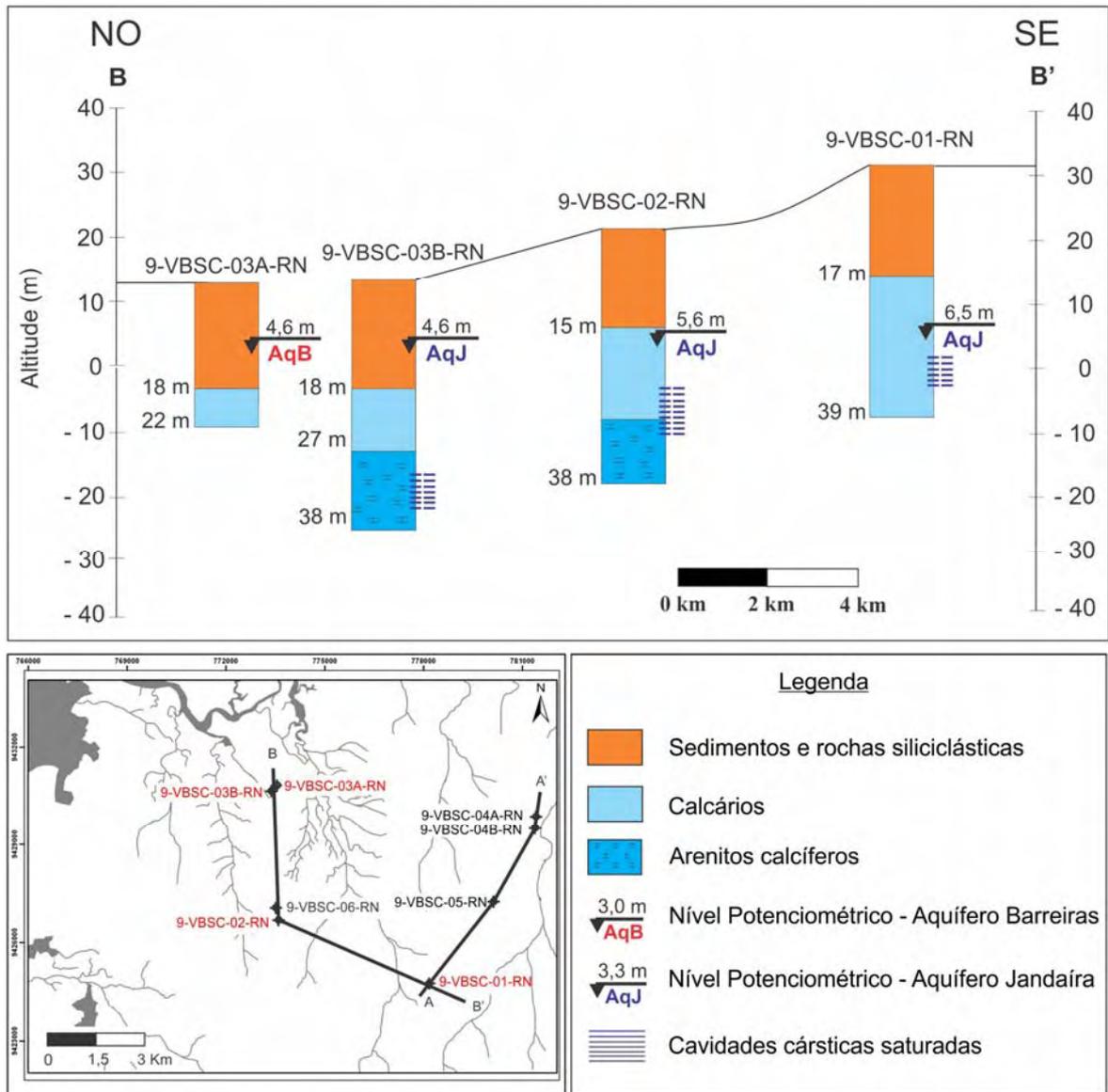


Figura 4.18 – Seção hidrogeológica B-B' da área de Salina Cristal. (nível da água obtido em julho de 2007).

4.3 - VARIAÇÃO SAZONAL DO NÍVEL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As campanhas de medição de níveis de água subterrânea no âmbito do estudo foram realizadas em janeiro e julho do ano de 2007 (**Figura 4.19**). A contribuição da precipitação pluviométrica na recarga das águas subterrâneas foi avaliada a partir da análise dos dados da **Tabela 4.4**. Na referida tabela são apresentados os valores de precipitação total mensal, bem como o percentual correspondente de chuvas, para o ano de 2007. Os dados revelam que aproximadamente 99% das chuvas ocorreram de janeiro a julho, com pico das chuvas entre os meses de fevereiro e março. De agosto a dezembro ocorreu apenas 1% dos eventos de chuva, e os meses de setembro a dezembro destacam-se pela ausência total de chuvas.

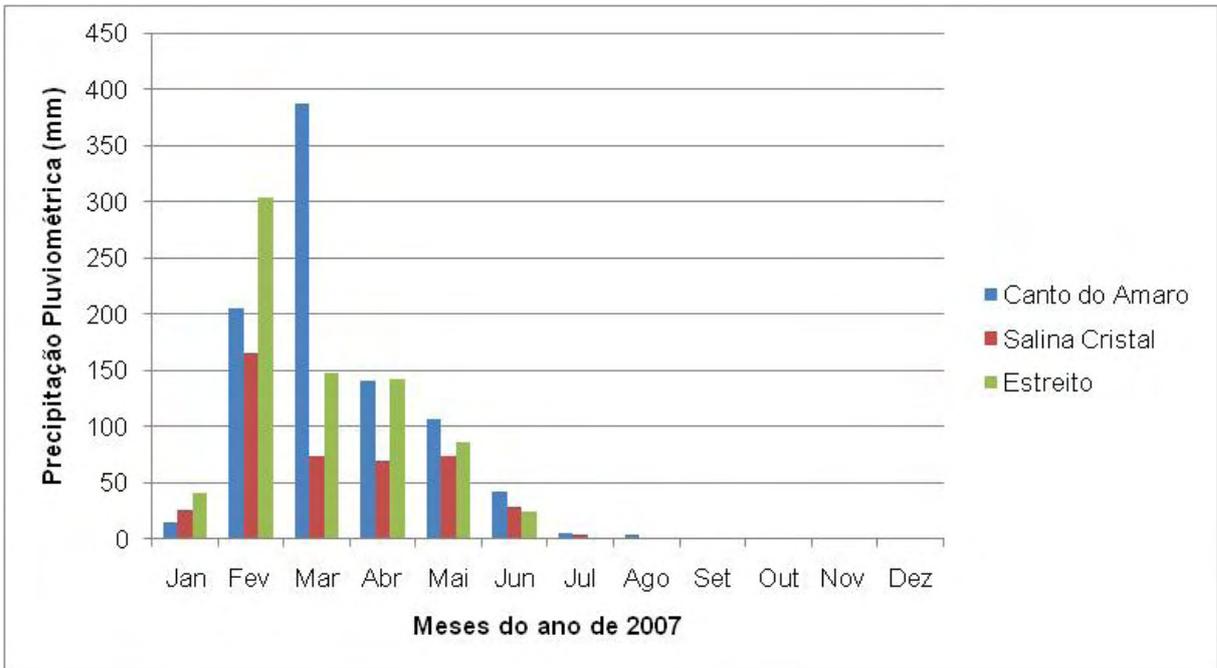


Figura 4.19 - Pluviometria mensal (mm) no ano de 2007. A coleta representativa do período de maior estiagem ocorreu no mês de janeiro, e a representativa do período das chuvas em julho de 2007.

De acordo com os dados apresentados na **Tabela 4.4**, a campanha realizada em julho corresponde ao final do período úmido, sendo, portanto, representativa do período de máxima precipitação pluviométrica que ocorre entre fevereiro-março. A medição de níveis realizada em janeiro representa o período de estiagem máxima da área, já que entre setembro e dezembro não ocorrem eventos de chuva. Portanto, pode-se afirmar que as campanhas realizadas são representativas do período de máxima variação sazonal de nível da água.

Tabela 4.4 – Precipitação total mensal para o ano de 2007. Os dados de Mossoró (área de Canto do Amaro) e Macau (área de Salina Cristal) foram fornecidos pelo INMET e para Assú (área de Estreito) fornecidos pela EMPARN.

	PP	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
CA	(mm)	14,7	205,2	386,5	141,2	106,5	42,4	5	3,6	0	0	0	0	905,1
	(%)	1,6	22,7	42,7	15,6	11,8	4,7	0,6	0,4	0	0	0	0	100
SC	(mm)	26	165,4	73,3	69,1	74,1	28,9	4,5	0,8	0	0	0	0	442,1
	(%)	5,9	37,4	16,6	15,6	16,8	6,5	1,0	0,2	0	0	0	0	100
ET	(mm)	41,3	304	147,3	142,3	86,2	24,3	1,1	0	0	0	0	0	746,5
	(%)	5,53	40,7	19,7	19,1	11,5	3,3	0,1	0	0	0	0	0	100

Nota: CA=Canto do Amaro, SC=Salina Cristal, ET=Estreito, PP= Precipitação pluviométrica.

A **Tabela 4.5** apresenta os resultados das medições de nível de água nos poços e as respectivas variações de carga observadas no período monitorado. De maneira geral, no que diz respeito à variação sazonal, não são observadas diferenças significativas nos níveis das águas subterrâneas entre os períodos avaliados. Isso evidencia que o processo de recarga sazonal de curta duração provavelmente não deve influenciar direta e imediatamente para uma elevação significativa do nível das águas subterrâneas, ou talvez não tenha sido possível registrar essas variações nos locais estudados, o que poderia ser percebido principalmente num tempo de observação mais longo.

Tabela 4.5 - Variações do nível estático (m) dos poços, obtidos ao final da estação seca e úmida.

Área	Aquífero	Poço	Período seco (janeiro/2007)		Período úmido (julho/2007)		Variação de carga (m)
			NE (m)	C P (m)	NE (m)	C P (m)	
Canto do Amaro	Jandaíra	9-VBCA-01-RN	65,93	40,21	65,84	40,29	0,09
	Jandaíra	9-VBCA-03-RN	6,97	4,48	6,81	4,63	0,16
	Jandaíra	9-VBCA-04-RN	5,70	3,64	5,53	3,81	0,17
	Jandaíra	9-VBCA-06-RN	38,32	9,36	38,37	9,31	-0,05
	Jandaíra	9-VBCA-07-RN	39,78	25,06	39,76	25,08	0,02
	Jandaíra	9-VBCA-09-RN	115,10	21,70	115,09	21,70	0,01
	Jandaíra	9-VBCA-10-RN	39,92	24,71	39,84	24,79	0,08
	Barreiras	9-VBCA-02-RN	6,92	1,83	6,65	2,09	0,27
	Barreiras	9-VBCA-05-RN	36,71	3,35	36,76	3,30	-0,05
Estreito	Jandaíra	9-VBET-01-RN	19,85	10,30	19,87	10,28	-0,02
	Jandaíra	9-VBET-02-RN	31,97	26,78	31,90	26,85	0,07
	Jandaíra	9-VBET-03-RN	20,46	40,62	20,38	40,69	0,08
	Jandaíra	9-VBET-04-RN	20,42	29,32	20,50	29,22	-0,08
	Jandaíra	9-VBET-06-RN	26,05	10,23	25,96	10,32	0,09
	Jandaíra	9-VBET-07-RN	-	-	36,64	23,14	-
	Jandaíra	9-VBET-08-RN	-	-	20,40	41,64	-
	Barreiras	9-VBET-05-RN	45,65	16,94	45,76	16,82	-0,11
Salina Cristal	Jandaíra	9-VBSC-01-RN	26,47	6,54	26,52	6,48	-0,05
	Jandaíra	9-VBSC-02-RN	16,81	5,44	16,66	5,58	0,15
	Jandaíra	9-VBSC-03B-RN	9,59	4,30	9,24	4,65	0,35
	Jandaíra	9-VBSC-04B-RN	18,34	6,75	18,35	6,74	-0,01
	Jandaíra	9-VBSC-05-RN	-	-	25,38	6,50	-
	Jandaíra	9-VBSC-06-RN	-	-	16,90	5,31	-
	Barreiras	9-VBSC-03A-RN	9,52	4,23	9,14	4,61	0,38
	Barreiras	9-VBSC-04A-RN	18,33	6,78	18,35	6,75	-0,02

Nota: Alguns poços não apresentam resultados de medição de níveis no período seco porque as perfurações foram executadas posteriormente.

Apenas nos setores onde a profundidade do nível da água é mais rasa, observa-se alguma resposta relativamente mais significativa da variação dos níveis devido à recarga

sazonal. Como é o caso dos poços 9-VBCA-02-RN e 9-VBSC-03A-RN no aquífero Barreiras, que apresentaram variação de 0,27 m e 0,38 m, respectivamente, do período seco para o período úmido. Para o aquífero Jandaíra observa-se variação sazonal do nível de água nos poços 9-VBCA-03-RN (variação de 0,16 m), 9-VBCA-04-RN (variação de 0,17 m), 9-VBSC-02-RN (variação de 0,15 m) e 9-VBSC-03B-RN (variação de 0,35 m). Em Estreito, onde o nível das águas subterrâneas é mais profundo, não foram observadas diferenças significativas entre as campanhas de medição.

Alguns pontos observados indicaram uma variação negativa de carga, isto é, os níveis de água ao final da estação seca estão mais rasos que ao final da época chuvosa, refletindo com isto uma defasagem entre a ocorrência das chuvas e a recarga efetiva das águas subterrâneas.

Na maior parte das áreas de estudo as coberturas siliciclásticas, tendo porosidade granular, retém mais efetivamente as águas de chuva infiltradas, e as transferem por drenança vertical descendente, favorecendo a uma recarga mais contínua do aquífero Jandaíra subjacente.

A presença de carstes na superfície do terreno, nos locais de afloramento do calcário Jandaíra, não é comumente encontrada em todo local. As condições de heterogeneidade e anisotropia do aquífero Jandaíra podem influenciar nas condições de porosidade e permeabilidade, e conseqüentemente nas variações espaciais, temporais e de intensidade dos processos de recarga em diferentes áreas.

A elevação do nível das águas subterrâneas pode ser de resposta lenta em relação aos períodos e intensidades de recarga, conforme evidenciado (**Tabela 4.5**). Neste caso, a constatação e quantificação mais efetiva do processo de recarga, com a conseqüente elevação do nível das águas subterrâneas devem ser conduzidas mediante um monitoramento prolongado dos níveis de água (vários anos). Isto confirmaria a efetiva elevação do nível das águas após sucessivos anos chuvosos, em oposição a sucessivos anos secos, nos quais os níveis desses últimos estariam sempre mais baixos e/ou rebaixando. No entanto, não fica descartada a hipótese sazonal de que, entre um ano e outro possa ocorrer alguma recarga sazonal local, que provoque oscilação do nível das águas subterrâneas com alguma intensidade, também de forma localizada, e influenciada por fatores hidrogeológicos e topográficos específicos de cada trecho.

4.4 - COMPORTAMENTO DO FLUXO SUBTERRÂNEO

A análise do fluxo subterrâneo nas áreas de estudo foi realizada apenas para o aquífero Jandaíra, tendo em vista que o aquífero Barreiras nos setores estudados não se

revelou como uma unidade produtora de águas, devido a sua descontinuidade espacial/lateral e reduzida espessura saturada na maior parte das áreas.

Na elaboração dos mapas de fluxo das águas subterrâneas foram utilizados os dados obtidos no período úmido, para o ano de 2007. Para o período seco não foram produzidos mapas porque nem todos os poços haviam sido construídos a essa época. De forma complementar, foi conduzida a análise da profundidade do nível de água nos poços registrada nas duas campanhas amostrais, evidenciando que não foram observadas diferenças significativas na oscilação do nível das águas subterrâneas para o período avaliado (**item 4.3**), tendo a distribuição de cargas hidráulicas no mapa evidenciado no mapa o mesmo comportamento.

4.4.1 - Potenciometria da Área de Canto do Amaro

Em Canto do Amaro o escoamento das águas do aquífero Jandaíra coincide com a declividade geral do terreno, se desenvolve, em geral, no sentido norte/noroeste (no sentido da linha de costa) a partir de um alto potenciométrico estabelecido na porção sul da área (**Figura 4.20**).

O fluxo subterrâneo se dá sob gradiente hidráulico de 0,27% no setor oriental da área, passando a 0,32% no setor central e 0,53% no setor oeste; ou seja, há um aumento sensível do gradiente hidráulico de leste para oeste. O gradiente hidráulico médio é da ordem de 0,37%.

4.4.2 - Potenciometria da Área de Estreito

Na área de Estreito o mapa potenciométrico revela que o fluxo das águas subterrâneas segue o sentido geral de oeste para leste (no sentido do vale do Rio Açu) a partir de um alto potenciométrico estabelecido na porção oeste da área (**Figura 4.21**).

O fluxo subterrâneo ocorre sob gradiente hidráulico médio estimado em 0,54%, oscilando entre 0,50% e 0,58%. A área de Estreito demonstrou um gradiente hidráulico sensivelmente maior, fato este que sugere condições de escoamento mais restrito, podendo influenciar no maior tempo de trânsito e de residência das águas subterrâneas, e daí maior interação química com o arcabouço litológico do aquífero.

4.4.3 - Potenciometria da Área de Salina Cristal

Em Salina Cristal o mapa potenciométrico mostra que o escoamento das águas subterrâneas se dá para noroeste, no sentido do mar e da planície flúvio-marinha (**Figura 4.22**). O fluxo subterrâneo se dá sob um gradiente hidráulico médio estimado em 0,029%, o menor dentre as três áreas.

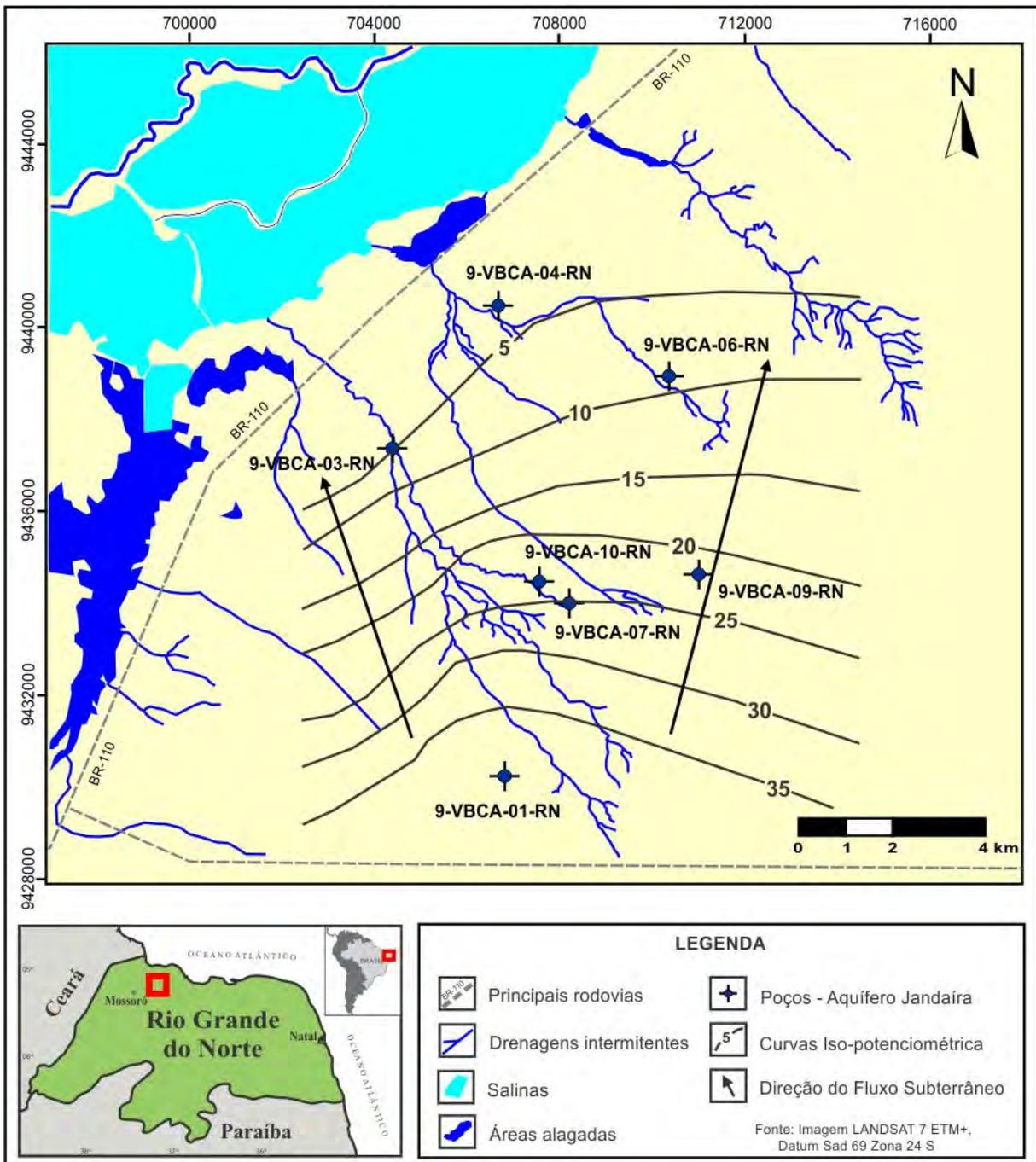


Figura 4.20 – Mapa de fluxo do aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro no período úmido. (nível da água obtido em julho de 2007).

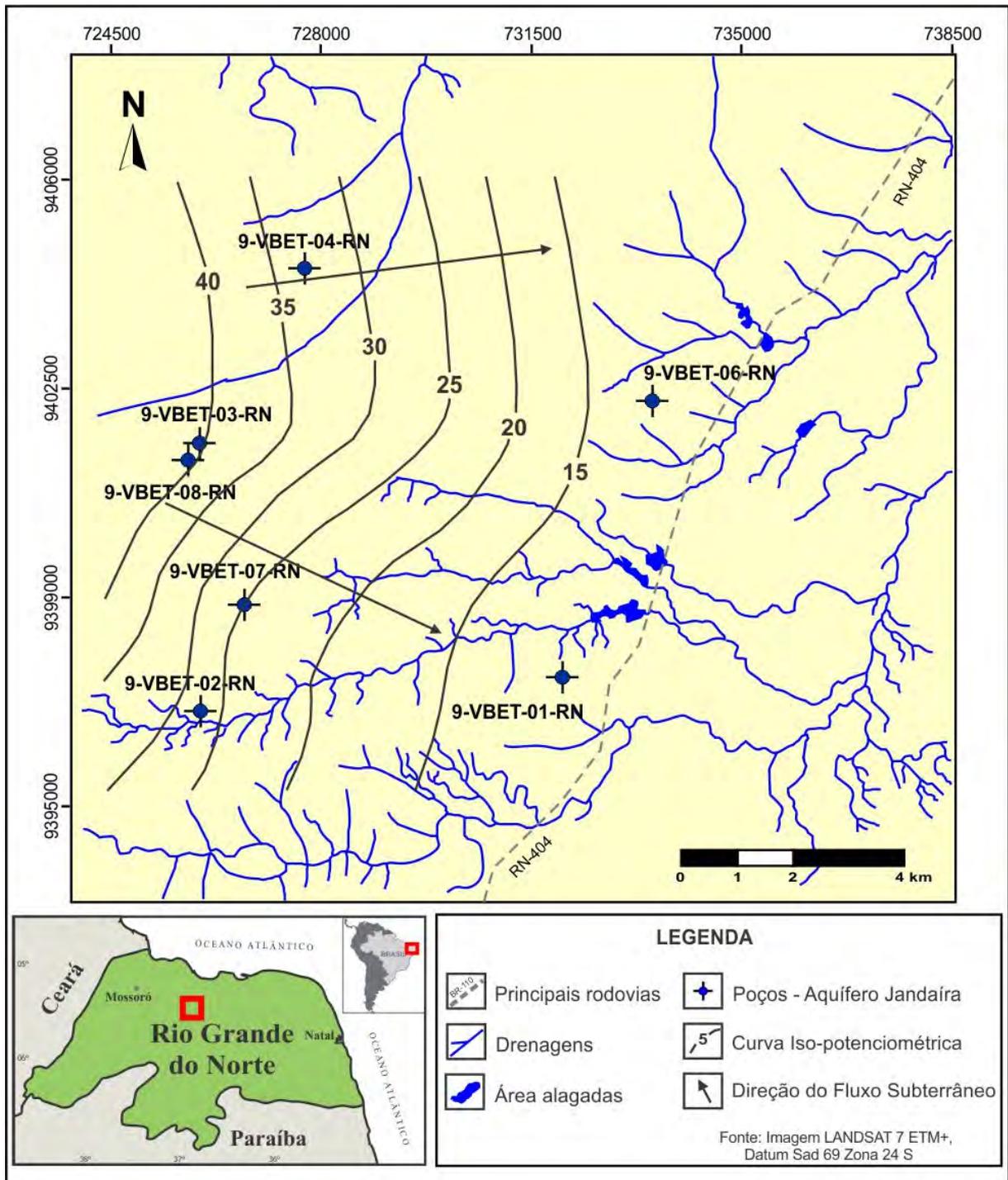


Figura 4.21 – Mapa de fluxo do aquífero Jandaíra na área de Estreito no período úmido. (nível da água obtido em julho de 2007).

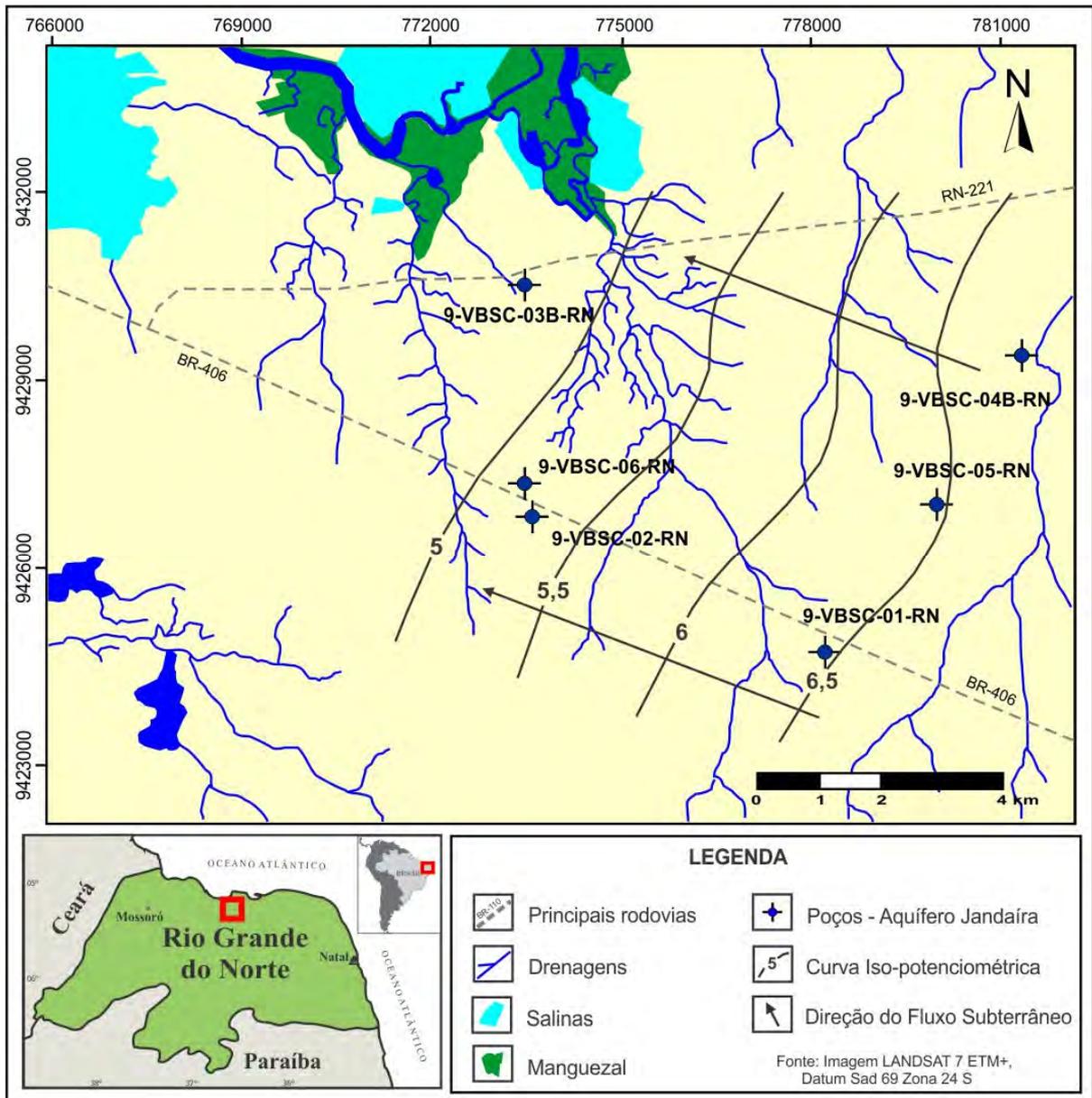


Figura 4.22 – Mapa de fluxo do aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal no período úmido. (nível da água obtido em julho de 2007).

4.4.4 – Considerações sobre fluxo das águas nas áreas de estudo

O escoamento natural das águas subterrâneas é determinado pela entrada e saída de águas no sistema aquífero. Na área de estudo a exploração do aquífero Jandaíra através de poços é desprezível, evidenciando a condição de equilíbrio hidrodinâmico do aquífero no âmbito estudado e a representatividade das condições de fluxo subterrâneo estabelecida.

Nas áreas de estudo o sentido do fluxo das águas subterrâneas coincide com a declividade geral do terreno. A potenciometria nas três áreas revelou uma superfície hidrostática bem definida, provavelmente pela ocorrência de um grande número de pequenos condutos cársticos estreitamente interligados. O comportamento uniforme do

escoamento das águas subterrâneas é evidenciado, mesmo se tratando de um aquífero cárstico de caráter heterogêneo e anisotrópico.

No setor estudado, a recarga difusa predomina e se processa extensivamente sobre toda a região, refletindo numa superfície hidrostática uniforme. A ocorrência restrita de fenômenos cársticos em superfície minimiza o efeito da recarga concentrada, que poderia se traduzir em altos e baixos potenciométricos caracterizados em mapa por curvas fechadas de fluxo canalizado.

A entrada de água no aquífero Barreiras e Jandaíra se processa pela infiltração do excedente definido no balanço hídrico, nas respectivas áreas de recarga. No domínio da Formação Barreiras a recarga corresponde às águas infiltradas diretamente na sua área aflorante (**Figura 4.23**), sendo em seguida transferidas para o aquífero Jandaíra subjacente (**Figura 4.24**), por drenança vertical descendente, recarregando este último.



Figura 4.23 – Afloramento de arenitos e conglomerados pertencentes à Formação Barreiras, na área de Estreito.

Localmente, ocorre a recarga direta do aquífero Jandaíra através da infiltração nos condutos cársticos-fissurais que localmente ocorrem no topo do pacote calcário aflorante (**Figura 4.25**), como em alguns setores do extremo sul e norte da região de Canto do Amaro, faixas sul/sudoeste de Estreito, e faixas sudoeste de Salina Cristal.



Figura 4.24 – Pacote de calcário da Formação Jandaíra subjacente aos sedimentos siliciclásticos da Formação Barreiras, na área de Estreito.



Figura 4.25 – Carstes em superfície, desenvolvidos nos calcários da Formação Jandaíra, na área de Canto do Amaro.

4.5 - MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

A interpretação dos perfis litológicos das sondagens de reconhecimento e dos poços de monitoramento, juntamente com a contextualização geológica, estrutural e hidrogeológica associadas, possibilitaram o estabelecimento do modelo hidrogeológico conceitual que pode ser interpretado para as três áreas no estudo, conforme ilustrado na **Figura 4.26**. O modelo hidrogeológico conceitual permite a compreensão a respeito da ocorrência e geometria dos sistemas aquíferos, a dinâmica das águas subterrâneas, a vulnerabilidade do aquífero e os riscos prováveis à contaminação frente à presença de fontes poluidoras.

As unidades hidroestratigráficas principais representadas no modelo são o aquífero Jandaíra (composto por calcários puros e impuros, localmente com intercalações de arenitos calcíferos) e o aquífero Barreiras (composto por arenitos finos a grossos com matriz síltico-argilosa), que ocorre sobreposto ao aquífero Jandaíra.

Conforme aspectos representados no modelo conceitual, o aquífero Barreiras apresenta superfície potenciométrica desenvolvida somente em determinados setores. Essa superfície é descontínua no espaço em função da predominância do caráter insaturado do aquífero.

O aquífero Jandaíra apresenta uma superfície potenciométrica de caráter regular, espacialmente contínua e ligeiramente controlada pelo relevo. A camada aquífera contém cavidades e condutos saturados interligados e integrados, sendo possível a perfuração de poços com água em todos os domínios geográficos. Portanto, a sua superfície potenciométrica é de caráter virtual, sendo definida ao serem interceptadas as cavidades cársticas saturadas em profundidade, instante em que ocorre a ascensão da água no poço até atingir a condição de equilíbrio estático. A ascensão da água é, portanto, provavelmente controlada pelo princípio dos vasos comunicantes, caracterizando um aquífero de natureza livre, especialmente onde a sua superfície potenciométrica está posicionada abaixo da camada aquífera carbonática. Não fica descartada a ocorrência de condutos em condição de confinamento, provavelmente pela pressão litostática do maciço carbonático e/ou condutos fechados por material sedimentar localizado acima dos condutos saturados.

Existem setores nos quais ambas as unidades aquíferas estão mais susceptíveis a sofrer influência da cunha salina natural, especialmente nos domínios costeiros mais próximos ao mar e às planícies flúvio-marinhas. Esses setores estão esquematicamente representados na porção direita do bloco, pelos poços VBCA-02-RN; 9-VBCA-03-RN; 9-VBSC-02-RN; 9-VBSC-03B-RN, localizados nas áreas de Canto do Amaro e Salina Cristal.

O esquema apresentado no domínio esquerdo da figura é associado a uma interpretação na área de Estreito. O Rio Açu é reconhecidamente de grande potencial e o aquífero Jandaíra subjacente está susceptível de receber influência hidráulica e manter

conexão lateral e/ou vertical com o aquífero aluvial, principalmente nos domínios de cotas topográficas mais baixas.

O aquífero Barreiras compõe uma unidade hidrogeológica que deve favorecer a infiltração de águas de chuva e transferência das águas infiltradas para recarga do aquífero Jandaíra, mesmo que este processo ocorra simultaneamente com uma provável recarga advinda de contribuição regional. Ainda assim, nos setores nos quais apresenta espessura litológica mais expressiva, o aquífero Barreiras demonstra importância como unidade de cobertura e proteção natural do aquífero Jandaíra, conferindo uma menor vulnerabilidade à poluição a este sistema aquífero subjacente.

Na ocorrência de ambas as unidades aquíferas saturadas, num mesmo domínio (exemplos: setor do poço 9-VBCA-02-RN e 9-VBSC-03A-RN), foi constatado que as cotas potenciométricas são semelhantes e ajustadas quase a uma mesma altura, sugerindo interconexão hidráulica entre as unidades, capaz de evidenciar que se trata de um sistema aquífero único, de natureza livre.

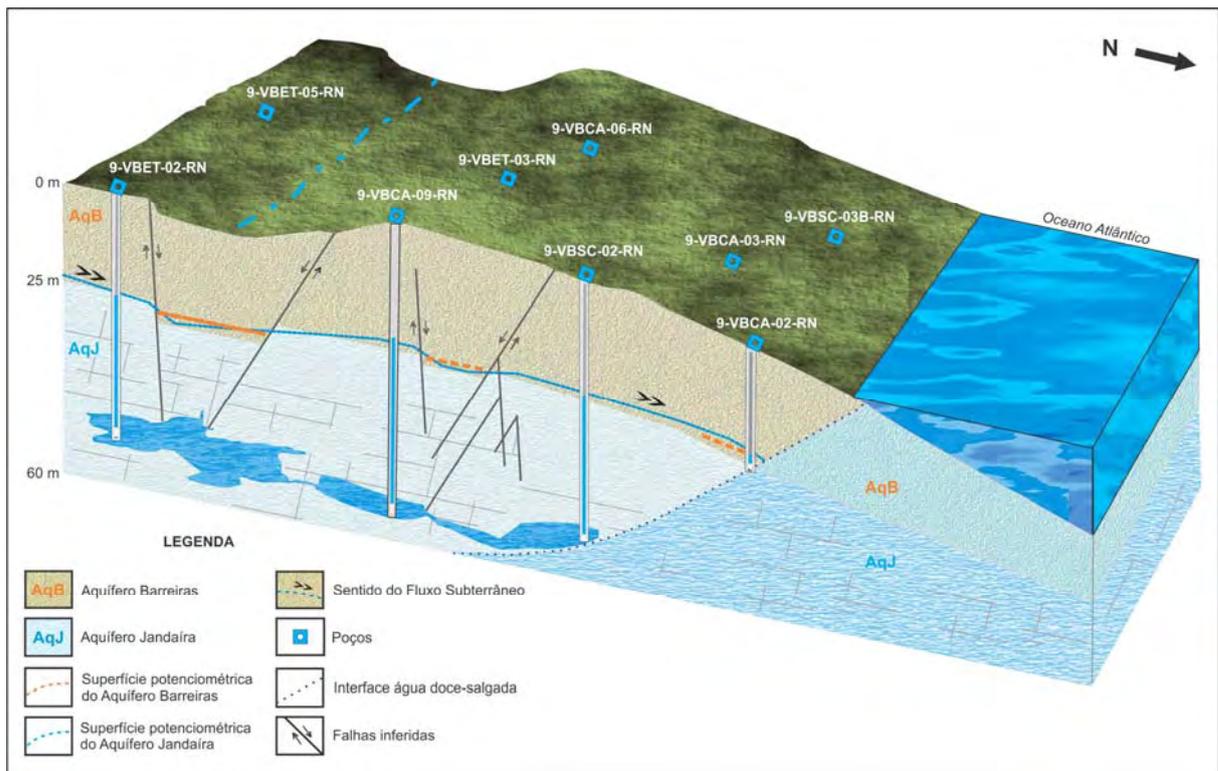


Figura 4.26 - Modelo hidrogeológico conceitual esquematicamente ilustrado, retratando as diferentes situações hidrogeológicas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra nas três áreas de estudo.

Capítulo V: HIDROGEOQUIMICA

5.1 – INTRODUÇÃO

A água é o principal agente de alteração química das rochas, que ocorre mediante o consumo de CO₂ (atmosférico ou orgânico) e a liberação de elementos químicos em solução. Uma série de fatores controla o grau de alteração química de uma rocha, tais como o clima, mineralogia da rocha, tempo de interação água-rocha, existência ou não de camada de solo e a composição química da água de infiltração. Na área de estudo, o clima semiárido exerce papel fundamental nos processos de alteração química que, devido à escassez de água, são mais lentos.

O tipo de rocha influencia essencialmente através de três propriedades: a estrutura, textura e mineralogia. A estrutura e a textura influenciam a forma como a água circula numa rocha, determinando a extensão da relação água-rocha. A mineralogia da rocha determina em grande parte a concentração dos cátions na água subterrânea, onde os íons Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ estão retidos na estrutura do mineral, e devidos aos processos de dissolução passam, com certa facilidade, para a água (Custódio & Llamas, 2001).

Nas áreas de estudo a alteração das rochas carbonáticas ocorre com a dissolução essencialmente da calcita (CaCO₃) mediante uma reação de hidrólise, a partir da água de chuva que se infiltra em subsuperfície.

A água meteórica absorve facilmente o CO₂ da atmosfera ou do solo, e se transforma numa solução aquosa ácida (ácido fraco) que reage com o meio carbonático com a dissociação do H⁺ e do H₂CO₃. Essa reação ocorre da seguinte forma (White, 1988):



Comumente em aquíferos carbonáticos, o HCO₃⁻ é o principal ânion em solução, resultante da dissolução congruente da calcita:



Com a dissolução da calcita, o íon Ca²⁺ se mantém em solução e em equilíbrio com o HCO₃⁻. Mediante o aumento da concentração de CO₂ mais calcita é dissolvida, e caso a concentração de CO₂ diminua ou desapareça, a solução saturada em HCO₃⁻ irá gerar um precipitado fino de CaCO₃.

Dessa forma, a porosidade secundária do carste é controlada basicamente pelo acréscimo ou diminuição da concentração de CO₂. Obviamente, outros fatores mais complexos, como exemplos, a mistura de águas de outras unidades aquíferas com diferentes condições de equilíbrio de pressão de CO₂ e/ou processos biológicos podem, também, favorecer a dissolução ou precipitação de CaCO₃.

No âmbito do presente trabalho de investigação foi realizado um estudo hidrogeoquímico detalhado das águas subterrâneas de um setor da Bacia Potiguar, onde a principal unidade aquífera são os calcários da Formação Jandaíra e secundariamente as coberturas siliciclásticas correlacionadas à Formação Barreiras. Foram levantadas as relações existentes entre o quimismo da água subterrânea, com as características hidrogeológicas, mineralógicas das formações aquíferas e os fatores climáticos e geográficos envolvidos. Os dados obtidos são tratados por área amostral.

A metodologia incluiu: (i) avaliação da sazonalidade nas modificações químicas da água; (ii) caracterização da distribuição espacial das principais características físico-químicas das águas subterrâneas; (iii) identificação dos principais processos geoquímicos de interação água-rocha; (iv) estudo de outros processos responsáveis pela variação do quimismo da água subterrânea, notadamente sobre os aspectos da sua salinidade excessiva, com especial ênfase nos processos de mistura com águas de origem marinha.

5.2 - AMOSTRAGEM DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

5.2.1 - Seleção do Método de Amostragem

A seleção do método de amostragem de águas subterrâneas mais adequado depende das especificidades da unidade aquífera objeto de estudo e dos objetivos do próprio estudo. No caso dos poços executados no âmbito do estudo, a amostragem ocorreu pelo método de **Purga de Baixa Vazão** e pelo método de **Purga Mínima**. Este último é, na realidade, um desdobramento do primeiro método citado, porém aplicado para condições de aquíferos cuja formação geológica impõe uma condutividade hidráulica comparativamente mais baixa.

À época de execução do estudo não existiam normas brasileiras descrevendo procedimentos de amostragem de águas subterrâneas. Portanto, foi procedida a busca na literatura e normatizações internacionais. Atualmente, a ABNT através da *NBR 15847:2010 – Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento* – estabelece os métodos para purga de poços usados na investigação e programas de monitoramento da qualidade da água subterrânea. Ressalta-se, que todos os procedimentos amostrais constantes na referida norma foram contemplados no âmbito do presente estudo, já que as indicações constantes na norma já vinham sendo utilizadas no âmbito internacional.

A escolha do procedimento de bombeamento e amostragem das águas subterrâneas (em purga de baixa vazão ou purga mínima) foi definida com base na classificação do tempo para recuperação da condição estática do poço, sugerida por Nielsen e Nielsen (2007). A análise da evolução do rebaixamento e o tempo de recuperação do nível da água nos poços

estão diretamente associados à condutividade hidráulica da formação nas vizinhanças do poço. Para o presente estudo foram adotados os seguintes intervalos:

- Poço de recarga LENTA: poço no qual o nível dinâmico recupera num tempo superior à duas (02) horas. Nesse caso, foi aplicada a amostragem por purga mínima;
- Poço de recarga RÁPIDA: poço no qual o nível dinâmico recupera num tempo inferior ou igual à duas (02) horas. Nesse caso, foi aplicada a amostragem por baixa vazão.

A seguir são discutidos os procedimentos que levaram a classificação dos poços de acordo com a sua classe de recarga e posteriormente é apresentado um resumo acerca de cada método de purga e amostragem.

5.2.1.1 - Classificação dos poços quanto à recarga

Para se obter um cenário qualitativo das características hidráulicas do aquífero no âmbito do poço, foi realizado um procedimento de classificação dos poços quanto à recarga, conforme adaptação da proposta de Nielsen & Nielsen (2007). Essa classificação é realizada de acordo com o tempo necessário para recarga/renovação da condição estática do poço e influencia na escolha do procedimento de bombeamento e amostragem das águas subterrâneas (baixa vazão ou purga mínima).

O procedimento de campo necessário para a classificação dos poços quanto à recarga ocorreu mediante o bombeamento de cada unidade numa vazão pequena, porém suficiente para garantir o esgotamento do poço. Após a retirada da bomba e da tubulação (que demora um tempo aproximado de 20 minutos), passou-se a medir a recuperação do poço, até que ele atingisse o equilíbrio estático novamente.

A **Tabela 5.1** sumariza o tempo demandado para a recuperação dos poços e a respectiva classe de recarga. Nos poços de recarga lenta foi aplicado o método de amostragem e purga mínima e nos poços de recarga média e rápida a amostragem de purga de baixa vazão.

Tabela 5.1 - Classificação dos poços dentro de faixas de recarga em função do tempo de recuperação do nível da água no poço.

Poços de Monitoramento	Tempo de recuperação para até atingir pelo menos 80% da sua condição estática inicial	Classe de Recarga
9-VBCA-01-RN 9-VBCA-03-RN 9-VBET-04-RN 9-VBCA-06-RN 9-VBET-07-RN 9-VBCA-09-RN 9-VBSC-01-RN 9-VBSC-03A-RN 9-VBSC-03B-RN	Superior a 2 horas	Poços de recarga lenta

Tabela 5.1 continuação - Classificação dos poços dentro de faixas de recarga em função do tempo de recuperação do nível da água no poço.

Poços de Monitoramento	Tempo de recuperação para até atingir pelo menos 80% da sua condição estática inicial	Classe de Recarga
9-VBCA-05-RN 9-VBET-03-RN 9-VBSC-04A-RN 9-VBCA-07-RN 9-VBET-05-RN 9-VBSC-04B-RN 9-VBCA-10-RN 9-VBET-06-RN	Entre 1 e 2 horas	Poços de recarga média
9-VBCA-02-RN 9-VBET-01-RN 9-VBSC-02-RN 9-VBCA-04-RN 9-VBET-02-RN 9-VBSC-05-RN 9-VBET-08-RN 9-VBSC-06-RN	Inferior a 1 hora	Poços de recarga rápida

5.2.1.2 - Método de purga de baixa vazão

Esse método consiste na purga e posterior amostragem de águas subterrâneas numa vazão pequena (máximo 1L/min), que tem como objetivo minimizar a perturbação no interior do poço bombeado e em sua vizinhança. No âmbito do estudo esse método foi aplicado nos poços classificados como de Recarga Rápida e Média, isto é, nas unidades em que o tempo que o poço demora até atingir pelo menos 80% da sua condição estática inicial é inferior ou igual a duas hora.

Inicialmente, procura-se a estabilização do rebaixamento do poço (nível dinâmico). Posteriormente, através do uso de uma célula de fluxo, os parâmetros indicadores de qualidade da água são medidos (pH, temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e potencial redox, turbidez) *in situ* e monitorados até a sua estabilização. Os parâmetros indicativos da qualidade da água são considerados estáveis quando suas variações permanecem dentro de uma faixa de oscilação predeterminada, por no mínimo três leituras consecutivas (**Tabela 5.2**). No caso da turbidez é considerado adequado para amostragem se a água coletada apresentar valores ≤ 10 UNT.

Tabela 5.2 - Faixas de variação para a estabilização dos parâmetros indicativos da qualidade da água amostradas pelo método de Purga de Baixa-Vazão.

Parâmetro	Varição permitida
Temperatura	$\pm 0,5$ °C
pH	$\pm 0,2$ unidades
Condutividade elétrica	$\pm 5,0$ % das leituras
Potencial oxirredução	± 20 milivolts
Oxigênio dissolvido	± 10 % das leituras ou $\pm 0,2$ mg/L, o que for maior

A estabilização do nível dinâmico em conjunto com a estabilização dos parâmetros físico-químicos indica que a amostragem poderá ser iniciada. Ao se estabilizar o nível dinâmico do poço bombeado, há uma indicação clara de que a água bombeada representa a água subterrânea que passa diretamente da formação geológica para o poço através dos

filtros. Trata-se de uma condição em que a realimentação natural do poço está sendo feita pela própria água da formação geológica (que é função da condutividade hidráulica da formação nas imediações do poço), de tal forma que a eventual captação da água estagnada no poço é considerada inexistente ou desprezível. A estabilização dos parâmetros físico-químicos reforça esse comportamento hidráulico, com a indicação de que está havendo um equilíbrio químico da água sendo bombeada, visto que a água do ambiente geoquímico natural penetra no poço pelos filtros sem sofrer interferência significativa da água estagnada.

5.2.1.3 - Método de purga mínima

O método de **Purga Mínima** consiste numa alternativa de amostragem de águas subterrâneas para o caso de aquíferos ou setores do aquífero cuja formação geológica determina uma baixa condutividade hidráulica. No âmbito do estudo esse método foi aplicado nos poços classificados como de Recarga Lenta, isto é, nas unidades em que o tempo que o poço demora até atingir pelo menos 80% da sua condição estática inicial é superior a duas horas. Na prática, este método é aplicado em poços que, depois de bombeados, apresentam uma recuperação lenta do nível da água e quando amostrados pelo sistema de Baixa Vazão tendem a não estabilizar o rebaixamento do nível de água.

Na Purga Mínima a vazão de bombeamento não deve exceder os 100 mL/min, e coleta de águas é realizada sem a necessidade de estabilização do rebaixamento e dos parâmetros indicativos da qualidade da água. Nas **Figuras 5.1** e **5.2** podem-se visualizar os procedimentos de purga para amostragem de águas executados no presente trabalho.



Figura 5.1 - instalação da bomba de bexiga no poço.



Figura 5.2 - Funcionamento do sistema de bombeamento e detalhe da célula de fluxo para leitura e estabilização dos parâmetros.

5.2.2 – Procedimentos Amostrais

A campanha de amostragem de águas subterrâneas foi realizada em períodos sazonais distintos: uma representativa do período seco e outra do período úmido da região. A caracterização climatológica detalhada das áreas estudadas está apresentada no **Capítulo 2**. Na **Figura 5.3** pode-se visualizar a pluviometria média mensal das áreas na época da execução dos trabalhos. A amostragem de águas representativa do período seco (estiagem) foi realizada em janeiro de 2007, e conforme pode ser visualizado na referida figura, a coleta de águas foi efetuada ao final da época seca, representando o período máximo de estiagem e quando o aquífero sofre maior estresse hídrico. A amostragem representativa do período úmido (chuvoso) ocorreu em julho do mesmo ano, isto é, ao final da estação chuvosa, época em que as águas subterrâneas respondem ao maior aporte proveniente das chuvas.

Foram amostrados 19 poços para o período seco e 25 poços para o período úmido (os mesmos 19 do período seco e mais seis). A diferença no quantitativo deve-se a finalização das perfurações, que não foram concluídas a tempo para permitir a amostragem ainda no período seco. Do total de 25 poços, 20 desses captam águas do aquífero Jandaíra e cinco captam águas do aquífero Barreiras (**Tabela 5.3**). A disposição geográfica desses poços está nas **Figuras 5.4 a 5.6**.

No presente estudo foi considerada a hidroquímica da água do mar, visando a avaliação da influência marinha na salinização das águas subterrâneas. A amostra considerada foi coletada na costa da Praia de Areia Branca (Mossoró) em direção ao Porto Ilha no ano de 2010 e o laudo analítico foi cedido pelo geólogo Elmo Marinho de Figuerêdo.

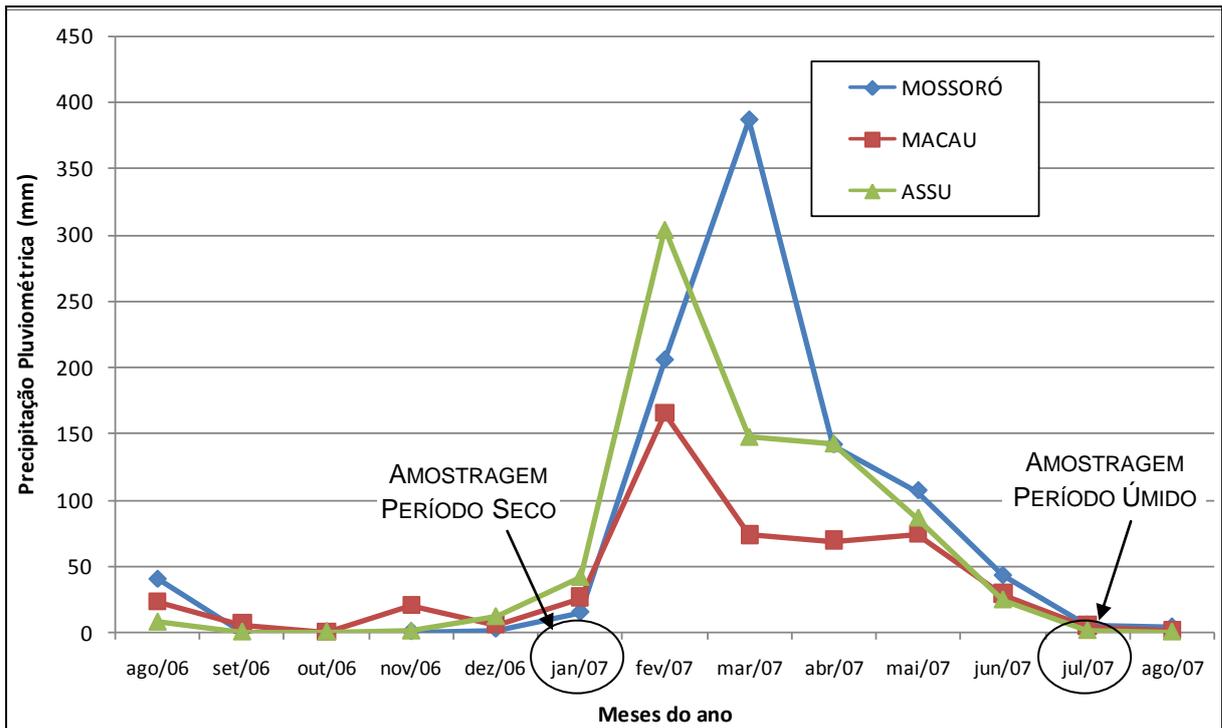


Figura 5.3 - Gráfico da média pluviométrica mensal (mm) de agosto de 2006 à agosto de 2007 e indicação da etapa de amostragem realizada. Os dados de Mossoró e Macau foram fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e para Assu fornecidos pela EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte).

Tabela 5.3 - Quantitativo de poços amostrados nas áreas de estudo, por unidade aquífera e período amostral.

Área	Aquífero Jandaira		Aquífero Barreiras	
	Total: 07 poços	Período Seco: 05 poços amostrados Período Úmido: 07 poços amostrados	Total: 02 poços	Período Seco: 02 poços amostrados Período Úmido: 02 poços amostrados
Canto do Amaro	Total: 07 poços	Período Seco: 05 poços amostrados Período Úmido: 07 poços amostrados	Total: 02 poços	Período Seco: 02 poços amostrados Período Úmido: 02 poços amostrados
Estreito	Total: 07 poços	Período Seco: 05 poços amostrados Período Úmido: 07 poços amostrados	Total: 01 poço	Período Seco: 01 poço amostrado Período Úmido: 01 poço amostrado
Salina Cristal	Total: 06 poços	Período Seco: 04 poços amostrados Período Úmido: 06 poços amostrados	Total: 02 poços	Período Seco: 02 poços amostrados Período Úmido: 02 poços amostrados
Total de poços por unidade aquífera	20		05	

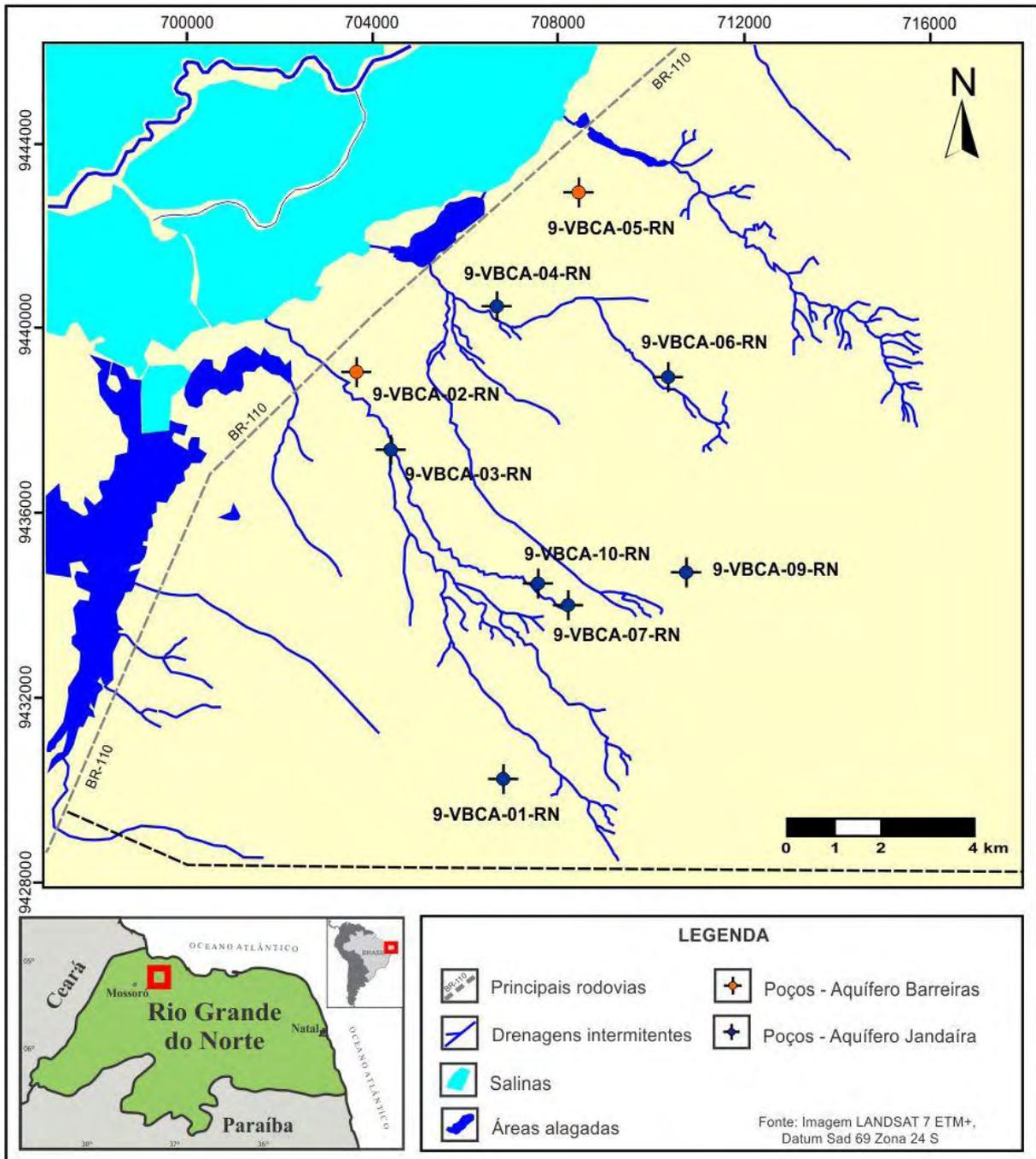


Figura 5.4 – Localização dos poços de monitoramento amostrados na área de Canto do Amaro

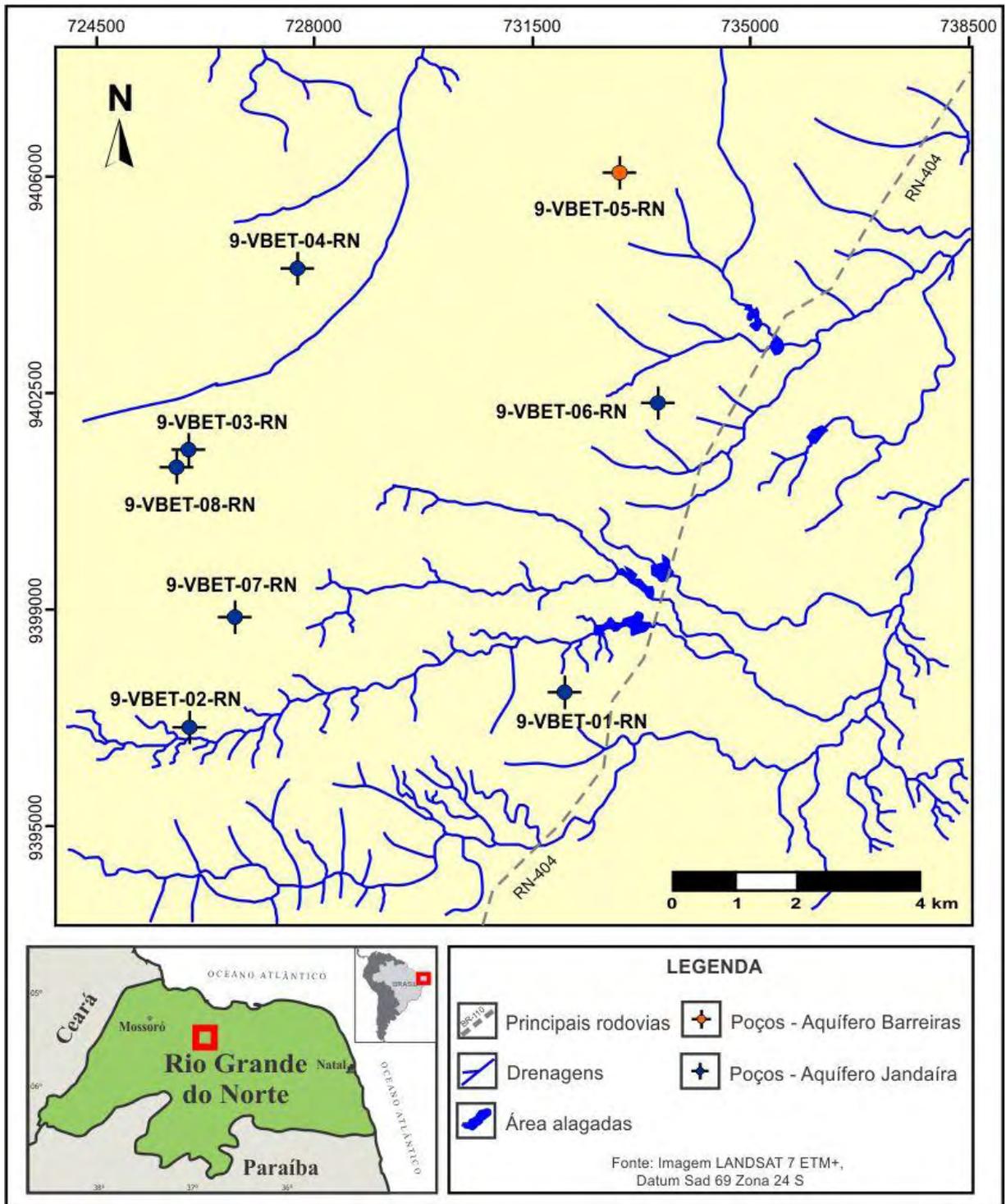


Figura 5.5 – Localização dos poços de monitoramento amostrados na área de Estreito.

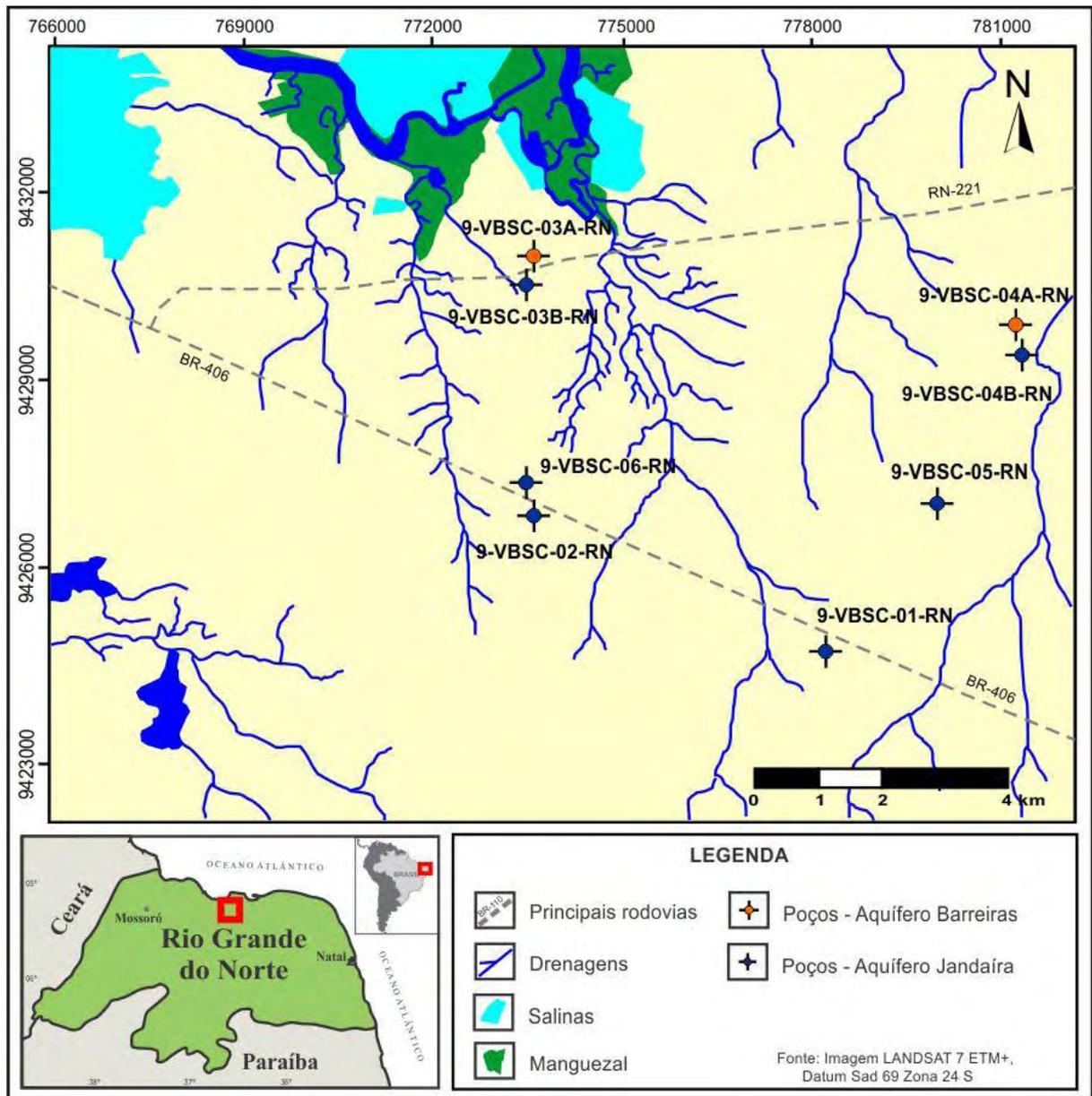


Figura 5.6 – Localização dos poços de monitoramento amostrados na área de Salina Cristal.

Os procedimentos de preservação e armazenamento das amostras foram realizados conforme as recomendações do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2005). Para a determinação dos metais dissolvidos foram coletadas alíquotas de amostras filtradas com o uso de um filtro descartável da marca *QuickFilter*, cujo material da membrana é de *polyethersulfone*, de porosidade $0,45 \mu\text{m}$. As **Figuras 5.7** e **5.9** ilustram alguns dos procedimentos realizados.



Figura 5.7 - Coleta da alíquota filtrada com o uso de um filtro descartável de porosidade 0,45 μm .



Figura 5.8 - Preservação das amostras na determinação analítica dos metais dissolvidos.



Figura 5.9 - Acondicionamento das amostras em caixa de isopor refrigeradas com gelo e inseridas em caixa de madeira para conservar a temperatura necessária.

Na **Tabela 5.4** estão apresentados os parâmetros determinados, o seu respectivo limite de detecção e método analítico utilizado, bem como o laboratório responsável pelo laudo. Os parâmetros condutividade elétrica e pH foram determinados *in situ* mediante sonda multiparamétrica. A dureza foi calculada com base na concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e o HCO_3^- calculado pela alcalinidade total (APHA, AWWA, WEF, 2005).

Tabela 5.4 – Parâmetros analisados limite de detecção, método analítico e laboratório responsável pela determinação.

Parâmetro	Limite de detecção	Método Analítico	Laboratório
Sólidos Totais Dissolvidos	0,1 mg/L	SMEWWW 2540 C	Laboratório de Fluidos da PETROBRAS. Mossoró/RN
Alcalinidade	20 mg/L	SMEWWW 2320 B	
Cl^-	1 mg/L	SMEWWW 4500- Cl^- B	
SO_4^-	0,1 mg/L	SMEWWW 4500- SO_4^{2-} E	
Ca^{2+} , Mg^{2+}	2,5 $\mu\text{g/L}$	EPA 6010 C	Departamento de Química da UFSM. Santa Maria/RS
K^+ , Na^+	10 $\mu\text{g/L}$		

A qualidade dos resultados analíticos obtidos foi avaliada calculando a condição de eletroneutralidade (E.N.) para cada uma das análises de água realizadas, que é dada pela seguinte equação (dados em meq/L):

$$E.N. (\%) = \frac{\sum(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Mg}) + \sum(\text{Cl}, \text{HCO}_3, \text{SO}_4)}{\sum(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Mg}) - \sum(\text{Cl}, \text{HCO}_3, \text{SO}_4)} \times 100$$

Custódio & Llamas (2001) aponta que o erro analítico admissível é função da concentração de sais em solução, e estabelece uma relação entre a percentagem de erro e a condutividade elétrica da água. Conforme **Tabela 5.5**, o maior erro admissível está nas soluções menos concentradas.

Tabela 5.5 - Erro de balanço e sua relação com a condutividade elétrica da água (Custódio & Llamas, 2001).

Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Erro admissível (%)	30	10	8	4	4

A **Figura 5.10** expressa o erro de cada análise e a sua comparação com a condutividade elétrica. Do conjunto de amostras de água analisadas, 57% apresentaram balanço iônico com erros inferiores a 4%; e 43% apresentam erros entre 4 e 10%. Optou-se por considerar todas as amostras com balanço iônico inferior ou igual a 10%.

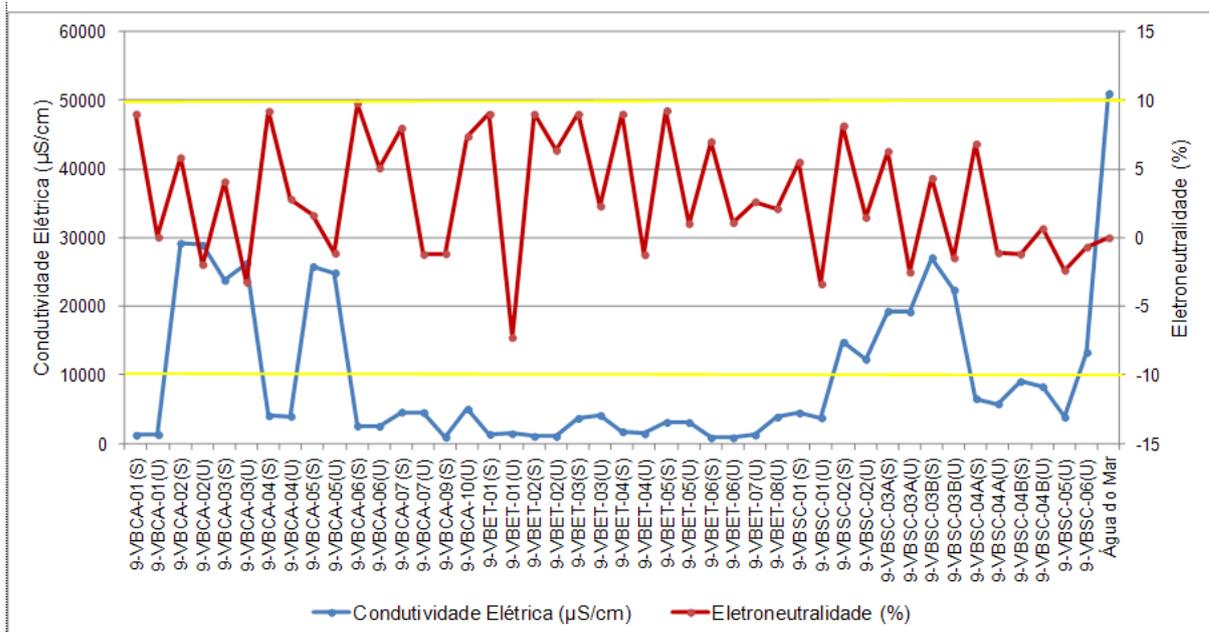


Figura 5.10 - Balanço iônico para determinação do erro de análise das amostras de água subterrânea e comparação com o valor de condutividade elétrica. No eixo X, a nomenclatura de cada poço é seguida da informação S ou U, que aponta para a amostragem no período Seco ou Úmido, respectivamente. A linha amarela marca a faixa de erro analítico admissível no presente trabalho.

Nas **Tabelas 5.6** e **5.7** são apresentados os resultados analíticos dos poços amostrados para o período seco e úmido, respectivamente. Na **Tabela 5.8** consta o resultado analítico de uma amostra da água do mar coletada na costa da Praia de Areia Branca/RN e determinada no laboratório da EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN).

Tabela 5.6 – Resultados analíticos dos poços amostrados no período **seco**, considerando as três áreas de estudo e ambas as unidades aquíferas.

Área	Poço	Aquífero	CE	STD	pH	Dureza	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
			μS/cm	mg/L	adim.	mg/L CaCO ₃	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Canto do Amaro	9-VBCA-01-RN	Jandaíra	1252	468	6,97	405,72	94,4	5	37,5	71,5	89,96	7,8	198,25
	9-VBCA-03-RN	Jandaíra	23800	13760	6,33	7632,25	1512	85,6	924	2391	7737,6	875	198,25
	9-VBCA-04-RN	Jandaíra	4090	2252	6,83	1251,35	243	22,3	162	396	674,788	651,1	173,85
	9-VBCA-06-RN	Jandaíra	2600	1276	7,15	639,88	117	18,2	88,5	267	359,88	270,2	265,35
	9-VBCA-07-RN	Jandaíra	4610	2192	6,70	1441,89	420	5,5	84,8	311	1169,64	33,5	155,55
	9-VBCA-02-RN	Barreiras	29200	16931	6,44	5916,53	960	196	863	4488	9537,04	716,3	94,55
	9-VBCA-05-RN	Barreiras	25800	14056	6,52	3860,84	803	79,2	486	4167	7917,55	771,5	143,35
Estreito	9-VBET-01-RN	Jandaíra	1369	734	6,79	638,66	148	6,1	71	47,3	239,927	54,8	231,8
	9-VBET-02-RN	Jandaíra	1078	500	6,87	458,83	99,8	6,8	50,1	38,3	104,954	23,2	240,95
	9-VBET-03-RN	Jandaíra	3710	1805	6,73	1179,14	251	9,5	134	225	809,745	124,8	250,71
	9-VBET-04-RN	Jandaíra	1760	725	6,95	546,96	99,4	11,3	71,7	89,9	179,939	92	265,35
	9-VBET-06-RN	Jandaíra	876	378	7,24	315,89	57,6	4	39,6	39,9	89,967	24,3	167,75
	9-VBET-05-RN	Barreiras	2273	1455	6,98	992,97	298	10,7	53,2	184	719,776	67,9	106,75
Salina Cristal	9-VBSC-01-RN	Jandaíra	4500	1733	6,87	1028,24	226	21,1	134	306	944,709	7,8	186,05
	9-VBSC-02-RN	Jandaíra	14800	6482	6,56	4858,51	846	35,1	604	774	3868,8	92,8	137,25
	9-VBSC-03B-RN	Jandaíra	27100	11676	6,54	10626,49	2139	35,5	1231	523	7557,65	56,5	97,6
	9-VBSC-04B-RN	Jandaíra	9070	3591	6,68	2676,56	658	27,4	334	289	2294,29	15,9	125,05
	9-VBSC-03A-RN	Barreiras	19300	7989	7,44	7024,92	1518	37,9	786,1	500	5038,44	60,4	36,6
9-VBSC-04A-RN	Barreiras	6570	2789	6,89	1655,54	361	38,9	182	453	1574,52	17,9	149,45	

Nota: CE=Condutividade elétrica; STD= Sólidos Totais Dissolvidos; adim=adimensional.

Tabela 5.7 – Resultados analíticos dos poços amostrados no período **úmido**, considerando as três áreas de estudo e ambas as unidades aquíferas.

Área	Poço	Aquífero	CE	STD	pH	Dureza	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
			μS/cm	mg/L	adim.	mg/L CaCO ₃	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Canto do Amaro	9-VBCA-01-RN	Jandaíra	1336	655	7,83	447,16	103	6,39	41,7	60,8	224,9	33	295,65
	9-VBCA-03-RN	Jandaíra	26300	18703	7,6	9663,91	1689	103	1061	2053	11660	543	311,97
	9-VBCA-04-RN	Jandaíra	4000	2307	6,68	1212,55	239	33,1	156	368	778,1	578	276,94
	9-VBCA-06-RN	Jandaíra	2560	1444	7,64	730,17	125	28,6	93,7	242	441,3	264	369,43
	9-VBCA-07-RN	Jandaíra	4560	2471	6,72	1387,99	435	9	85,5	303	1302,5	47,6	253,35
	9-VBCA-09-RN	Jandaíra	962	535	7,34	206,445	40	12,9	24,8	105	151,55	58	226,77
	9-VBCA-10-RN	Jandaíra	5048,5	2285	7,45	1406,53	408	9,025	86,55	291,5	1130,9	44,7	222,91
	9-VBCA-02-RN	Barreiras	28900	17709	7,59	5690,72	870	186	809	4225	10534	734	145,24
9-VBCA-05-RN	Barreiras	24900	15107	6,6	4037,45	800	82,7	481	3957	8817,7	525	246,79	
Estreito	9-VBET-01-RN	Jandaíra	1471	899	6,56	609,71	147	9,1	68,5	45,6	283,5	112	378,43
	9-VBET-02-RN	Jandaíra	1073	618	6,89	477,46	99	6,87	50,9	37,7	110,8	42,2	369,99
	9-VBET-03-RN	Jandaíra	4140	2257	6,62	1183,32	282	9,5	116	357	980,8	181,5	369,5
	9-VBET-04-RN	Jandaíra	1460,5	847	7,58	540,685	103	11,7	75,15	93,85	207,8	123,8	419,99
	9-VBET-06-RN	Jandaíra	881	476	7	338,56	74	6,33	44,3	43,5	114,9	44	265,9
	9-VBET-07-RN	Jandaíra	1280	723	6,91	545,88	117	7,62	59,8	55,5	141,7	99,4	410,5
	9-VBET-08-RN	Jandaíra	3880	2066	6,7	1176,17	251	13	122	296	917	162,75	380,52
	9-VBET-05-RN	Barreiras	2607	1669	6,92	989,63	309	7,84	56,8	188	780,1	124,6	179,69
Salina Cristal	9-VBSC-01-RN	Jandaíra	3780	1975	6,91	1081,28	222	21,2	128	270	1114,3	24,1	260,27
	9-VBSC-02-RN	Jandaíra	12310	6671	6,51	4813,09	843	35,6	565	658	4077,9	166,5	222,91
	9-VBSC-03B-RN	Jandaíra	22400	13105	6,8	10987,34	1863	21,9	1091	446	8725,3	102	140
	9-VBSC-04B-RN	Jandaíra	8319	4218	6,66	3470,21	728	20,6	365	213	2647,9	28,3	183,81
	9-VBSC-05-RN	Jandaíra	3870	2211	7,57	1323,36	245	21,5	164	239	1204,8	40,9	293,67
	9-VBSC-06-RN	Jandaíra	13300	6716	7,22	4709,1	831	29,9	635	652	4216,9	122,5	239,7
	9-VBSC-03A-RN	Barreiras	19200	11060	7,13	8811,46	1918	23,2	1020	583	7377,6	65,5	127,86
9-VBSC-04A-RN	Barreiras	5805	3048	7,45	1670,315	355	36,9	181	446	1765,25	31,65	222,385	

Nota: CE=Condutividade elétrica; STD= Sólidos Totais Dissolvidos; adim=adimensional.

Tabela 5.8 – Resultado analítico da água do mar, coletada na costa da Praia de Areia Branca/RN, em 2010.

CE	STD	pH	Dureza	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
µS/cm	mg/L	adim.	mg/L CaCO ₃	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
51000	35892	7,0	0,55	410,41	437,5	1244,77	11428,75	19290,56	3009,90	142,36

Nota: CE=Condutividade elétrica; STD= Sólidos Totais Dissolvidos; adim=adimensional.

A seguir são tratados os dados individualmente para cada área de trabalho, fazendo referência para ambas as unidades aquíferas.

5.3 – HIDROQUÍMICA DE CANTO DO AMARO

5.3.1. Aquífero Jandaíra

As **Tabelas 5.9** e **5.10** mostram a estatística dos parâmetros analisados nas águas do aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, para os períodos seco e úmido, respectivamente. Para o período seco foram amostrados cinco poços e para o período úmido sete poços, entretanto, na estatística descritiva apresentada nas referidas tabelas foram utilizados apenas os poços cuja amostragem se realizou para os dois períodos (portanto, cinco poços), de forma a permitir que os resultados estatísticos obtidos pudessem ser comparáveis entre si. Essa avaliação objetivou verificar algum efeito sazonal na hidroquímica dos aquíferos.

Tabela 5.9 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Canto do Amaro para o período seco.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica (µS/cm)	7270,40	1252,00	23800,00	4090,00	9333,46	128,38
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	3989,74	468,45	13759,64	2192,33	5510,53	138,12
pH	6,80	6,33	7,15	6,83	0,31	4,55
Dureza (mg/L como CaCO ₃)	2274,22	405,72	7632,25	1251,35	3025,30	133,03
Ca ²⁺ (mg/L)	477,28	94,40	1512,00	243,00	592,71	124,18
K ⁺ (mg/L)	27,32	5,00	85,60	18,20	33,46	122,49
Mg ²⁺ (mg/L)	259,36	37,50	924,00	88,50	374,20	144,28
Na ⁺ (mg/L)	687,30	71,50	2391,00	311,00	959,81	139,65
Cl ⁻ (mg/L)	2006,37	89,96	7737,60	674,79	3228,92	160,93
SO ₄ ⁻ (mg/L)	367,52	7,80	875,00	270,20	383,53	104,36
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	198,25	155,55	265,35	198,25	41,60	20,98

Ressalta-se, que os dois poços amostrados unicamente no período úmido não foram excluídos do presente estudo, apenas não foram utilizados na abordagem do efeito sazonal,

mas utilizados na caracterização hidroquímica e identificação de processos geoquímicos atuantes nessas águas.

Como pode ser visto na **Tabela 5.9**, as águas do aquífero Jandaíra durante o período seco mostram-se bastante mineralizadas, com condutividade elétrica variando de 1252 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 23800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, refletindo a média de 7270,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esses resultados serão posteriormente interpretados, quando da análise da salinidade das águas. Os valores de pH variam de 6,33 a 7,15, correspondentes a águas neutras. A dureza apresenta grande amplitude nos resultados (mínimo de 405,72, máximo de 7632,25 e média de 2274,22 mg/L como CaCO_3), estando todas as amostras enquadradas na classe de águas muito duras, de acordo com a classificação de Custódio & Llamas (2001).

Considerando-se o coeficiente de variação, observa-se uma elevada variabilidade (heterogeneidade) nos resultados analíticos das amostras para os parâmetros analisados, com valores de CV superiores a 100%, exceto pH e HCO_3^- . Isso aponta para a possível ocorrência de mais de um processo governado as concentrações da maioria dos sais nas águas, resultando conseqüentemente em amplas faixas de concentração para as espécies químicas.

Tabela 5.10 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Canto do Amaro para o período úmido.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	7751,20	1336,00	26300,00	4.000,00	10445,29	134,76
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	5116,12	655,32	18702,58	2307,11	7629,86	149,13
pH	7,29	6,68	7,83	7,60	0,55	7,53
Dureza (mg/L como CaCO_3)	2688,36	447,16	9663,91	1212,55	3917,42	145,72
Ca^{2+} (mg/L)	518,20	103,00	1689,00	239,00	667,58	128,83
K^+ (mg/L)	36,02	6,39	103,00	28,60	39,24	108,94
Mg^{2+} (mg/L)	287,58	41,70	1061,00	93,70	434,27	151,01
Na^+ (mg/L)	605,36	60,80	2053,00	303,00	817,31	135,01
Cl^- (mg/L)	2881,36	224,90	11660,00	778,10	4924,22	170,90
SO_4^- (mg/L)	293,12	33,00	578,00	264,00	260,95	89,03
HCO_3^- (mg/L)	301,47	253,35	369,43	295,65	43,82	14,53

Para o período úmido (**Tabela 5.10**), a elevada mineralização das águas do aquífero Jandaíra é verificada pelos resultados de condutividade elétrica das águas, que variam de 1336 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 26300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ refletindo a média de 7751,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O aumento na concentração de sais, do período seco para o úmido pode refletir a dissolução dos calcários que ocorre nos eventos de recarga. Essa variável será analisada com detalhe no item acerca da salinidade das águas do aquífero Jandaíra nessa área.

A dureza das águas do aquífero Jandaíra no período úmido permanece elevada, com valor médio de 2688,36 mg/L, sendo todas as amostras enquadradas na classe de águas

muito duras. Observa-se um significativo aumento na concentração média desse parâmetro quando comparado aos resultados analíticos obtidos no período seco (2274,22 mg/L como CaCO_3). A dureza das águas do Jandaíra é decorrente de processos naturais de dissolução dos calcários, principalmente calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), que ocorre de forma mais efetiva durante os períodos de recarga. Isso explica de forma genérica os maiores teores obtidos no período úmido. Os valores de pH variam de 6,68 a 7,83, correspondentes a águas neutras a levemente alcalinas, com resultados levemente superiores aos obtidos no período seco.

Considerando-se o coeficiente de variação, observa-se na **Tabela 5.10** uma elevada variabilidade (heterogeneidade) nos resultados analíticos das amostras para os parâmetros analisados, com valores de CV superiores a 100%, exceto pH, SO_4^- e HCO_3^- . Isso já havia sido observado para o período seco, e na sequência do estudo será dada maior ênfase na abordagem dos processos e mecanismos que podem refletir nessa ampla faixa de concentração para as espécies químicas.

5.3.1.1 - Salinidade do aquífero Jandaíra em Canto do Amaro

Na presente avaliação, a salinidade das águas é considerada através do parâmetro condutividade elétrica, que é proporcional à quantidade de íons disponíveis na água e reflete o seu conteúdo mineral.

Como pode ser visto na **Tabela 5.9**, as águas do aquífero Jandaíra em Canto do Amaro durante o período seco mostram-se bastante mineralizadas, com condutividade elétrica variando de 1252 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBCA-01-RN) a 23800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 7270,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para o período úmido (**Tabela 5.10**), a elevada mineralização das águas do aquífero Jandaíra também é verificada, com a condutividade elétrica variando de 1336 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBCA-01-RN) a 26300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBCA-03-RN) refletindo uma média de 7751,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para analisar a distribuição espacial desses poços na área de Canto do Amaro, a **Figura 5.11** apresenta os mapas de zoneamento da condutividade elétrica para os períodos seco e úmido. Em linhas gerais, ambos os mapas apresentam a mesma configuração espacial da condutividade elétrica das águas, onde se observa um significativo crescimento desse parâmetro de sudeste para noroeste.

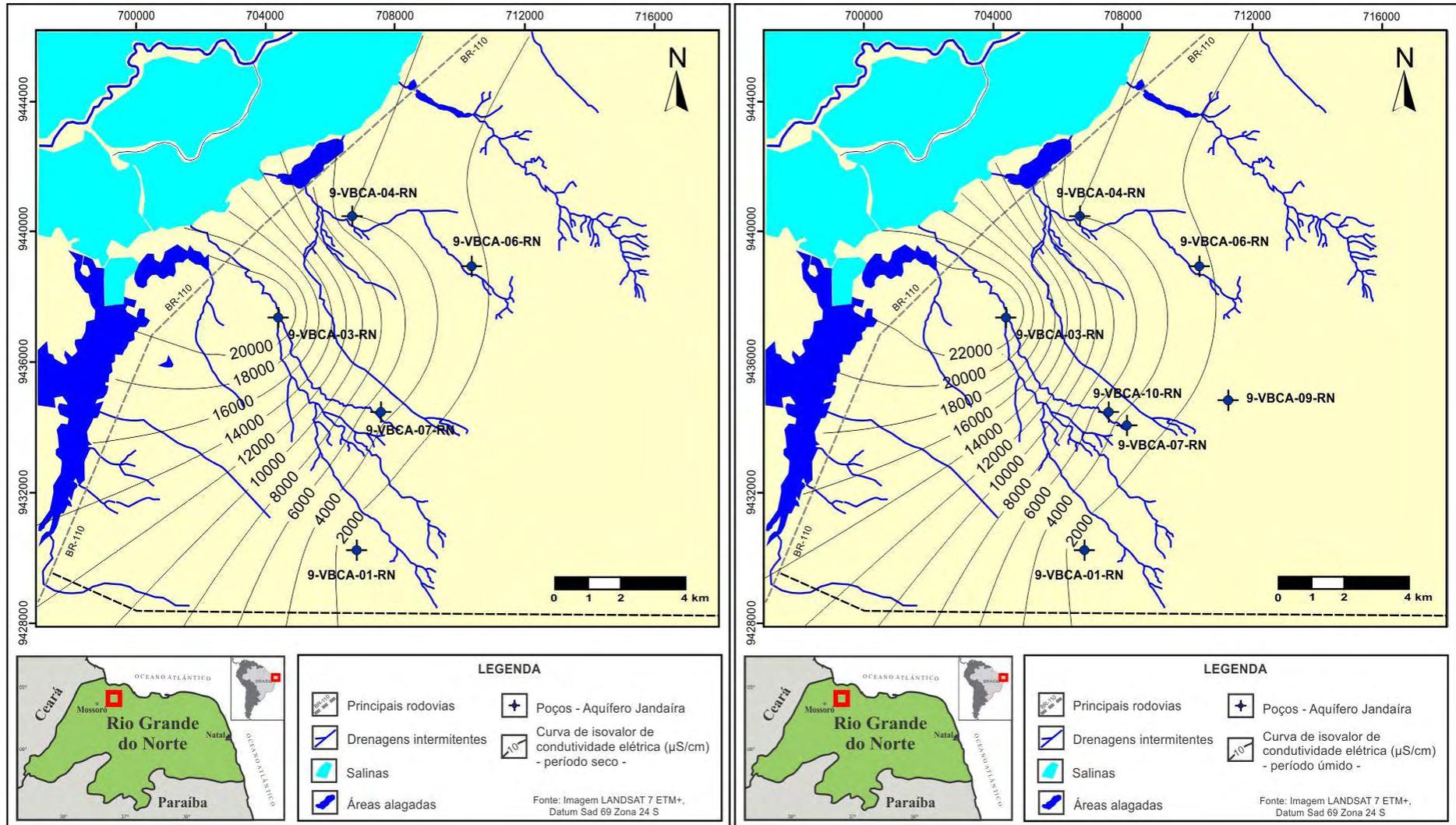


Figura 5.11 - Zoneamento da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) ($n=5$); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) ($n=7$).

Um aprofundamento acerca dos mecanismos que interferem na salinidade dessas águas será realizado mais adiante, quando da análise dos demais parâmetros químicos. Entretanto, de forma preliminar tem-se a considerar alguns aspectos climáticos e geofisiográficos da área de Canto do Amaro, que apresentam relação direta com a salinidade dessas águas.

No que diz respeito ao clima, esse setor do Estado é caracterizado pela reduzida precipitação pluviométrica e elevada evapotranspiração. Nesse cenário, ocorre a precipitação de sais por evaporação, concentrada na camada superficial da zona não saturada, notadamente ao longo das drenagens intermitentes da faixa noroeste da área, durante o período seco. Essa ocorrência foi verificada nas áreas de Canto do Amaro e Salina Cristal (discutida posteriormente). A deposição desses sais nessas áreas é maximizada pela presença das salinas localizadas no setor noroeste, em ambas as áreas de estudo. No intuito de averiguar a composição desses sais, foram coletadas amostras para análise em difratômetro de raios-X e o resultado indicou que a amostra é constituída predominantemente por halita com alguns traços de gipsita e silvita (**Figura 5.12**).

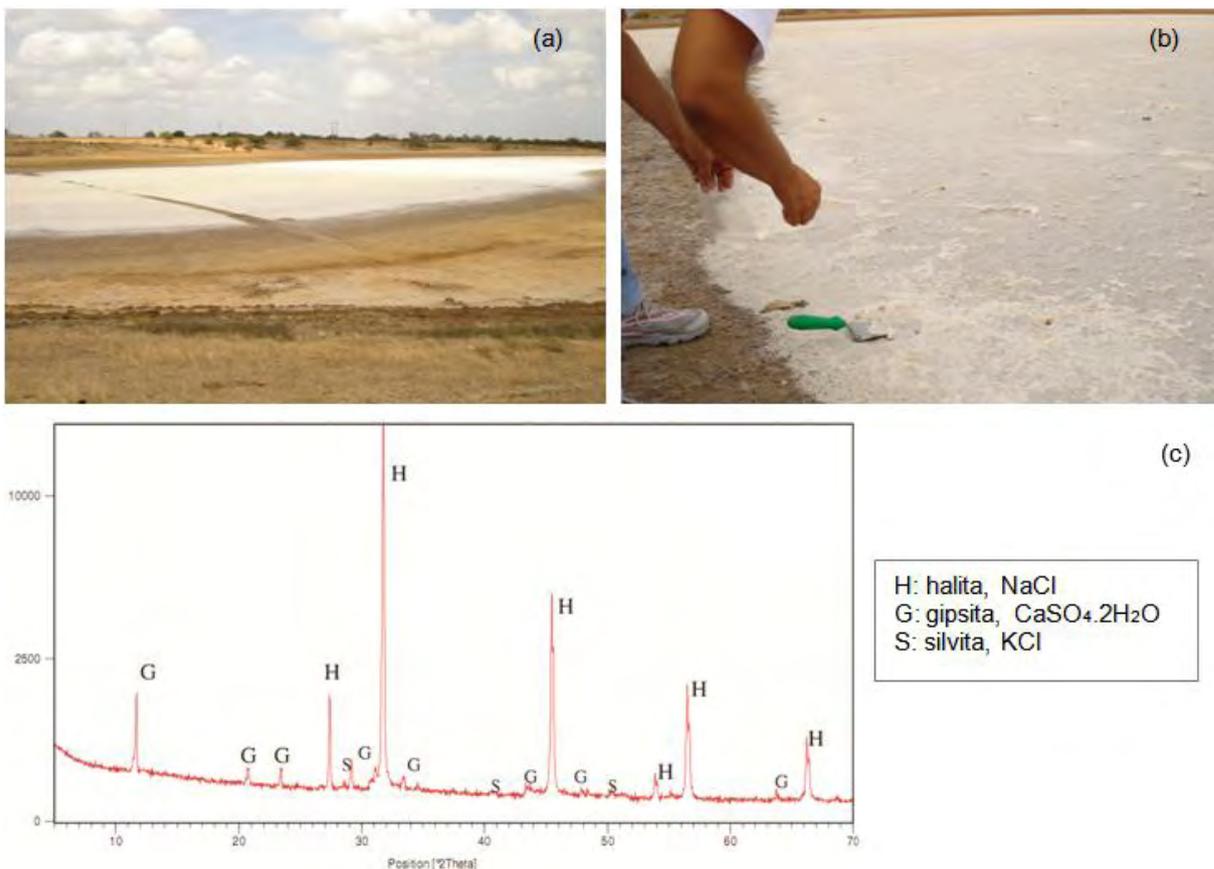


Figura 5.12 – Sais acumulados na superfície do terreno, ao longo de uma drenagem intermitente na área de Canto do Amaro (a); coleta desses sais (b) e gráfico da difração de raios-X da amostra (c).

A concentração desses sais na superfície do terreno ocorre tanto nos setores providos da cobertura siliciclástica (Formação Barreiras) quanto nas áreas de afloramento dos calcários da Formação Jandaíra. Durante os eventos de recarga, as águas das chuvas ao entrarem em contato com a zona não saturada são enriquecidas nos elementos químicos provenientes dos sais, que migram em direção a zona saturada.

A permeabilidade das coberturas siliciclásticas facilita a percolação em subsuperfície. Nos setores onde esse pacote sedimentar constitui numa unidade de transferência de águas para o aquífero Jandaíra, a recarga ocorre juntamente com a lixiviação da zona não saturada em direção a zona saturada, quando são adicionados aos produtos da dissolução dos minerais no aquífero.

Nas condições de afloramento do calcário Jandaíra, a percolação ocorre diretamente através dos fraturamentos na superfície do terreno durante os eventos de recarga, com acumulação nas cavidades cársticas do calcário.

A proximidade geográfica da área de Canto do Amaro em relação a linha de costa também pode ser a origem da salinização das águas subterrâneas nesse setor. Para investigar essa possibilidade foi elaborado gráficos de evolução da condutividade elétrica em relação à distância dos poços com a linha de costa (localizada à norte da área de estudo) e com o vale fluvial do Apodi (localizado à oeste da área de estudo) (**Figura 5.13**).

Observa-se que a condutividade elétrica aumenta significativamente nas proximidades do vale fluvial do baixo curso do Apodi. Estudos realizados por Manoel Filho (1971), já apontavam a influência das marés, que ao penetrarem vários quilômetros pelos vales dos principais rios interferem na salinidade das águas subterrâneas da Bacia Potiguar. O mesmo levantamento aponta que, a extensão do efeito das marés sobre as águas subterrâneas freáticas no vale do Apodi ocorre até as proximidades da cidade de Mossoró. A intrusão salina se daria através do processo de difusão molecular ou difusão iônica, que avança lateralmente a partir do vale do Apodi, constituindo uma *língua salgada* condicionada pelas descargas fluviais de água doce que fluem para o oceano (SEMARH, 2010).

A **Figura 5.14** ilustra a localização dos poços utilizados na presente avaliação, em relação à linha de costa e ao vale fluvial do Apodi.

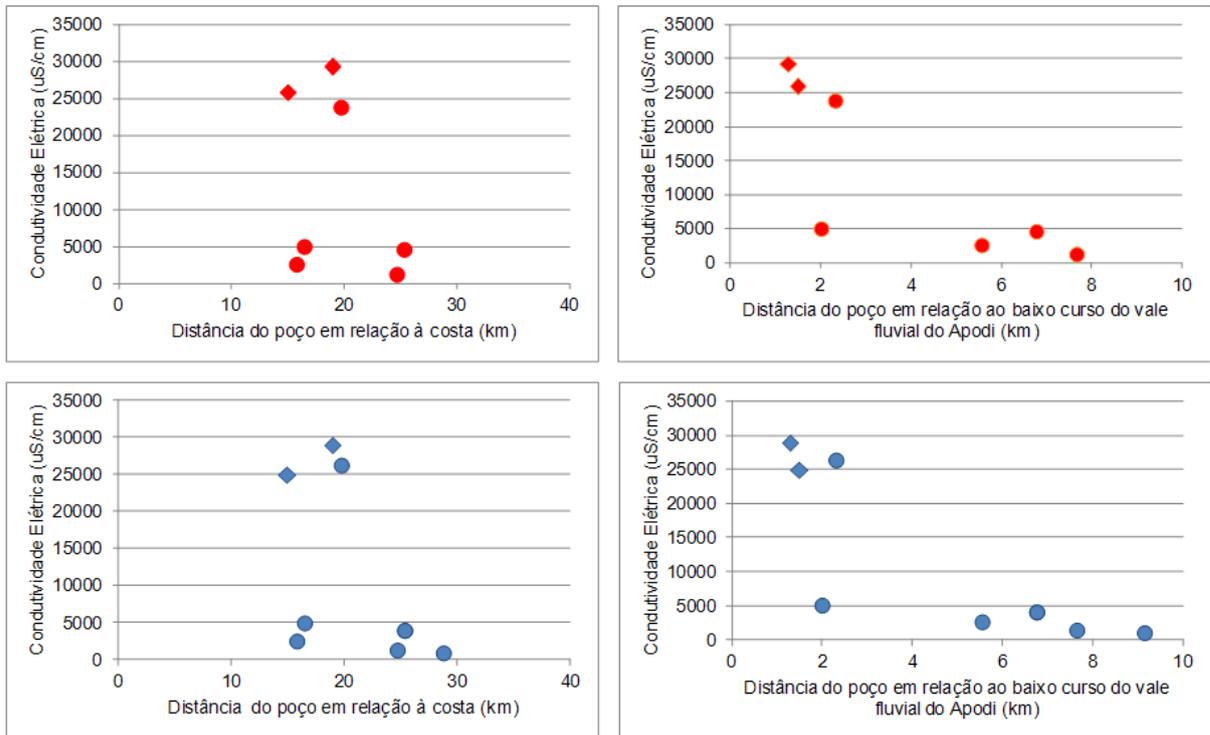


Figura 5.13 – Evolução da condutividade elétrica em relação à distância da linha de costa (gráficos à esquerda) e ao vale do rio Apodi (à direita). As séries em vermelho representam a amostragem do período seco, e as séries em azul a amostragem do período úmido. Os círculos correspondem aos poços do aquífero Jandaíra e os losangos os poços do aquífero Barreiras.



Figura 5.14 – Distribuição espacial dos poços na área de Canto do Amaro, em relação a linha de costa (à norte) e vale fluvial do Apodi (à oeste). Base: Imagem Google Earth, julho 2012.

Na área de estudo, portanto, não fica descartada a ocorrência de intrusão marinha natural, notadamente ao longo dos vales fluviais. A presença das salinas (área de produção de sal marinho através da evaporação da água do mar) no baixo curso do Rio Apodi-Mossoró potencializa esses fatores na medida em que influencia ainda mais no aumento da salinidade das águas de superfície. Considerando que o avanço da cunha salina se dá preferencialmente através do vale do Apodi, e nessa região encontram-se os tanques de evaporação das salinas, fica impossibilitada a diferenciação do que é a influência do avanço da interface água doce/água salgada em direção ao continente e o que é a contaminação da água subterrânea a partir da instalação das salinas. Muito provavelmente ambos os fatores podem estar agindo mutuamente, aumentando a salinidade das águas de subsuperfície.

O condicionamento climático da área (baixa precipitação anual e concentrada em poucos meses do ano) compromete o processo de recarga e armazenamento regular de águas no aquífero Jandaíra, caracterizando uma frente de fluxo de água subterrânea com energia incapaz de evitar o avanço da cunha salina para o continente, notadamente nos setores topograficamente mais baixos.

A presença das salinas contribui para um incremento de sais na água das chuvas, através da evaporação de suas águas nos tanques onde são armazenadas. O efeito dos ventos que incide na lâmina da água provoca a formação de *sprays* (aerossóis) que migram para as proximidades e nos eventos de chuvas – que constituem a recarga das águas subterrâneas – influenciam nos processos de salinização das águas subterrâneas.

Diante do exposto, e da análise da distribuição espacial dos poços (**Figura 5.14**) juntamente com os resultados obtidos para a condutividade elétrica em cada poço (**Figura 5.15**) para ambos os períodos amostrais, tem-se a considerar:

- A salinidade excessiva dos poços 9-VBCA-03-RN, 9-VBCA-04-RN, 9-VBCA-07-RN e 9-VBCA-10-RN, com condutividade elétrica superior a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, deve ocorrer em parte pela concentração de sais a partir da zona não saturada e em parte pela intrusão salina. Isso porque os poços estão próximos dos locais onde ocorre a deposição de sais no terreno e onde a influência da maré age com maior intensidade, dada a presença das drenagens superficiais.
- Chama atenção a alteração brusca na salinidade do poço 9-VBCA-03-RN (condutividade elétrica média de 25050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ considerando ambas as etapas amostrais). Nesse caso, pode estar havendo também alguma contribuição antrópica, ligada ao aporte de águas das salinas nas drenagens superficiais nesse setor.
- Os poços 9-VBCA-01-RN, 9-VBCA-06-RN e 9-VBCA-09-RN (com condutividade elétrica inferior a 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ considerando ambas as etapas amostrais) estão localizados mais distantes desses fatores potencializadores, de modo que nesses

casos os processos referidos não exercem tanta influência nos constituintes químicos dissolvidos na água subterrânea. A salinidade dessas águas deve estar mais relacionada ao processo de interação água-rocha, onde o intemperismo químico das rochas carbonáticas que compõem a unidade aquífera é o principal fator que contribui para controlar a química dessas águas subterrâneas.

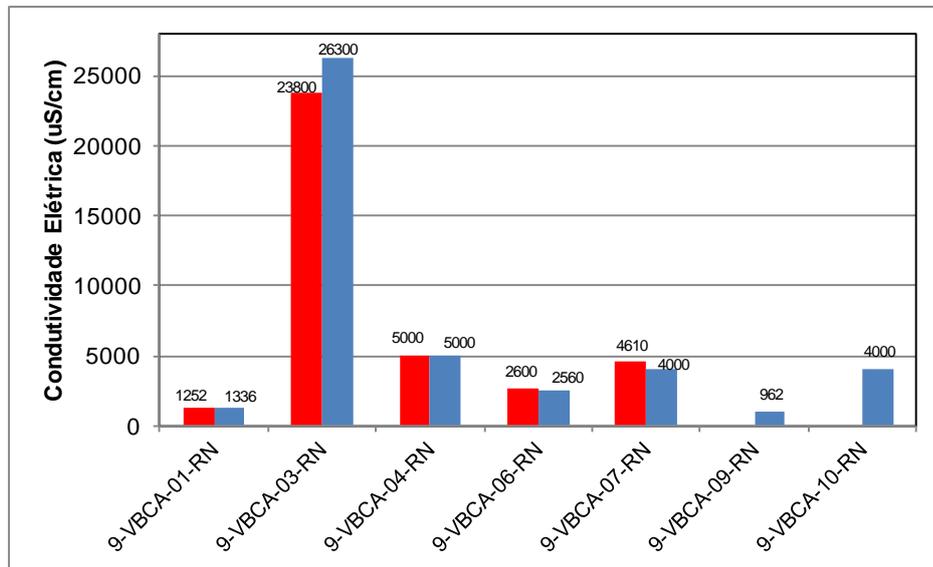


Figura 5.15 – Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.3.1.2 – Distribuição dos cátions no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro

➤ Cálcio

As concentrações de Ca^{2+} no período seco (**Tabela 5.9**) variam de 94,40 mg/L (9-VBCA-01-RN) a 1512,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), com média de 477,28 mg/L e mediana de 243,00 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 103 mg/L (9-VBCA-01-RN) até 1689 mg/L (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 518,20 mg/L e mediana de 239,00 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**.

Para a maioria dos poços houve um pequeno aumento na concentração de Ca^{2+} no período úmido (**Figura 5.16**), corroborando com a **Figura 5.17** que ilustra a distribuição do Ca^{2+} no período seco e úmido. O acréscimo no período úmido ocorre devido à dissolução das rochas carbonáticas, principalmente a calcita, durante os eventos de recarga. A recarga do período chuvoso faz com que as águas de infiltração encontrem carbonatos no seu trajeto até a zona saturada; elas podem evoluir parcialmente por caminhos em condições de sistema aberto (contato com a atmosfera) e em seguida, abaixo da superfície freática, evoluir para a saturação em condições de sistema fechado (Freeze & Cherry, 1979).

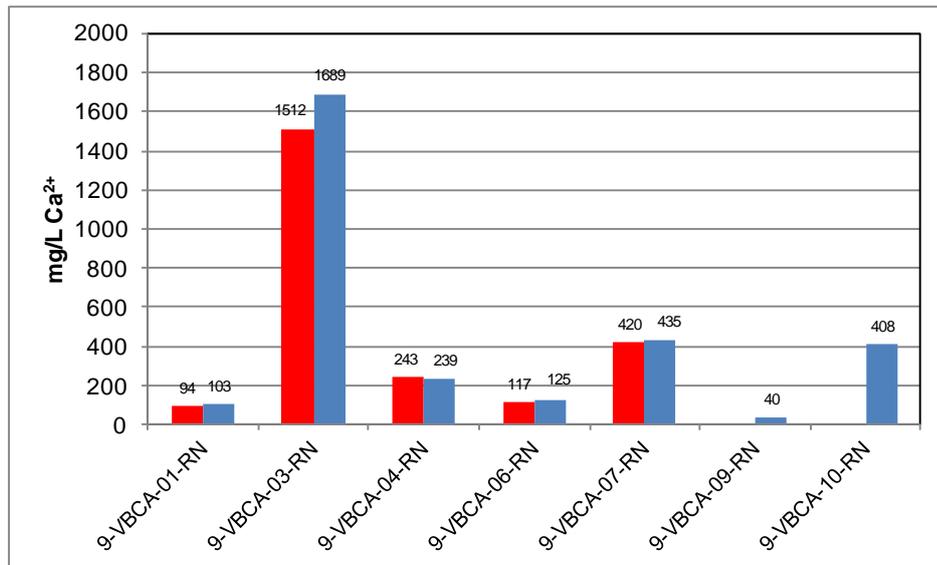


Figura 5.16 – Teor de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

Da análise individual das amostras (**Figura 5.16**) (considerando ambos os períodos amostrais) verifica-se que os poços 9-VBCA-03-RN, 9-VBCA-04-RN, 9-VBCA-07-RN e 9-VBCA-10-RN destacam-se dos demais por apresentarem teores de Ca^{2+} superiores a 239 mg/L. Nesse caso, é provável a existência de outro aporte de Ca^{2+} , além da dissolução dos minerais carbonatados do aquífero. Esses poços podem estar refletindo a concentração de sais existentes na superfície do terreno (no caso, a gipsita). Os referidos sais que atingem a zona saturada durante os eventos de recarga, contribuem para os maiores teores verificados no período úmido.

Nos demais poços (9-VBCA-01-RN, 9-VBCA-06-RN e 9-VBCA-09-RN), que apresentam resultados inferiores a 125 mg/L Ca^{2+} , a concentração do elemento deve estar mais ligada a processos naturais de interação água rocha.

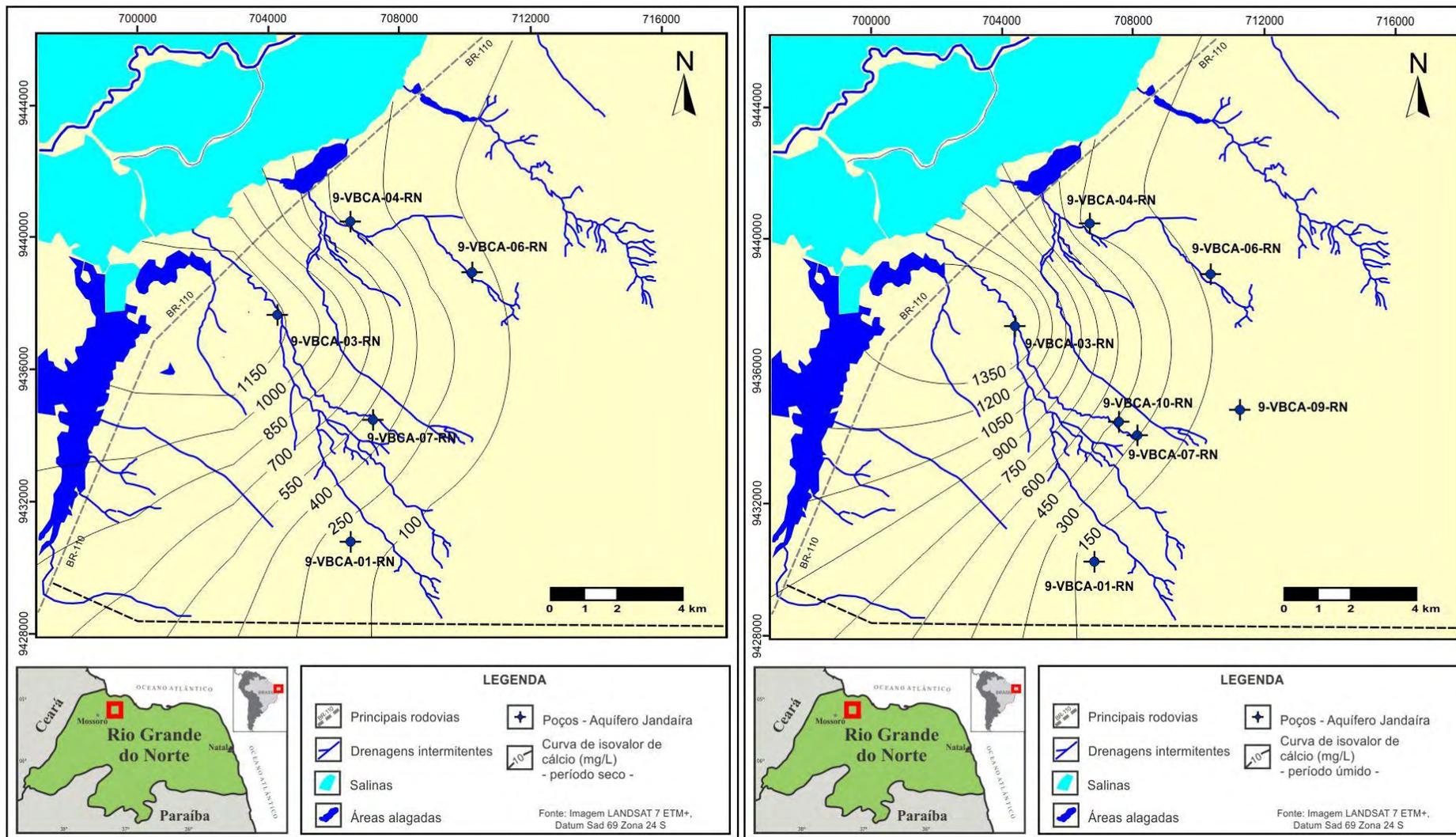


Figura 5.17 - Zoneamento do Ca^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Magnésio

Na amostragem representativa do período seco a concentração de Mg^{2+} variou de 37,50 mg/L (9-VBCA-01-RN) a 924,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), com média de 259,36 mg/L e mediana de 88,50 mg/L (**Tabela 5.9**). Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 41,70 mg/L (9-VBCA-01-RN) até 1061,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 287,58 mg/L e mediana de 93,70 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**. Os resultados estatísticos e a análise individual das amostras (**Figura 5.18**) evidenciam que o teor de Mg^{2+} nos poços foi superior no período úmido, de forma similar ao ocorrido com o Ca^{2+} .

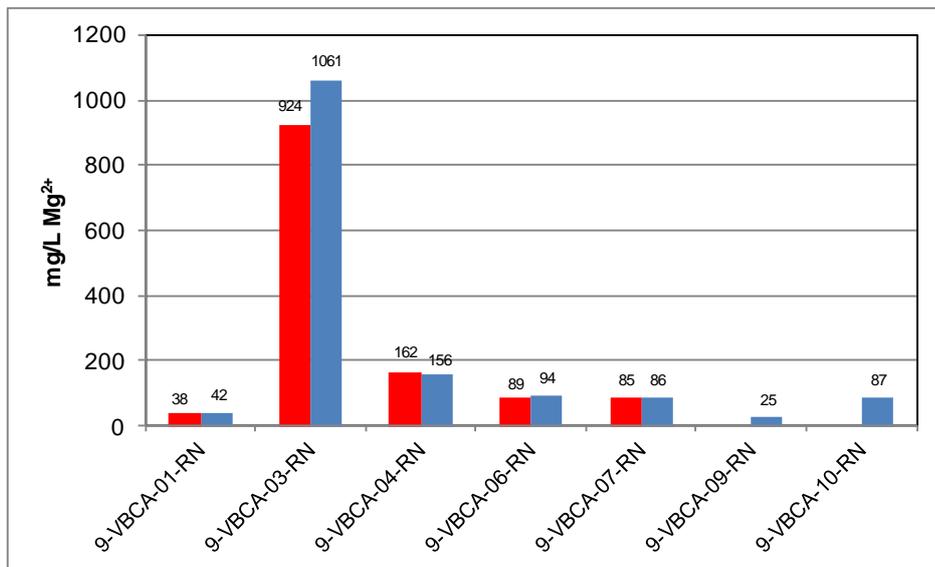
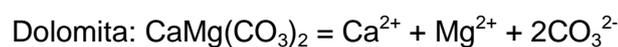
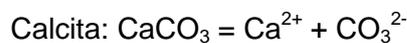


Figura 5.18 – Teor de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A concentração de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra está ligada a dissolução e precipitação do elemento no meio aquífero. Nos períodos de recarga (chuvas), a dissolução do Mg^{2+} no aquífero acarreta na sua maior concentração na água, que ocorre juntamente com o aumento da concentração de Ca^{2+} , indicando a dissolução congruente de dolomita e calcita, através das seguintes reações de dissociação:



A intrusão marinha também acarreta no aumento da concentração desse parâmetro. A análise da distribuição do Mg^{2+} na área de Canto do Amaro para o período seco e úmido apresentada na **Figura 5.19** evidencia um aumento desse parâmetro de sudeste para noroeste. É provável que a maioria dos poços receba alguma influência marinha e isso explica o teor elevado verificado nas amostras, fato que, no entanto não ocorre nos poços 9-VBCA-01-RN e 9-VBCA-09-RN, cuja concentração desse elemento foi inferior a 42 mg/L.

Mais uma vez, destaca-se o poço 9-VBCA-03-RN pelo teor extremamente elevado de Mg^{2+} (entre 924 e 1061 mg/L), o que denota alguma contribuição antrópica, ligada ao aporte de águas das salinas nas drenagens superficiais nesse setor.

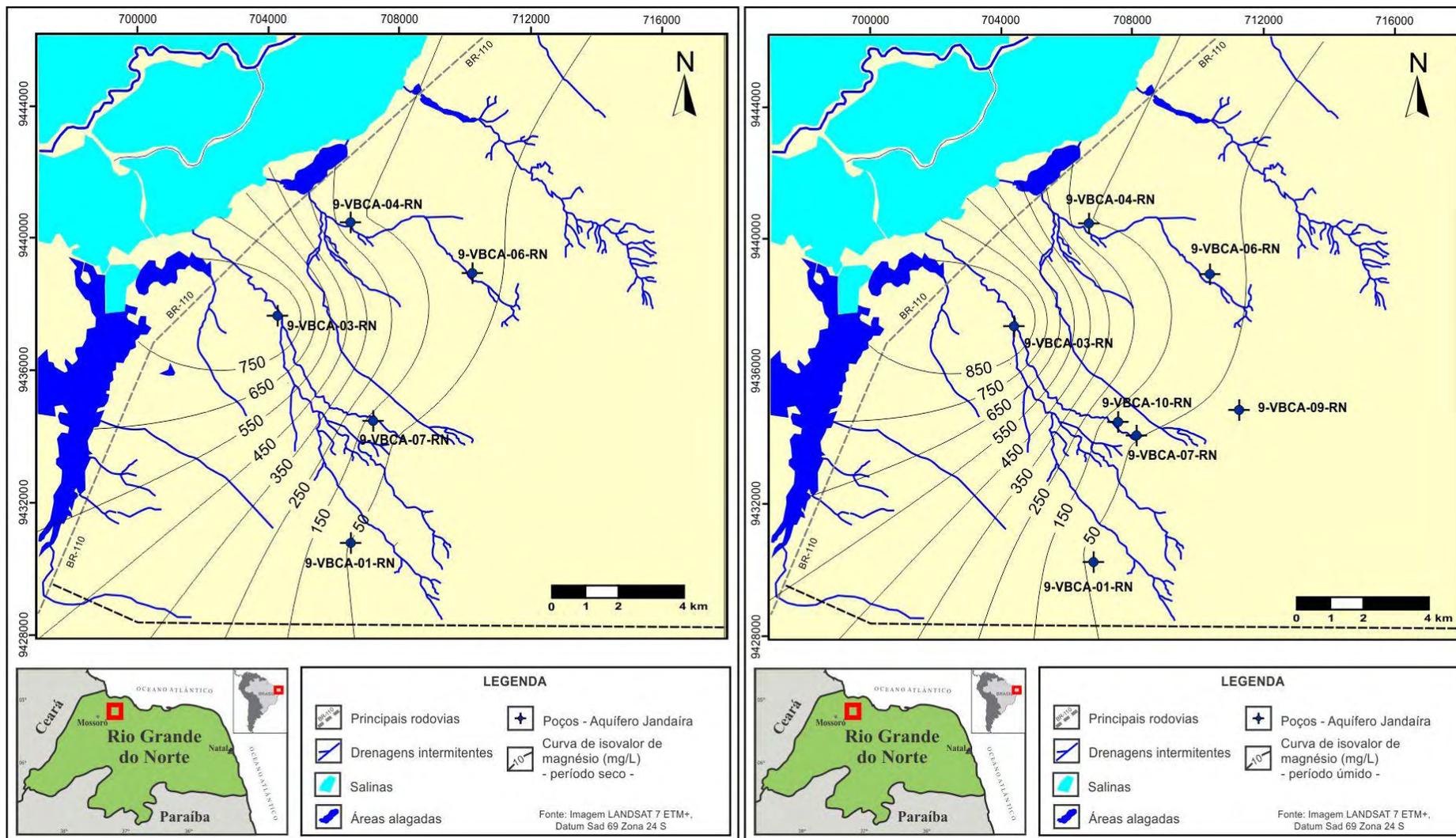


Figura 5.19 - Zoneamento do Mg^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Sódio

As concentrações de Na^+ no período seco (**Tabela 5.9**) variam de 71,50 mg/L (9-VBCA-01-RN) a 2391,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), com média de 687,30 mg/L e mediana de 311,00 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 60,80 mg/L (9-VBCA-01-RN) até 2053,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 605,36 mg/L e mediana de 303,00 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**. Para todas as amostras analisadas, o teor de Na^+ (**Figura 5.20**) se manteve superior no período seco.

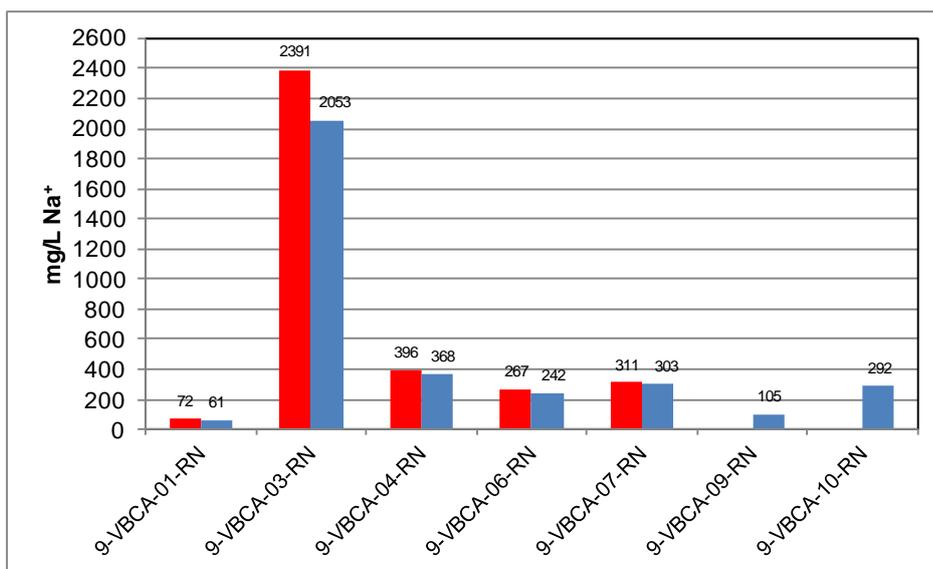


Figura 5.20 – Teor de Na^+ no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.21** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido. Em ambos os mapas, a concentração de Na^+ cresce de sudeste para noroeste, variando de 200 a mais de 2000 mg/L no período seco e de 100 a mais de 1700 mg/L no período úmido.

Parte da concentração de Na^+ nesses poços advém dos sais precipitados na zona não saturada, notadamente a halita. Conforme falado anteriormente, o aerossol marinho propicia depósitos de sais de cloreto de sódio nos longos períodos de estiagem. Após as primeiras chuvas todos estes sais depositados, tantos nos solos como nas coberturas vegetais, são transportados em solução para os aquíferos.

Nos poços sob influência da cunha salina é provável que a maior concentração de Na^+ verificada no período seco ocorra devido a redução da frente de escoamento do aquífero Jandaíra em direção ao mar, e conseqüente avanço das águas marinhas em subsuperfície em direção ao continente.

Tem-se a considerar, também, os processos de troca iônica entre o Na^+ e o Ca^{2+} e Mg^{2+} . Conforme abordado anteriormente, as maiores concentrações para os dois últimos cátions citados ocorrem no período úmido sob a influência dos processos de dissolução dos

calcários em épocas de recarga mais acentuadas. O inverso ocorre com o Na^+ que tem seus teores reduzidos no período de estiagem. A relação inversa entre o Na^+ e o Ca^{2+} e Mg^{2+} , para um mesmo período amostral, pode apontar para a ocorrência do fenômeno de troca iônica entre estas espécies.

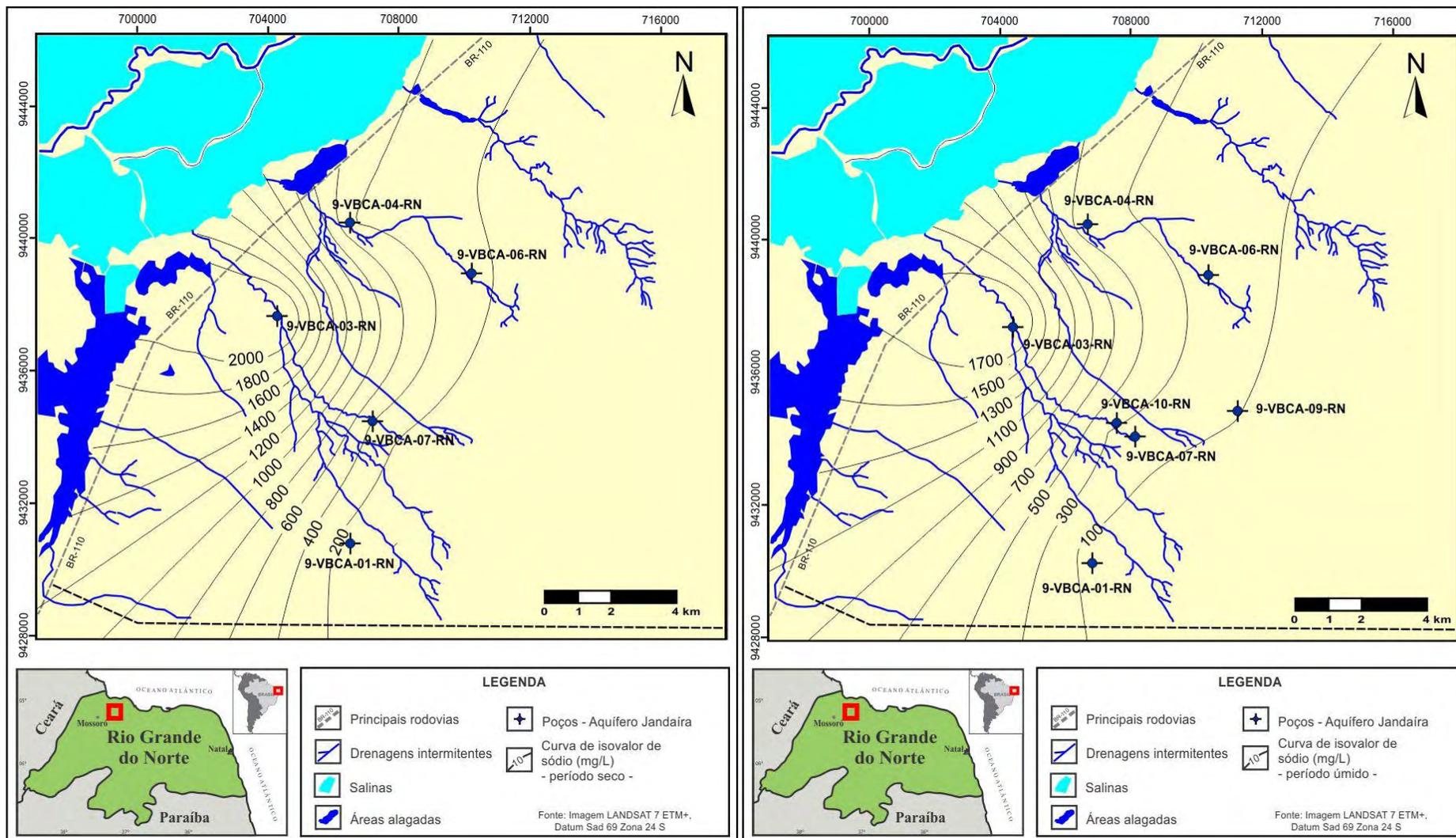


Figura 5.21 - Zoneamento do Na^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Potássio

As concentrações de K^+ no período seco (**Tabela 5.9**) variam de 5,00 mg/L (9-VBCA-01-RN) a 85,60 mg/L (9-VBCA-03-RN), com média de 27,32 mg/L e mediana de 18,20 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 6,39 mg/L (9-VBCA-01-RN) até 103,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 36,02 mg/L e mediana de 28,60 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**. O teor de K^+ para todas as amostras é superior no período úmido, quando comparado ao período seco.

Na **Figura 5.22** pode-se verificar os resultados analíticos das amostras individualmente e na **Figura 5.23** a distribuição espacial de K^+ no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro.

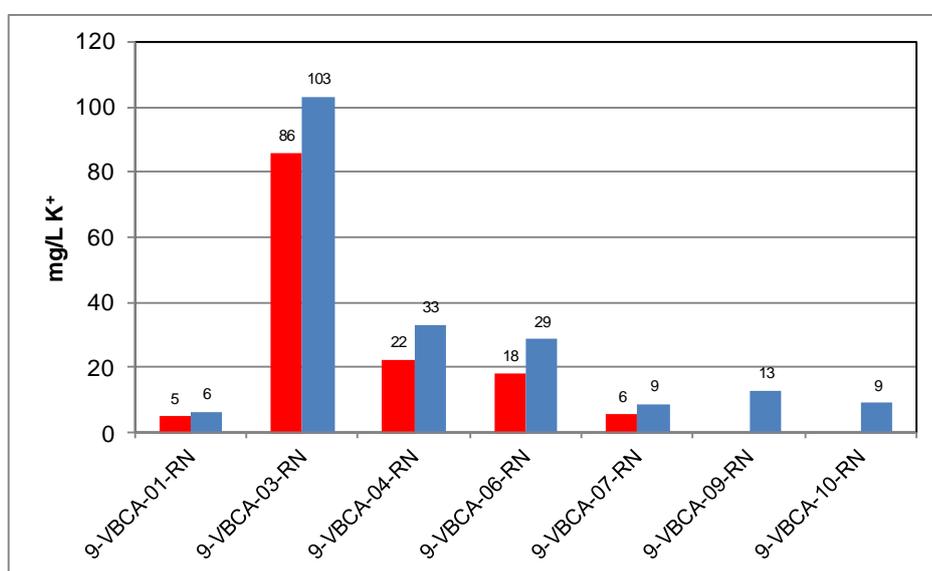


Figura 5.22 – Teor de K^+ no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

Para ambos os períodos amostrais a concentração desse parâmetro aumenta de sudeste para noroeste. A origem do K^+ nessas águas deve ser a silvita encontrada em precipitados na zona não saturada, que atingem a zona saturada nos eventos de precipitação pluviométrica. Isso explica as maiores concentrações verificadas no período úmido. Obviamente, sob o efeito da intrusão marinha as águas subterrâneas também tendem a aumentar a concentração de K^+ , conforme se verifica nos poços 9-VBCA-03-RN, 9-VBCA-04-RN e 9-VBCA-06-RN, que apresentam resultados analíticos elevados para esse parâmetro.

Outra fonte potencial de K^+ nas águas subterrâneas poderia estar relacionada com fatores de origem antrópica, como a contaminação agrícola, atividade na qual o K^+ é utilizado na composição química dos fertilizantes. Entretanto, vale ressaltar que na área de

estudo não são verificadas atividades de uso e ocupação do solo relacionada à práticas agrícolas.

Destacam-se os poços VBCA-01-RN, VBCA-07-RN, VBCA-09-RN e VBCA-10-RN, com teor de K^+ inferior a 13 mg/L em todos os casos, cujos valores estão relacionados a processos naturais do aquífero.

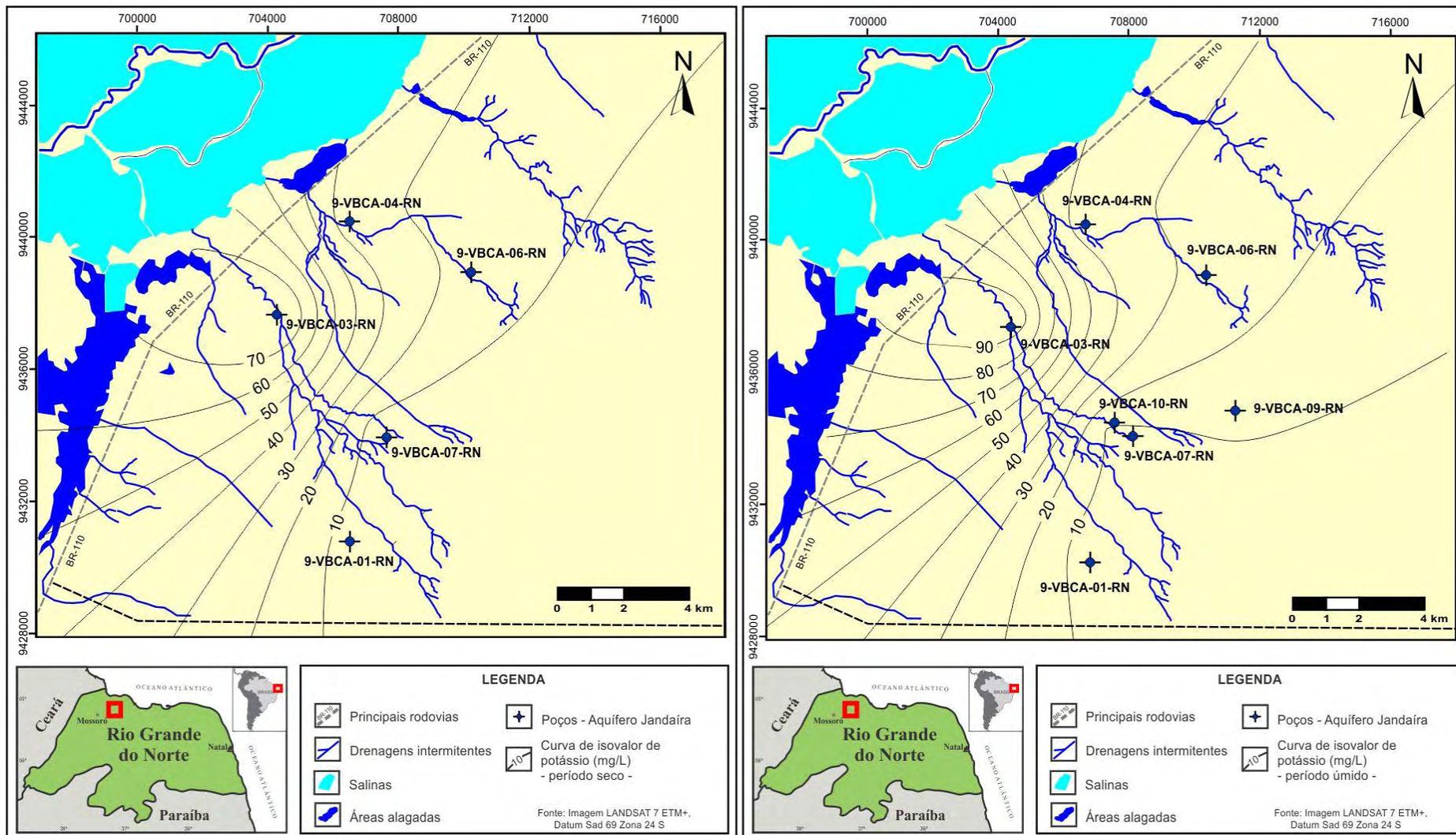


Figura 5.23- Zoneamento do K⁺ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

5.3.1.3 – Distribuição dos ânions no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro

➤ Cloreto

Na amostragem representativa do período seco a concentração de Cl^- variou de 89,96 mg/L (9-VBCA-01-RN) a 7737,60 mg/L (9-VBCA-03-RN), com média de 2006,37 mg/L e mediana de 674,79 mg/L (**Tabela 5.9**). Para o período úmido, esse parâmetro apresentou variação de 224,90 mg/L (9-VBCA-01-RN) até 11660 mg/L (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 2881,36 mg/L e mediana de 778,10 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**. A partir da verificação das médias estatísticas e dos dados individuais apresentados na **Figura 5.24**, conclui-se que houve um significativo aumento na concentração de Cl^- no período úmido.

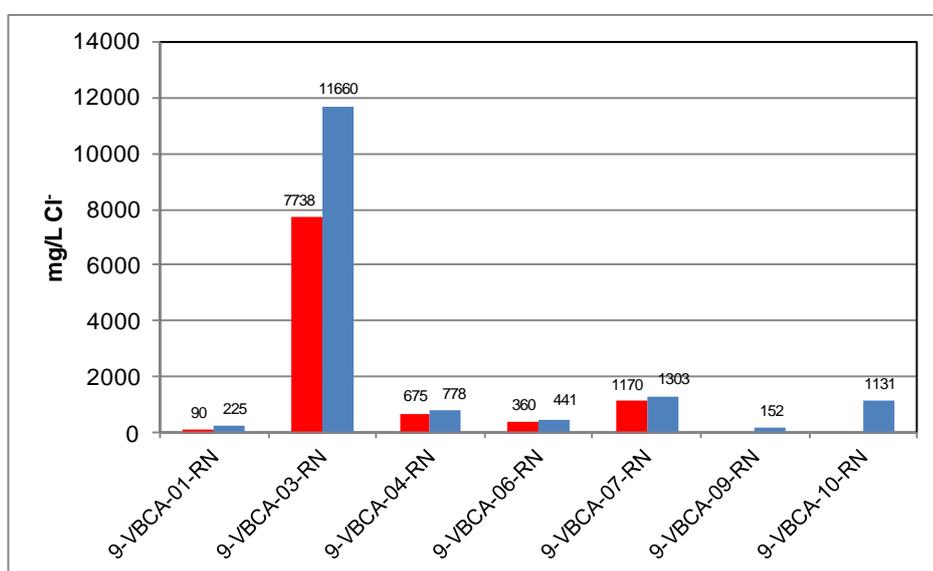


Figura 5.24 – Teor de Cl^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.25** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido. Em ambos os mapas verifica-se que a concentração de Cl^- cresce de sudeste para noroeste. No período seco, a faixa leste apresenta concentrações inferiores a 500 mg/L que passam para mais de 5500 mg/L no setor noroeste da área. No período úmido, ocorre um aumento na concentração de Cl^- , que assume valores inferiores a 500 mg/L na faixa leste até mais de 8500 mg/L no setor noroeste da área.

O Cl^- presente nas águas subterrâneas estaria controlado pela sua concentração na água de chuva e pela influência do aerossol marinho, característico dessa zona costeira. Ainda, a alta solubilidade desse parâmetro e a infiltração das águas no período de recarga através da lixiviação dos sais (halita e silvita) no domínio semiárido, potencializam a sua concentração no período chuvoso. O Cl^- é um íon conservativo, não sendo degradado ou mesmo adsorvido por reações químicas e a sua concentração na água subterrânea é o

resultado da infiltração da água de chuva em períodos mais intensos, devido aos fenômenos de evapotranspiração (Hem, 1985).

Normalmente, o teor de Cl^- resulta numa concentração gradativa ao longo do fluxo das águas subterrâneas, isto devido a sua alta solubilidade e o longo tempo de permanência nos aquíferos. Essa premissa não é evidenciada na área de Canto do Amaro, corroborando com a evidência do avanço das águas salinas para o interior do continente.

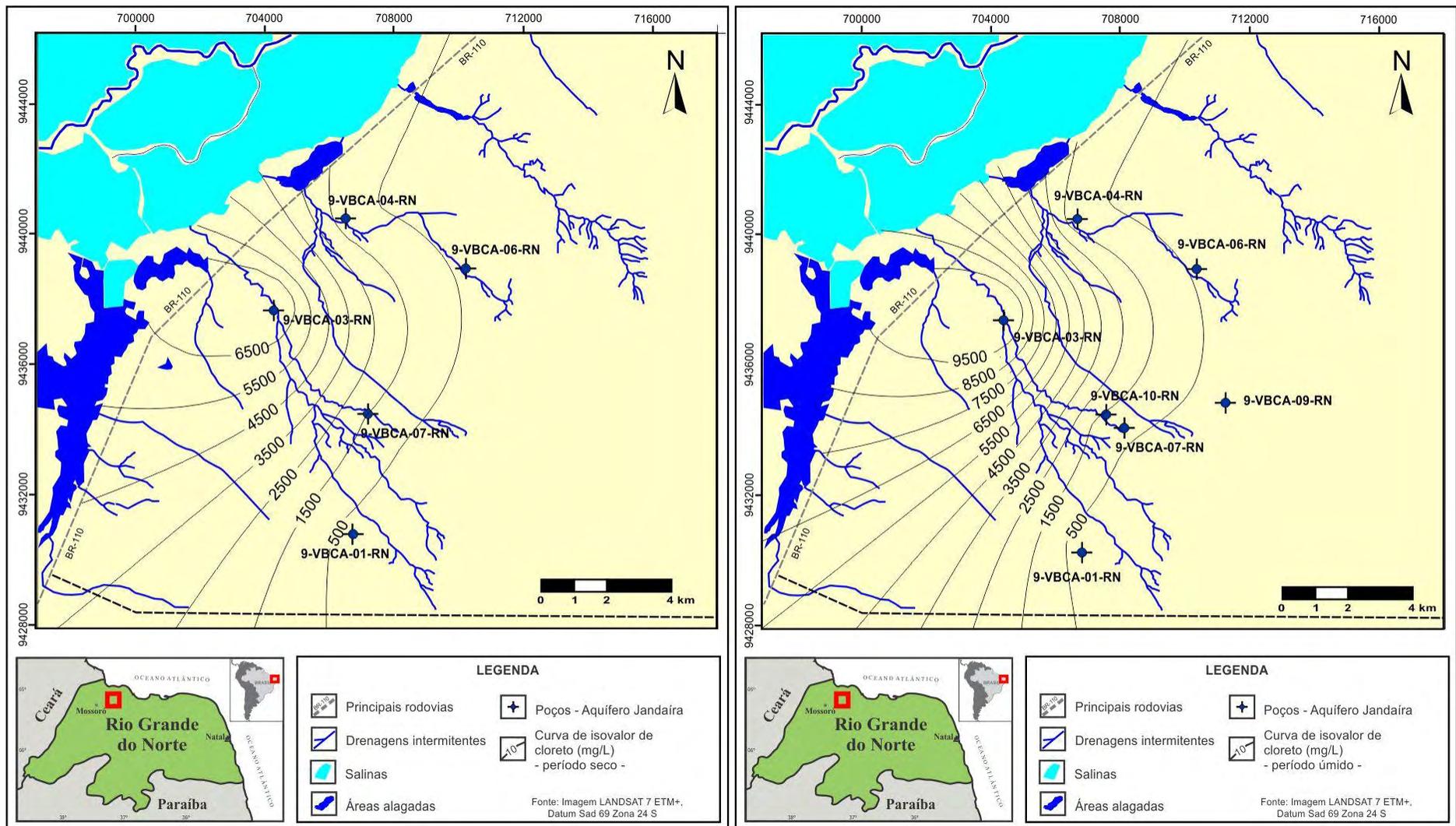


Figura 5.25 - Zoneamento do Cl⁻ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Bicarbonato

As concentrações de HCO_3^- no período seco (**Tabela 5.9**) variam de 155,55 mg/L (9-VBCA-07-RN) a 265,35 mg/L (9-VBCA-06-RN), refletindo uma média e mediana de 198,25 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 253,35 mg/L (9-VBCA-07-RN) até 369,43 mg/L (9-VBCA-06-RN), com média de 301,47 mg/L e mediana de 295,65 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**.

A concentração de HCO_3^- no aquífero Jandaíra é significativamente maior no período úmido (**Figura 5.26**). A interpretação dos dados de Ca^{2+} e Mg^{2+} também evidenciou esse comportamento, isto é, aumento nos teores desses três parâmetros no período úmido. Isso evidencia que a dissolução dos carbonatos, que ocorre nos eventos de recarga, aumenta a concentração desses elementos nas águas subterrâneas. Nesse caso, o HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro é predominantemente resultante de dissolução em sistema-fechado, no qual o carbono inorgânico dissolvido provém do CO_2 quando se inicia a dissolução da calcita e/ou dolomita. Não fica descartado o fato de parte do HCO_3^- nessas águas subterrâneas terem origem no CO_2 atmosférico e na decomposição da matéria orgânica presente na zona insaturada que atinge o meio saturado notadamente no período das chuvas. A **Figura 5.27** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido.

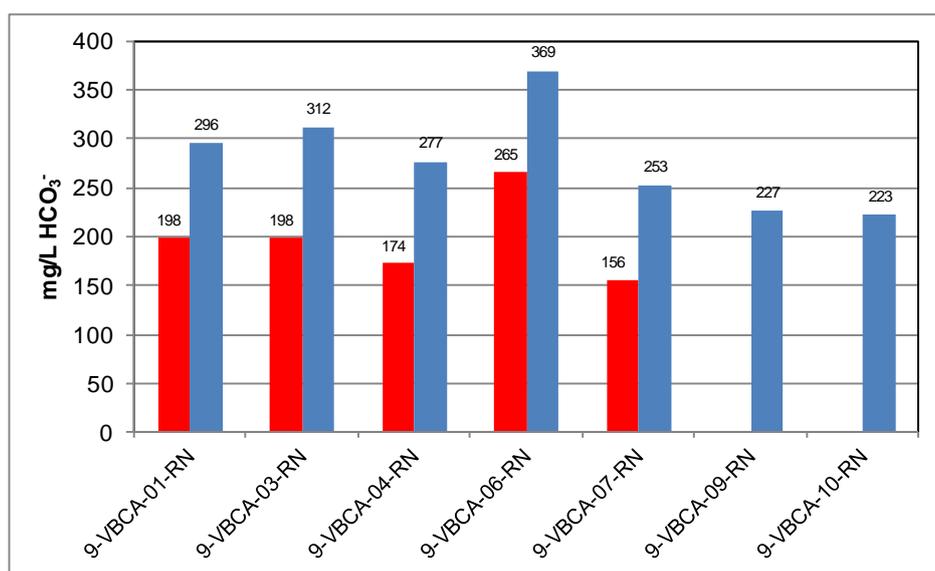


Figura 5.26 – Teor de HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

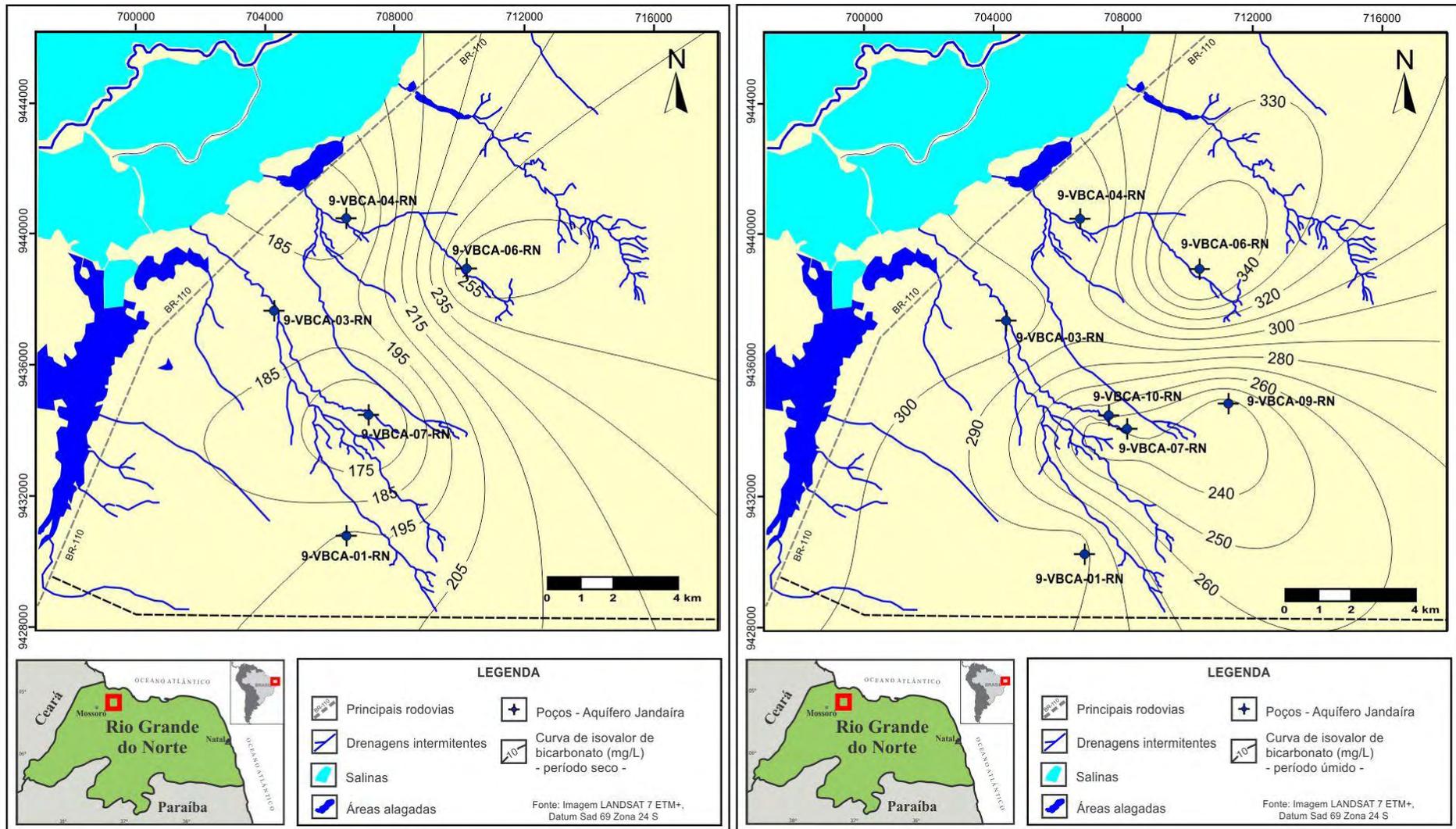


Figura 5.27 - Zoneamento do HCO_3^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) ($n=5$); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) ($n=7$).

➤ Sulfato

Na amostragem representativa do período seco a concentração de SO_4^- variou de 7,80 mg/L (9-VBCA-01-RN) a 875,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), com média de 367,52 mg/L e mediana de 270,20 mg/L (**Tabela 5.9**). Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 33,00 mg/L (9-VBCA-01-RN) até 578,00 mg/L (9-VBCA-03-RN), refletindo a média de 293,12 mg/L e mediana de 264,00 mg/L apresentada na **Tabela 5.10**.

A **Figura 5.28** apresenta os resultados analíticos obtidos para cada poço e na **Figura 5.29** a distribuição de SO_4^- no período seco e úmido. Em ambos os períodos amostrais a concentração desse parâmetro aumenta de sudeste para noroeste. A presença do SO_4^- no aquífero Jandaíra pode estar relacionada à lentes marinhas que ocorrem na ormação homônima. Ainda, a precipitação da gipsita na zona não saturada e os efeitos da intrusão marinha devem ser os principais responsáveis pelos teores elevados de SO_4^- verificados no setor noroeste da área, mais especificamente nos poços 9-VBCA-03-RN, 9-VBCA-04-RN e 9-VBCA-06-RN (que apresentam resultados superiores a 264 mg/L de SO_4^-).

Os poços VBCA-01-RN, VBCA-07-RN, VBCA-09-RN e VBCA-10-RN não são influenciados pelos fatores descritos acima. E nesse caso, o teor de SO_4^- (inferior a 58 mg/L nesses quatro poços) é ocasionado por processos naturais no aquífero.

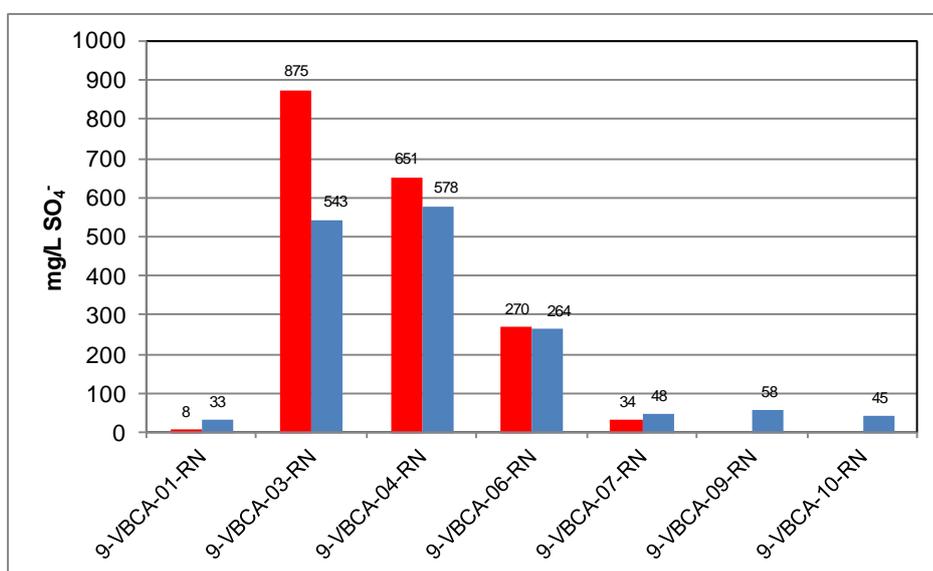


Figura 5.28 – Teor de SO_4^- no aquífero Jandaíra em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

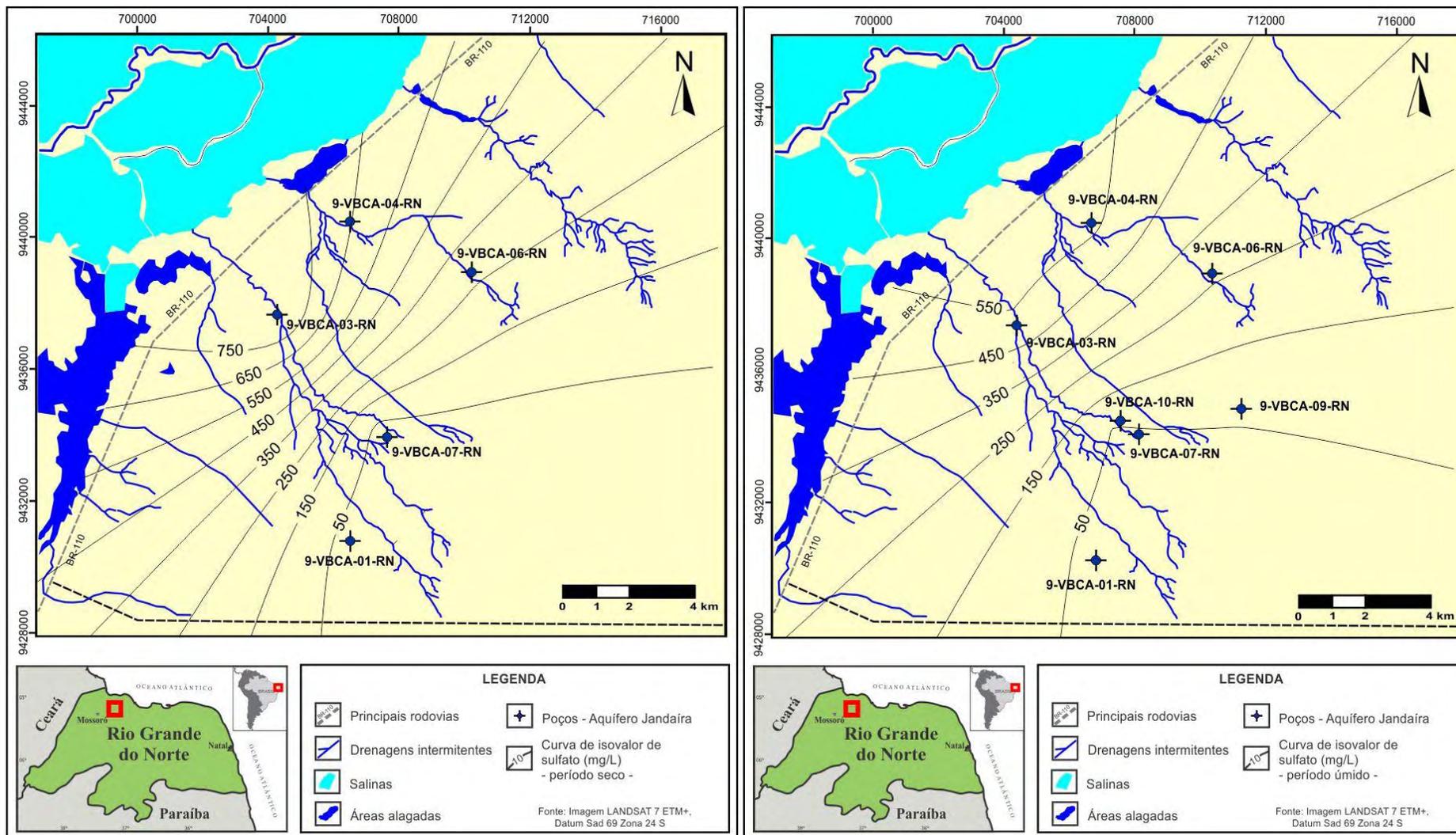


Figura 5.29 - Zoneamento do SO_4 (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Canto do Amaro. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

5.3.2. Aquífero Barreiras

Devido a descontinuidade lateral dessa unidade aquífera, discutida no Capítulo 4 (Hidrogeologia), apenas dois poços foram perfurados na área de Canto do Amaro captando o aquífero Barreiras, os quais: 9-VBCA-02-RN e 9-VBCA-05-RN (**Figura 5.4**).

A estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos avaliados no aquífero Barreiras na área de Canto do Amaro, representativa dos períodos seco e úmido, está apresentada nas **Tabelas 5.11 e 5.12**, respectivamente.

Tabela 5.11 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Canto do Amaro para o período seco.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	27500,00	25800,00	29200,00	27500,00	2404,16	8,74
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	15493,71	14056,48	16930,95	15493,71	2032,56	13,12
pH	6,48	6,44	6,52	6,48	0,06	0,87
Dureza (mg/L como CaCO_3)	4888,69	3860,84	5916,53	4888,69	1453,59	29,73
Ca^{2+} (mg/L)	881,50	803,00	960,00	881,50	111,02	12,59
K^+ (mg/L)	137,60	79,20	196,00	137,60	82,59	60,02
Mg^{2+} (mg/L)	674,50	486,00	863,00	674,50	266,58	39,52
Na^+ (mg/L)	4327,50	4167,00	4488,00	4327,50	226,98	5,25
Cl^- (mg/L)	8727,30	7917,55	9537,04	8727,30	1145,15	13,12
SO_4^- (mg/L)	743,90	716,30	771,50	743,90	39,03	5,25
HCO_3^- (mg/L)	118,95	94,55	143,35	118,95	34,51	29,01

Tabela 5.12 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Canto do Amaro para o período úmido.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	26900,00	24900,00	28900,00	26900,00	2828,43	10,51
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	16407,84	15107,02	17708,66	16407,84	1839,64	11,21
pH	7,10	6,60	7,59	7,10	0,70	9,87
Dureza (mg/L como CaCO_3)	4864,09	4037,45	5690,72	4864,09	1169,04	24,03
Ca^{2+} (mg/L)	835,00	800,00	870,00	835,00	49,50	5,93
K^+ (mg/L)	134,35	82,70	186,00	134,35	73,04	54,37
Mg^{2+} (mg/L)	645,00	481,00	809,00	645,00	231,93	35,96
Na^+ (mg/L)	4091,00	3957,00	4225,00	4091,00	189,50	4,63
Cl^- (mg/L)	9675,85	8817,70	10534,00	9675,85	1213,61	12,54
SO_4^- (mg/L)	629,50	525,00	734,00	629,50	147,79	23,48
HCO_3^- (mg/L)	196,02	145,24	246,79	196,02	71,81	36,63

Para o período seco, como pode ser visto na **Tabela 5.11**, as águas do aquífero Barreiras mostram-se bastante mineralizadas, com condutividade elétrica média de 27500 $\mu\text{S/cm}$. Os valores de pH obtidos variaram entre 6,44 a 6,52 e correspondem a águas com

tendência a serem neutras. A dureza média de 4888,69 mg/L, enquadra todas as amostras na classe de águas muito duras.

Para o período úmido (**Tabela 5.12**) a elevada mineralização dessas águas é verificada pelos resultados de condutividade elétrica, que refletem uma média de 26900 $\mu\text{S/cm}$. A dureza das águas amostradas no período úmido permanece semelhante ao período seco. A média de 4864,09 mg/L enquadra todas as amostras na classe de águas muito duras. Os valores de pH entre 6,60 e 7,59 correspondem a águas neutras a alcalinas.

5.3.2.1 - Salinidade do aquífero Barreiras em Canto do Amaro

Os poços executados no aquífero Barreiras localizam-se no setor noroeste da área, onde a influência marinha, abordada anteriormente, deve atuar com maior significância. Ainda, a precipitação de sais na superfície do terreno é verificada nesse setor e esses dois fatores corroboram para o valor de condutividade elétrica elevados observados nessas águas. No período seco as águas apresentaram em média 27500 $\mu\text{S/cm}$ e no período úmido 26900 $\mu\text{S/cm}$. A **Figura 5.30** apresenta os resultados analíticos desse parâmetro obtido para ambos os períodos amostrais.

Observa-se que a salinidade dessas águas é semelhante à obtida para o poço 9-VBCA-03-RN (**Figura 5.15**), que capta águas do aquífero Jandaíra. Isso pode indicar, além da mistura de águas, mesmos processos hidrogeoquímicos agindo em ambas as unidades aquíferas.

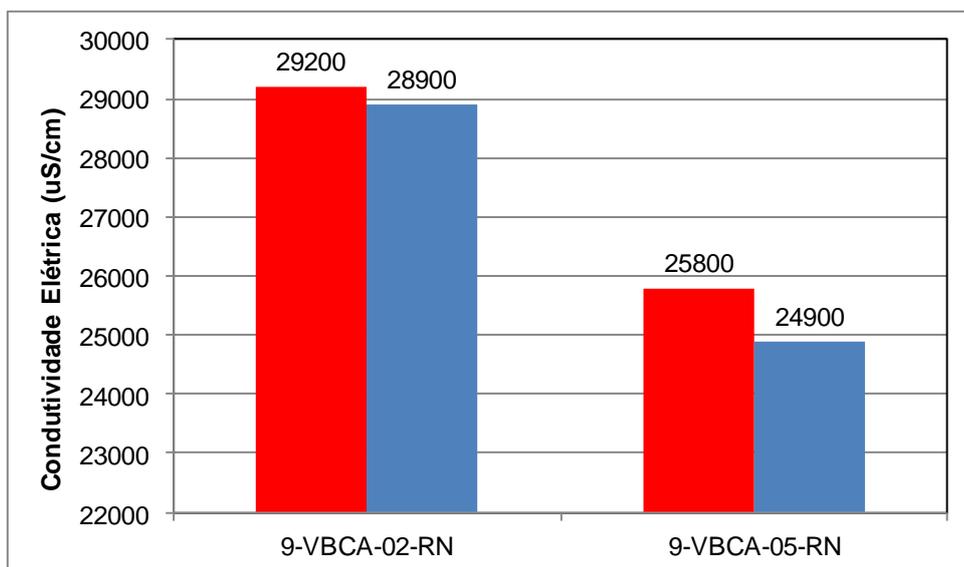


Figura 5.30 – Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) do aquífero Barreiras em Canto do Amaro, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.3.2.2 - Cátions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro

O teor de Ca^{2+} no aquífero Barreiras é apresentado na **Figura 5.31**. Os resultados médios obtidos para esse parâmetro no período seco foi de 881,50 mg/L e no período úmido 835,00 mg/L. A concentração Mg^{2+} no aquífero Barreiras reflete uma média de 674,50 mg/L no período seco e 645,00 mg/L no período úmido. Os resultados analíticos de Na^+ apontam para uma média de 4327,5 mg/L no período seco e 4091 mg/L no período úmido. O K^+ no aquífero Barreiras no período seco apresentou média de 137,60 mg/L e no úmido de 134,35 mg/L.

O conteúdo catiônico dessas águas reflete para a contribuição dos sais precipitados na zona não saturada, além da água marinha no aquífero, dada a maior proximidade desses poços com a linha de costa. De maneira geral, a concentração dos cátions se apresentou superior no período de estiagem.

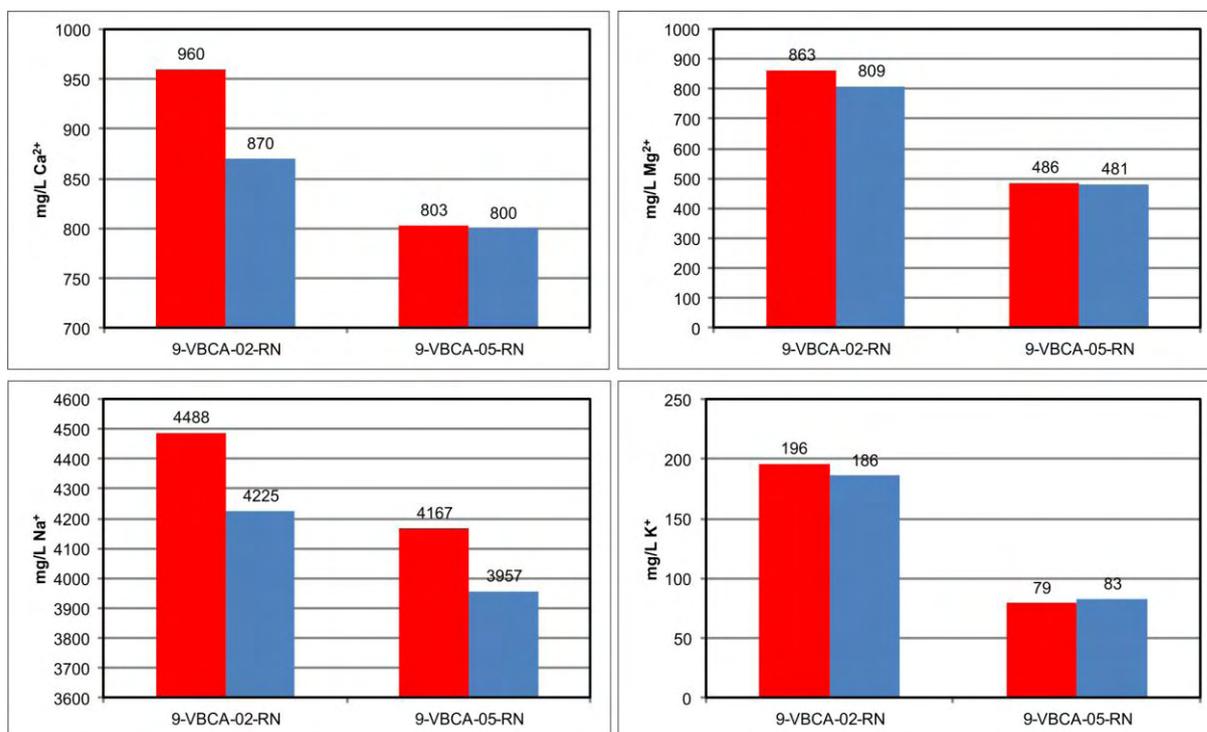


Figura 5.31 – Teor dos cátions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.3.2.3 - Ânions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro

A distribuição dos ânions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro pode ser visualizada na **Figura 5.32**. Na amostragem representativa do período seco a concentração média de Cl^- foi de 8727,30 mg/L e no período úmido foi 9675,85 mg/L. A concentração média de HCO_3^- no período seco é de 118,95 mg/L e no período úmido é de 196,02 mg/L.

Na amostragem representativa do período seco a concentração média de SO_4^- foi de 743,90 mg/L e no período úmido foi de 629,50 mg/L.

Conforme evidenciado para os cátions, o conteúdo aniônico dessas águas é atribuído à lixiviação dos sais em direção a zona saturada, além da contribuição da água marinha. Observa-se, de maneira geral, um aumento da concentração média dos ânions no período úmido, de forma contrária ao ocorrido para os cátions (quando, no geral, os maiores teores são verificados no período seco). Nesse caso, tem-se a considerar que as diferenças podem ser reais, mas pouco significativas, já que se conta com um número reduzido de amostras consideradas na análise.

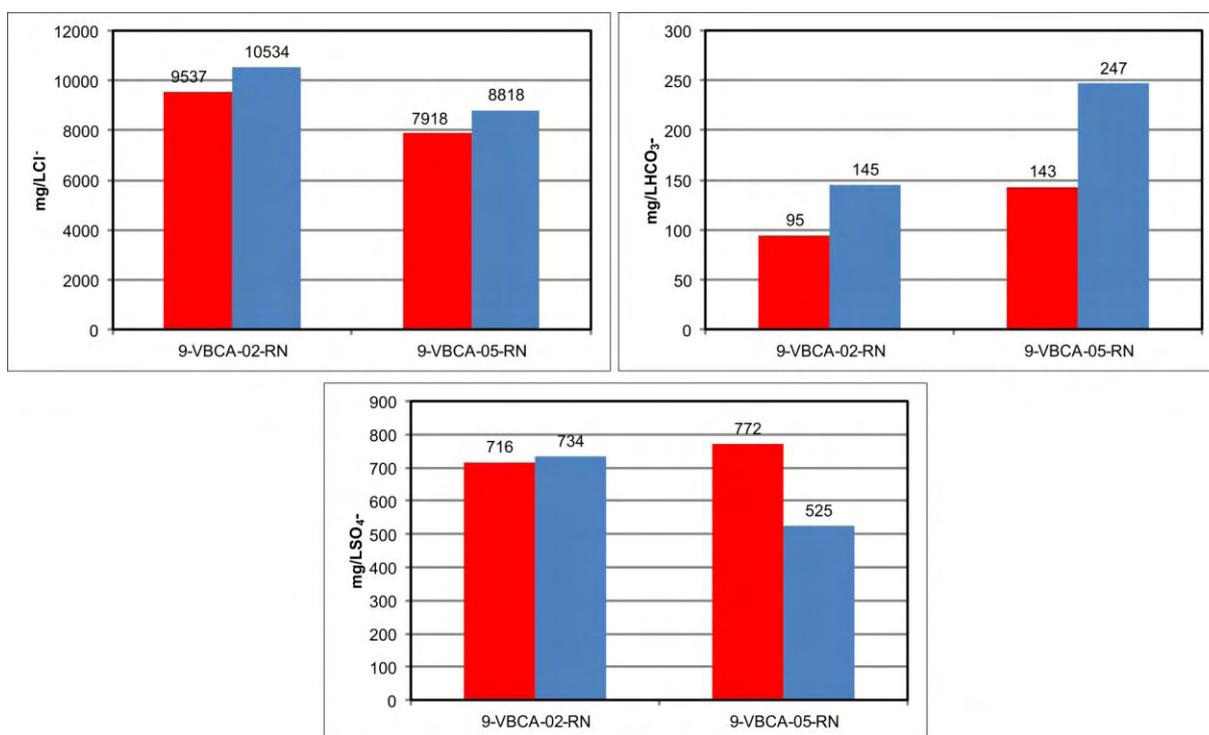


Figura 5.32 – Teor dos ânions no aquífero Barreiras em Canto do Amaro, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.3.3 - Fácies hidroquímicas em Canto do Amaro

Na **Figura 5.33** pode ser visualizada a hidroquímica dos aquíferos Jandaíra e Barreiras na área de Canto do Amaro através dos diagramas de Piper e Stiff. A hidroquímica da água do mar também é representada nos referidos diagramas

Os gráficos foram realizados para verificar a abundância relativa dos elementos principais e avaliar diferenças e similaridades entre amostras e os processos hidrogeoquímicos. Na elaboração da figura foram considerados os resultados analíticos da coleta representativa do período úmido, já que para essa etapa amostral se dispõe de um número maior de poços amostrados.

Os diagramas de Stiff do aquífero Barreiras (poços 9-VBCA-02-RN e 9-VBCA-05-RN) evidenciam águas com concentração predominante de íons Na^+ e Cl^- . A condutividade elétrica dessas águas varia entre 28900 e 24900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, isto é, se apresentam extremamente mineralizadas.

Para o aquífero Jandaíra os diagramas de Stiff mostram águas com menor concentração iônica, a única exceção é o poço VBCA-03-RN. Esse poço apresenta condutividade elétrica de 26300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e enriquecimento em Cl^- e Na^+ , semelhante às águas do aquífero Barreiras, evidenciando que localmente pode estar havendo mistura de águas entre ambas as unidades aquíferas.

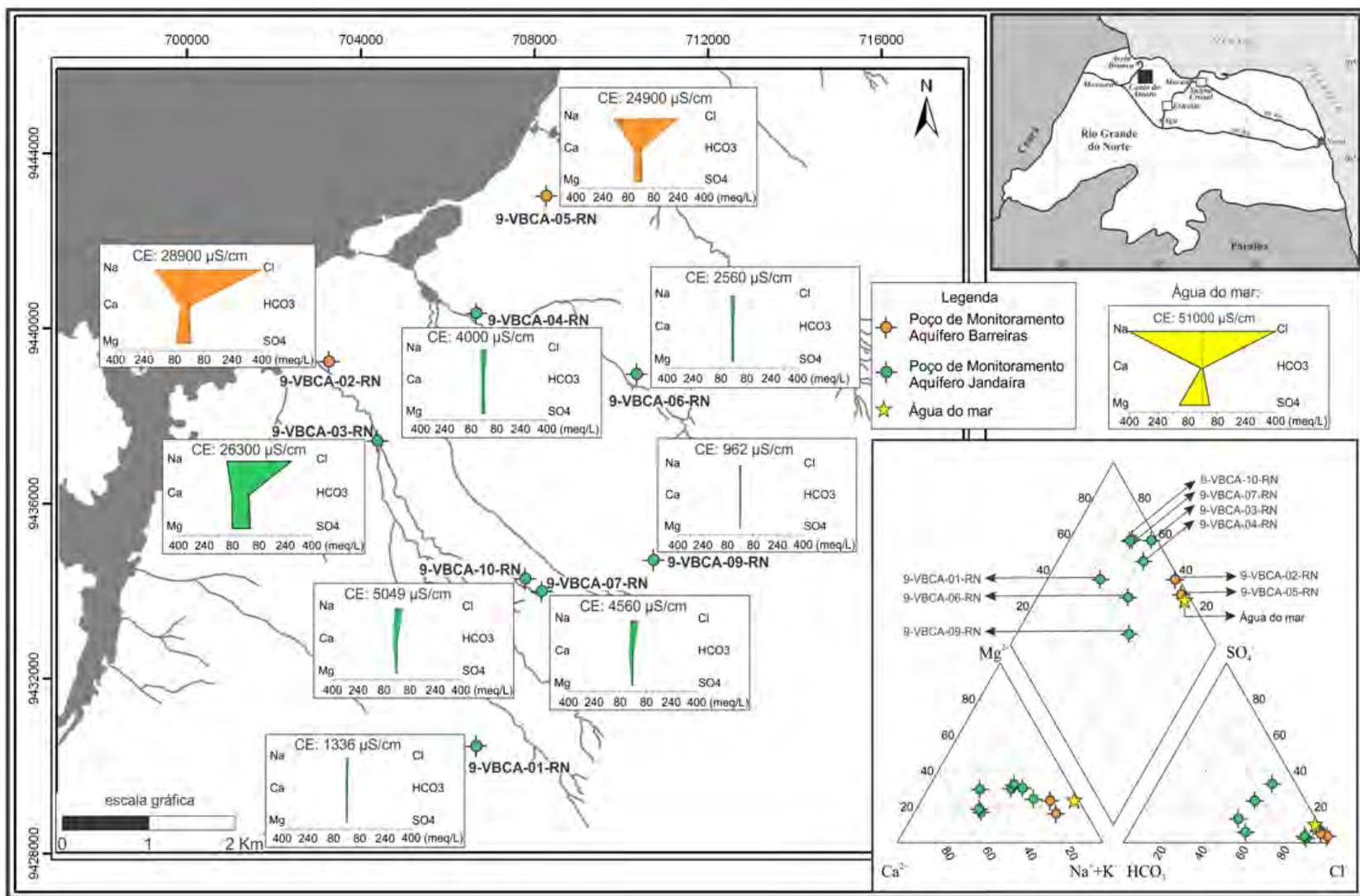


Figura 5.33 – Diagramas hidroquímicos de Stiff (com indicação da condutividade elétrica) e Piper para as águas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra na área de Canto do Amaro. A hidroquímica da água do mar está representada em amarelo.

A **Tabela 5.13** apresenta a classificação das águas de acordo com a predominância dos íons, e o seu respectivo valor de condutividade elétrica.

Tabela 5.13 – Classificação das águas e condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas da área de Canto do Amaro

Aquífero	Poço	Fácies Hidroquímicas	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Jandaíra	9-VBCA-01-RN	Ca-Mg-Na-Cl-HCO ₃	1336
	9-VBCA-03-RN	Na-Mg-Ca-Cl	26300
	9-VBCA-04-RN	Na-Mg-Ca-Cl-SO ₄	4000
	9-VBCA-06-RN	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃ -SO ₄	2560
	9-VBCA-07-RN	Ca-Na-Cl	4560
	9-VBCA-09-RN	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃	962
	9-VBCA-10-RN	Ca-Na-Cl	5048,5
Barreiras	9-VBCA-02-RN	Na-Cl	28900
	9-VBCA-05-RN	Na-Cl	24900

No diagrama de Piper é possível agrupar o conjunto amostral em três grupos, com características distintas, discutidas a seguir:

Grupo A:

Os poços 9-VBCA-02-RN e 9-VBCA-05-RN captando o aquífero Barreiras apresentam águas cloretadas sódicas, com salinidade bastante elevada (condutividade elétrica média de 26900 $\mu\text{S}/\text{cm}$). No diagrama de associação, essas águas ocorrem no campo da água do mar (representada pela estrela amarela no gráfico). Além da intrusão marinha, outros fatores preponderantes devem ser considerados na salinização dessas águas. Os sais (halita, gipsita e silvita) precipitados no terreno tendem progressivamente a percolarem em direção à zona saturada. Esse processo é maximizado considerando o meio essencialmente arenoso da Formação Barreiras e o nível da água bastante raso do aquífero homônimo, nesse setor. O relevo rebaixado e a proximidade das salinas também contribuem com esses fatores.

Grupo B:

Os poços 9-VBCA-10-RN, 9-VBCA-07-RN, 9-VBCA-03-RN e 9-VBCA-04-RN, captando o aquífero Jandaíra, têm águas com predominância cloretada sódico-cálcicas, e condutividade elétrica superior a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nesse conjunto destaca-se o poço 9-VBCA-03-RN que apresenta condutividade elétrica de 26300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nesse caso, é provável a mistura de águas com o aquífero Barreiras subjacente, que também apresenta salinidade nessa ordem de grandeza, além de águas cloretadas sódicas.

Os processos hidrogeoquímicos que ocorrem nessas águas estão ligados a mistura com águas de origem marinha e o aporte de sais precipitados na superfície do terreno que

migra em direção à zona saturada nos eventos de chuva. Esses fatores devem controlar o forte componente cloretado e sódico dessas águas. A evolução dessas águas deve ser controlada por processos complexos que envolvem evaporação, precipitação, dissolução de minerais e reações de troca iônica.

A evaporação da água de superfície e da umidade da zona insaturada é um dos processos determinante na composição química das águas subterrâneas (Richter and Kreitler, 1993). A evaporação da água conduz à precipitação e ao depósito de sais na superfície que são lixiviados durante o período chuvoso para a zona saturada. O intemperismo dos minerais "primários" libera espécies químicas, parte das quais se incorporam em sais com alta solubilidade em água. Em períodos de pouca pluviosidade, esses sais precipitam, devido à saturação de seus componentes nas soluções do solo e subsolo. Esse aporte de água salina para a zona saturada é ampliado em regiões semiáridas, devido ao predomínio de déficit hídrico na maioria dos meses do ano. Opostamente, em períodos de chuva, esses sais são solubilizados e migram para as águas subterrâneas.

Grupo C:

Nesse grupo estão os poços 9-VBCA-01-RN, 9-VBCA-06-RN e 9-VBCA-09-RN, no aquífero Jandaíra. As águas tendem a serem mistas com condutividade elétrica inferior a 2560 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A comparação das águas desse grupo com as águas do grupo B evidencia o componente bicarbonatado e cálcico magnésiano dessas águas. As águas subterrâneas desse grupo têm recarga direta por infiltração da água de chuva e a sua evolução hidrogeoquímica é controlada, principalmente, pelo intemperismo dos minerais que compõem o calcário Jandaíra, notadamente a calcita e dolomita. Obviamente, ocorre também a contribuição do efeito climático, através da concentração cíclica de sais pelos mecanismos de evaporação.

5.4 – HIDROQUÍMICA DE ESTREITO

5.4.1. Aquífero Jandaíra

A estatística descritiva dos parâmetros analisados nas águas do aquífero Jandaíra em Estreito é apresentada nas **Tabelas 5.14** e **5.15**, que corresponde às amostragens representativas dos períodos seco e úmido, respectivamente.

No período seco foram amostrados cinco poços e no período úmido sete poços. Conforme relatado anteriormente, nem todos os poços foram executados a tempo para

permitir a amostragem no período de estiagem. Portanto, tem-se um quantitativo maior de poços amostrados unicamente no período chuvoso.

Na presente análise estatística, que objetivou verificar algum efeito sazonal na hidroquímica do aquífero, foram utilizados apenas os poços cuja amostragem se realizou nos dois períodos (no caso, cinco poços), para permitir que os resultados estatísticos obtidos pudessem ser comparáveis entre si. Ressalta-se que os poços amostrados apenas no período úmido também foram utilizados no estudo para a caracterização hidroquímica e identificação de processos geoquímicos atuantes nessas águas, conforme será abordado posteriormente.

Como pode ser visto na **Tabela 5.14**, as águas do aquífero Jandaíra durante o período seco apresentam com condutividade elétrica média de 1758,60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores esses, bastante inferiores aos obtidos para área de Canto do Amaro (e Salina Cristal que será discutida posteriormente). Os valores de pH variam de 6,73 a 7,24, correspondentes a águas neutras. A dureza mínima obtida foi de 315,89 mg/L e a máxima 1179,14 mg/L, refletindo numa média de 627,90 mg/L como CaCO_3 , portanto todas as amostras enquadradas na classe de águas muito duras. O coeficiente de variação não evidencia elevada variabilidade (heterogeneidade) para a maioria dos resultados analíticos das amostras para os parâmetros analisados. A única exceção é o Cl^- , com valor de CV superior a 100%.

Tabela 5.14 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Estreito para o período seco.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1758,60	876,00	3710,00	1369,00	1140,39	64,85
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	828,67	378,46	1805,46	725,22	566,63	68,38
pH	6,92	6,73	7,24	6,87	0,20	2,88
Dureza (mg/L como CaCO_3)	627,90	315,89	1179,14	546,96	330,33	52,61
Ca^{2+} (mg/L)	131,16	57,60	251,00	99,80	74,24	56,61
K^+ (mg/L)	7,54	4,00	11,30	6,80	2,88	38,17
Mg^{2+} (mg/L)	73,28	39,60	134,00	71,00	36,63	49,98
Na^+ (mg/L)	88,08	38,30	225,00	47,30	79,39	90,14
Cl^- (mg/L)	284,91	89,97	809,75	179,94	299,53	105,13
SO_4^- (mg/L)	63,82	23,20	124,80	54,80	44,18	69,22
HCO_3^- (mg/L)	231,31	167,75	265,35	240,95	37,64	16,27

Para o período úmido (**Tabela 5.15**), a mineralização das águas do aquífero Jandaíra é verificada pelos resultados de condutividade elétrica média das águas de 1805,10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esses valores são semelhantes aos obtidos para amostragem representativa do período seco. A dureza das águas do aquífero Jandaíra no período úmido permanece elevada, com valor médio de 629,95 mg/L, sendo todas as amostras enquadradas na classe de águas

muito duras. Essa variável, que é decorrente da dissolução de calcário na Formação Jandaíra, não apresentou variação significativa nos resultados analíticos obtidos nas duas campanhas amostrais, que poderia ocorrer em resposta ao efeito da recarga que ocorre no período úmido. Os valores de pH variam de 6,93 a 7,58, correspondentes a águas neutras a alcalinas.

Considerando-se o coeficiente de variação, observa-se na **Tabela 5.15** uma elevada variabilidade (heterogeneidade) apenas para o Na^+ e Cl^- . Esse último parâmetro, já havia apresentado CV superior a 100% no período seco, e será investigado posteriormente, na análise da distribuição dos cátions e ânions nessas águas.

Tabela 5.15 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=5), na área de Estreito para o período úmido.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1805,10	881,00	4140,00	1460,50	1329,67	73,66
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	1019,62	476,27	2257,11	847,48	712,72	31,26
pH	6,93	6,56	7,58	6,89	0,41	5,87
Dureza (mg/L como CaCO_3)	629,95	338,56	1183,32	540,69	325,10	51,61
Ca^{2+} (mg/L)	141,00	74,00	282,00	103,00	83,09	58,93
K^+ (mg/L)	8,70	6,33	11,70	9,10	2,17	24,90
Mg^{2+} (mg/L)	70,97	44,30	116,00	68,50	28,13	39,64
Na^+ (mg/L)	115,53	37,70	357,00	45,60	136,85	118,46
Cl^- (mg/L)	339,56	110,80	980,80	207,80	365,55	107,65
SO_4^- (mg/L)	100,70	42,20	181,50	112,00	58,79	58,39
HCO_3^- (mg/L)	360,76	265,90	419,99	369,99	56,97	15,79

5.4.1.1 - Salinidade do aquífero Jandaíra em Estreito

A salinidade das águas está sendo avaliada com base no parâmetro condutividade elétrica. Na amostragem representativa do período seco (**Tabela 5.14**) a condutividade elétrica das águas do aquífero Jandaíra variou de 876 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBET-06-RN) a 3710 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (9-VBET-03-RN) refletindo uma média e mediana de 1758,6 e 1369 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Para o período úmido (**Tabela 5.15**), a condutividade elétrica das águas variou de 881 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBET-06-RN) a 4140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (9-VBET-03-RN), com média e mediana de 1805,1 e 1460,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente.

A salinidade média das águas é ligeiramente superior no período úmido, portanto não é possível afirmar que se dê em resposta ao efeito sazonal. Ainda, essa tendência não é observada em todos os poços, conforme pode ser observado na **Figura 5.34**.

Na referida figura, observa-se que apenas os poços 9-VBET-03-RN e 9-VBET-08-RN apresentam salinidade elevada. Nos demais poços, a condutividade elétrica é inferior a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

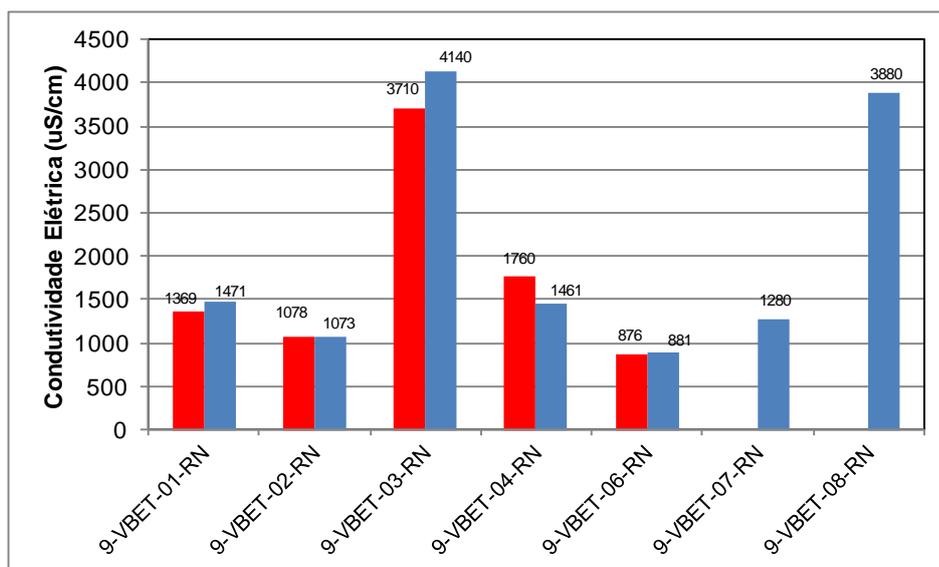


Figura 5.34 – Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A distribuição espacial da condutividade elétrica do aquífero Jandaíra na área de Estreito consta na **Figura 5.35**. Em linhas gerais, para ambos os períodos amostrais, o zoneamento da condutividade elétrica das águas apresenta a mesma configuração espacial, isto é, aumenta de leste para oeste.

Na faixa oeste da área, chama atenção a salinidade dos poços 9-VBET-03-RN e 9-VBET-08-RN, que formam um núcleo de concentração salina elevada. Essa ocorrência pode estar associada a uma condição de fluxo lento, provavelmente devido à menor permeabilidade do aquífero Jandaíra em Estreito, fato constatado pelo maior gradiente hidráulico encontrado nesta área (**Capítulo 4, item 4.4.2**). Logo, o fluxo lento induz a um maior contato e interação água-rocha, favorecendo a maior salinização. Os demais poços apresentam águas menos enriquecidas (menor salinidade).

Nos poços 9-VBET-01-RN e 9-VBET-06-RN, ambos localizados na faixa leste da área, não fica descartada a ocorrência do aporte de águas do escoamento superficial do rio Açu por meio de infiltração vertical descendente a partir do canal do rio ou, ainda, o aporte de águas subterrâneas do aquífero aluvial. Essas águas (rio e aquífero aluvial), que certamente possuem baixa salinidade podem propiciar a diluição das águas do aquífero Jandaíra. Na **Figura 5.36** pode-se visualizar a locações dos poços perfurados na área de Estreito, e sua disposição geográfica em relação ao sistema de drenagens do Rio Açu.

Os dois poços localizados na faixa leste captando o aquífero Jandaíra (9-VBET-01-RN e 9-VBET-06-RN) apresentam na sua porção superior (sobreposto às rochas carbonáticas) um pacote de sedimentos inconsolidados correlacionados à Formação Barreiras, com aproximadamente 17 m de espessura. Nos poços do trecho oeste (9-VBET-

02-RN, 9-VBET-07-RN, 9-VBET-08-RN, 9-VBET-03-RN e 9-VBET-04-RN) predomina a exposição de calcários da Formação Jandaíra que afloram em superfície do terreno. A única exceção está nos poços 9-VBET-08-RN e 9-VBET-03-RN que apresentam uma cobertura de 3 m de espessura de sedimentos siliciclásticos no topo. A correlação hidrogeológica desses poços pode ser visualizada nas **Figuras 4.15 e 4.16 (Capítulo 4)** e é provável que essa configuração estratigráfica venha a interferir na hidroquímica das águas estudadas, nos dois domínios (leste e oeste). De toda forma, entende-se que o conjunto de poços da área de Estreito representa a hidroquímica natural do aquífero Jandaíra em domínio semiárido.

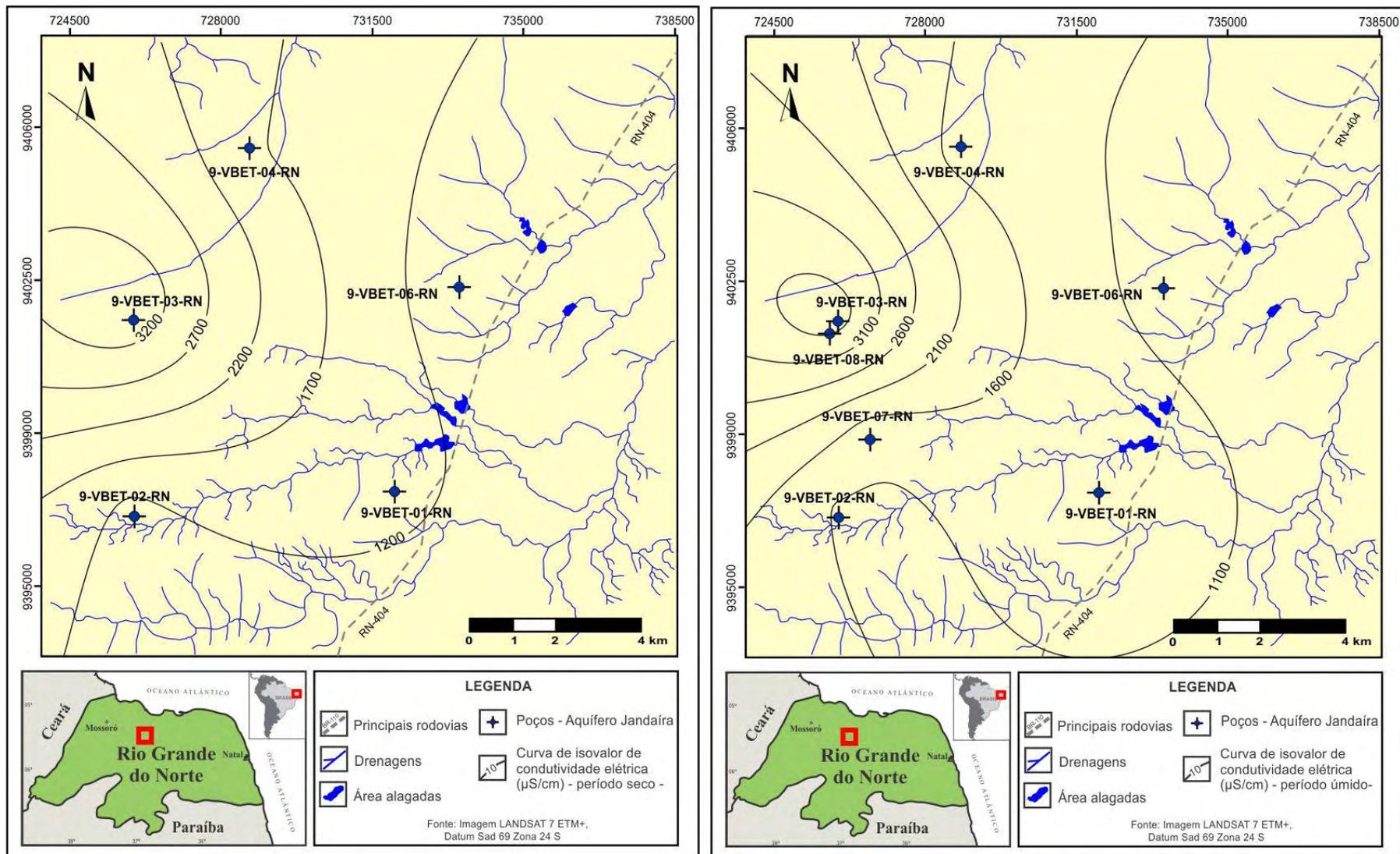


Figura 5.35 - Zoneamento da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) ($n=5$); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) ($n=7$).

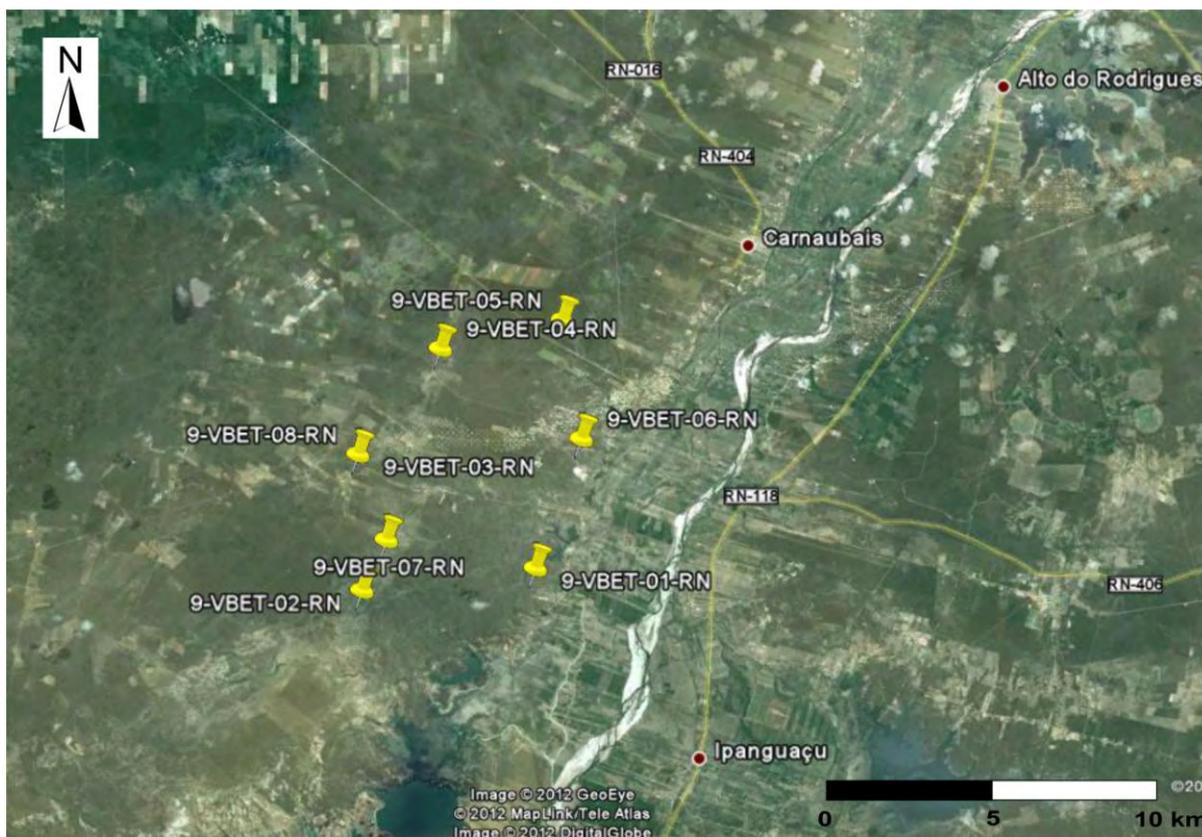


Figura 5.36 – Distribuição espacial dos poços na área de Estreito. À leste dos poços encontra-se o vale fluvial do Açu. Base: Imagem *Google Earth*, julho 2012.

5.4.1.2 - Distribuição dos cátions no aquífero Jandaíra em Estreito

➤ Cálcio

As concentrações de Ca^{2+} no período seco (**Tabela 5.14**) variam de 57,6 mg/L (9-VBET-06-RN) a 251 mg/L (9-VBET-03-RN), com média de 131,16 mg/L e mediana de 99,80 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 74 mg/L (VBET-06-RN) até 282 mg/L (9-VBET-03-RN), refletindo a média de 141 mg/L e mediana de 103 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**.

Na maioria dos poços, as maiores concentrações de Ca^{2+} são observadas no período úmido (**Figura 5.37**). O acréscimo no período úmido ocorre devido à dissolução das rochas carbonáticas, principalmente a calcita, durante os eventos de recarga.

O zoneamento desse parâmetro para ambos os períodos amostrais (**Figura 5.38**) evidencia a mesma configuração espacial. A concentração de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Estreito decresce de oeste para leste, em direção ao vale fluvial do Açu.

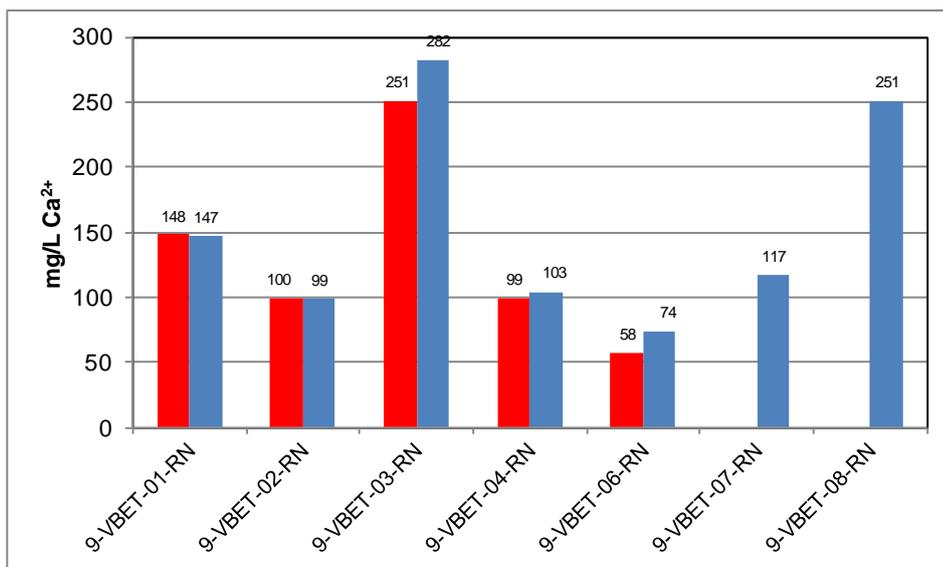


Figura 5.37 – Teor de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

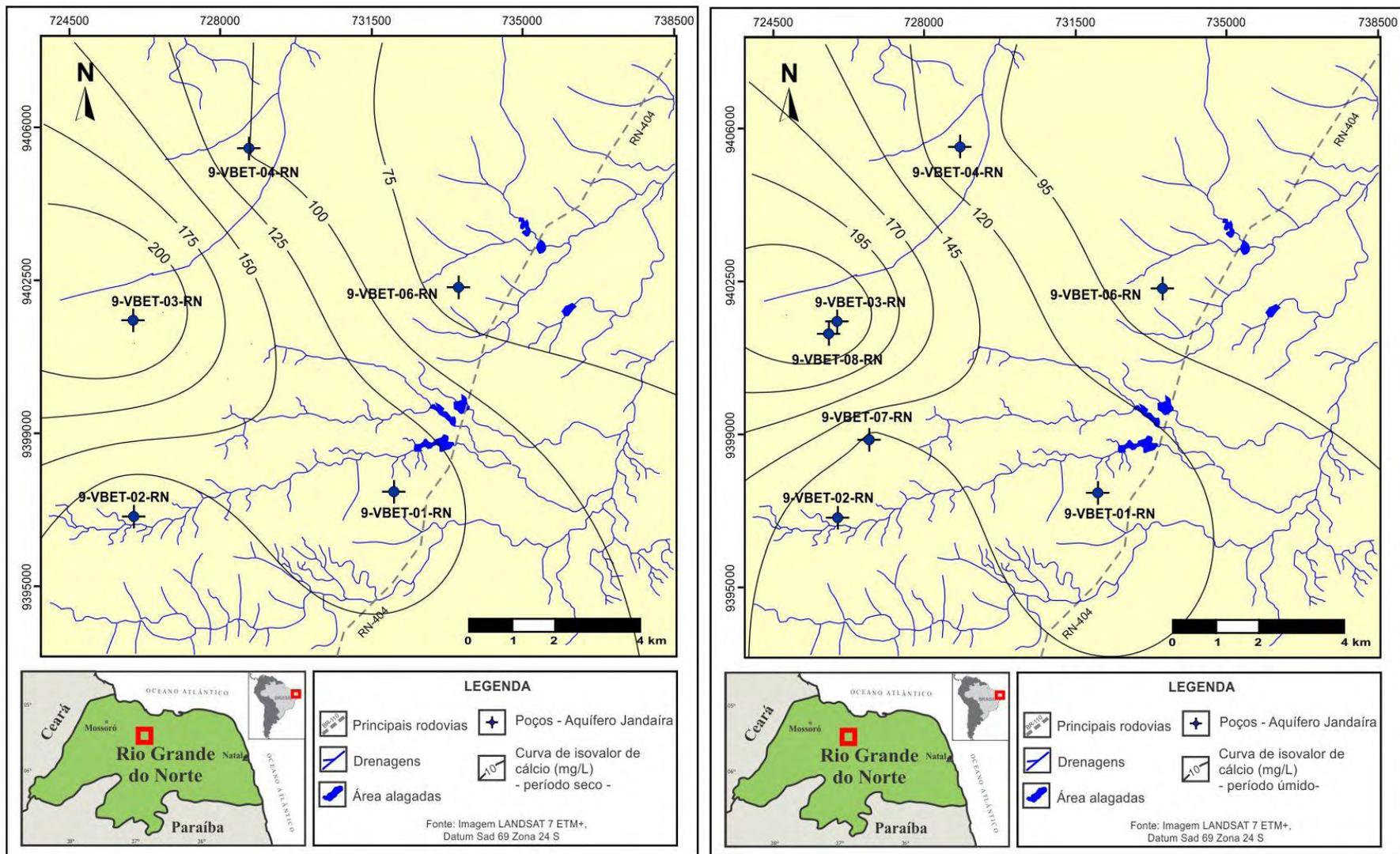


Figura 5.38 - Zoneamento do Ca²⁺ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Magnésio

Na amostragem representativa do período seco a concentração de Mg^{2+} variou de 39,6 mg/L (9-VBET-06-RN) a 134 mg/L (9-VBET-03-RN), com média de 73,28 mg/L e mediana de 71,0 mg/L (**Tabela 5.14**). Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 44,3 mg/L (9-VBET-06-RN) até 116 mg/L (9-VBET-03-RN), refletindo a média de 70,97 mg/L e mediana de 68,50 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**.

Os resultados estatísticos evidenciam que o teor de Mg^{2+} no conjunto de poços foi levemente superior no período seco. Entretanto, a análise individual das amostras (**Figura 5.39**) mostra que isso não ocorreu em todos os poços, de forma que em algumas amostras o teor de Mg^{2+} foi superior no período úmido. O acréscimo no período úmido deve ocorrer em resposta aos eventos de recarga, quando é favorecida a dissolução das rochas carbonáticas portadoras de Mg^{2+} , de forma similar ao ocorrido com o Ca^{2+} . Em alguns casos, as condições naturais do aquífero não possibilitam a transformação rápida das chuvas em recarga. Isso explica, em parte, as maiores concentrações observadas no período seco.

O zoneamento desse parâmetro para ambos os períodos amostrais (**Figura 5.40**) evidencia a mesma configuração espacial. A concentração de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Estreito decresce de oeste para leste, em direção ao vale fluvial do Açú.

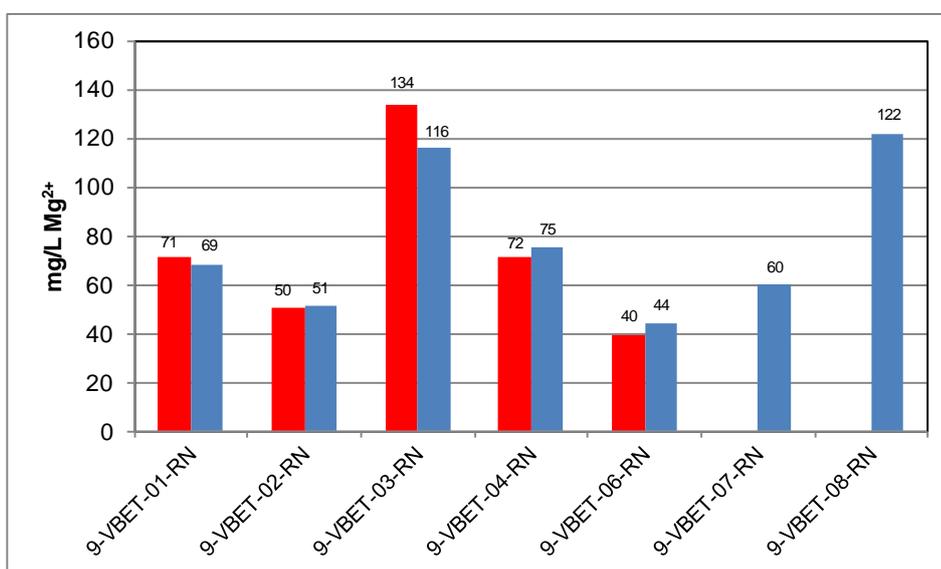


Figura 5.39 – Teor de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

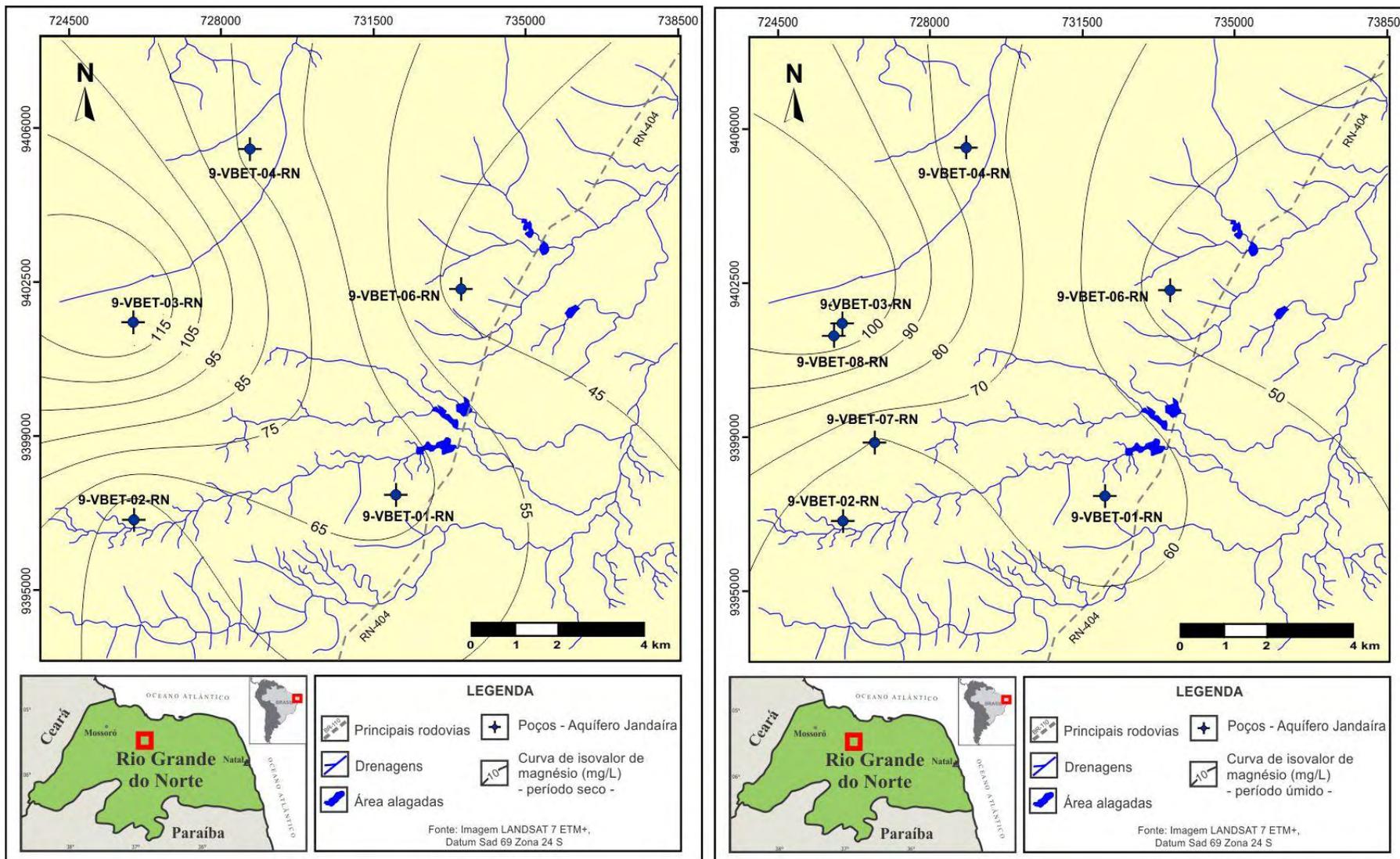


Figura 5.40 - Zoneamento do Mg²⁺ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Sódio

As concentrações de Na^+ no período seco (**Tabela 5.14**) variam de 38,30 mg/L (9-VBET-02-RN) a 225,00 mg/L (9-VBET-03-RN), com média de 88,08 mg/L e mediana de 47,30 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 37,70 mg/L (9-VBET-02-RN) até 357,00 mg/L (9-VBET-03-RN), refletindo a média de 115,53 mg/L e mediana de 45,60 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**. Para a maioria das amostras analisadas, o teor de Na^+ foi levemente superior no período úmido (**Figura 5.41**), embora isso ocorra de maneira significativa apenas no poço 9-VBET-03-RN, localizado na faixa oeste da área.

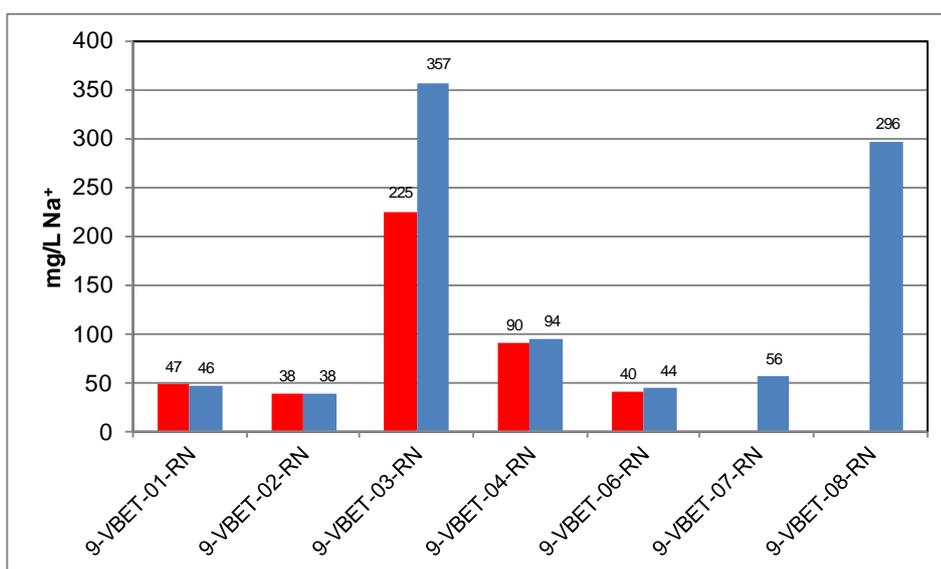


Figura 5.41 – Teor de Na^+ no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.42** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido. Em ambos os mapas, a concentração de Na^+ decresce de oeste para leste. A origem do Na^+ no aquífero Jandaíra em Estreito deve ser a sua concentração na água da chuva, potencializada em domínio semiárido. Os valores inferiores a 100 mg/L correspondem às concentrações naturais do aquífero, que resultam da infiltração da água da chuva de composição cloretada sódica.

Apenas os poços 9-VBET-03-RN e 9-VBET-08-RN apresentam valores elevados de Na^+ , nesse caso, superiores a 200 mg/L, em ambos os períodos amostrais. O clima semiárido favorece a concentração de sais de Na^+ na superfície do terreno, notadamente nos períodos de estiagem, que atingem a zona saturada nos períodos chuvosos.

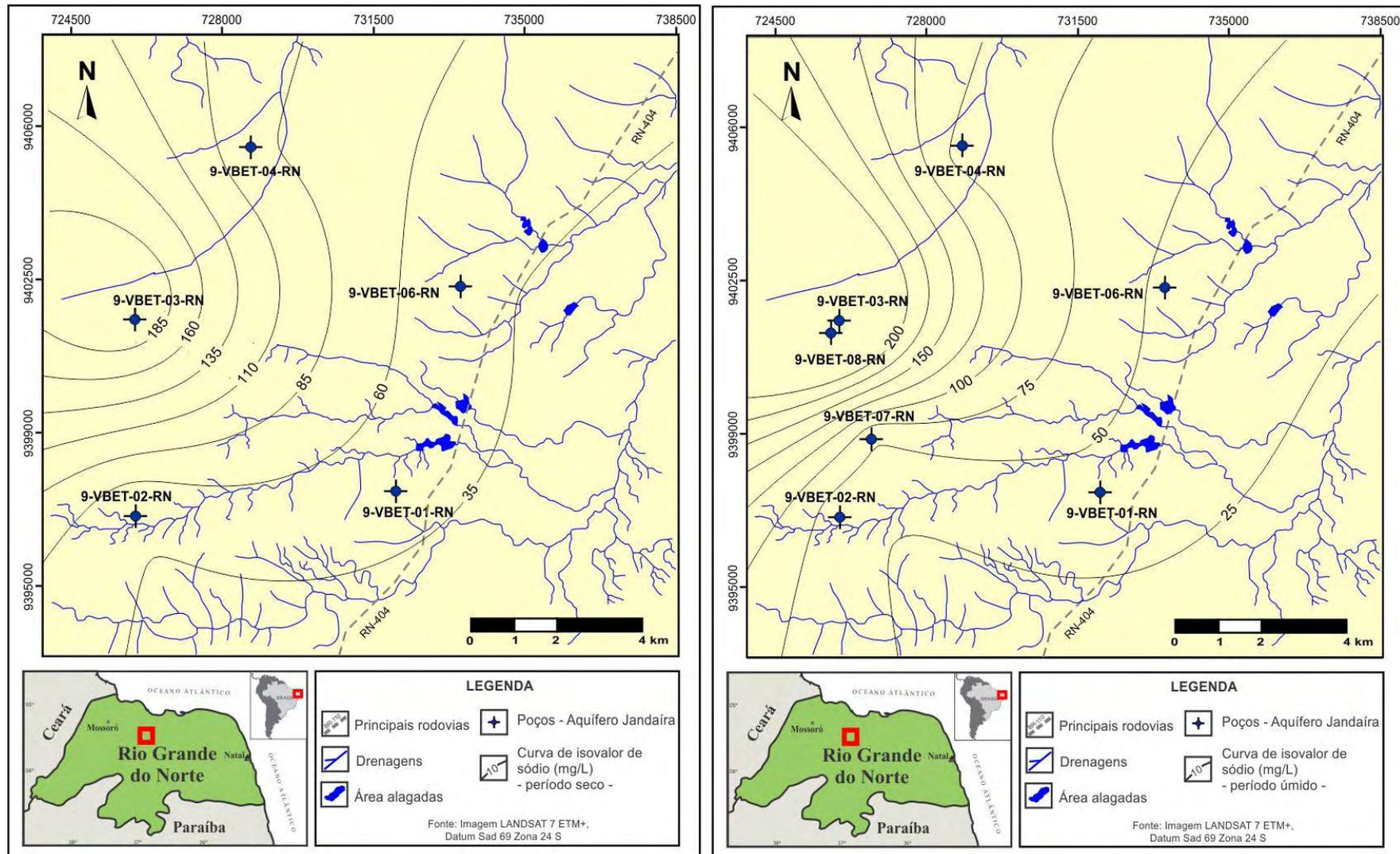


Figura 5.42 - Zoneamento do Na⁺ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Potássio

As concentrações de K^+ no período seco (**Tabela 5.14**) variam de 4,00 mg/L (9-VBET-06-RN) a 11,3 mg/L (9-VBET-04-RN), com média de 7,54 mg/L e mediana de 6,80 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 6,33 mg/L (9-VBET-06-RN) até 11,70 mg/L (9-VBET-04-RN), refletindo a média de 8,70 mg/L e mediana de 9,10 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**. Ainda que os resultados estatísticos revelem valores superiores de K^+ no período úmido, isso ocorre de forma pouco expressiva, de forma que em ambos os períodos amostrais os resultados obtidos são bastante semelhantes, como pode ser visualizado na **Figura 5.43**.

A **Figura 5.44** a distribuição espacial de K^+ no aquífero Jandaíra em Estreito nos períodos seco e úmido. Nos mapas a distribuição desse parâmetro decresce de noroeste para sudeste. A mobilidade do K^+ em solução aquosa é limitada devido à capacidade de retenção nos solos e nos produtos mineralógicos de alteração secundária (nomeadamente nos argilominerais).

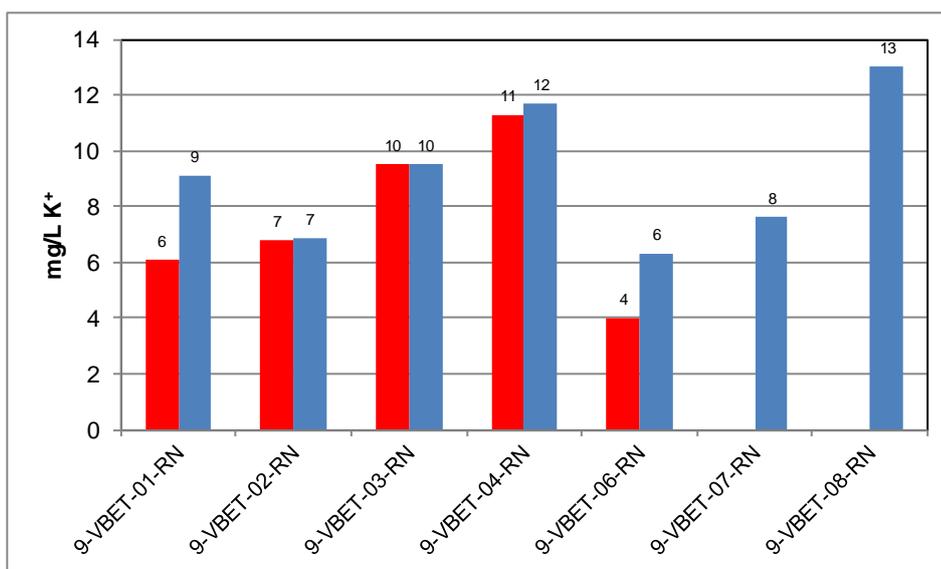


Figura 5.43 – Teor de K^+ no aquífero Jandaíra em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

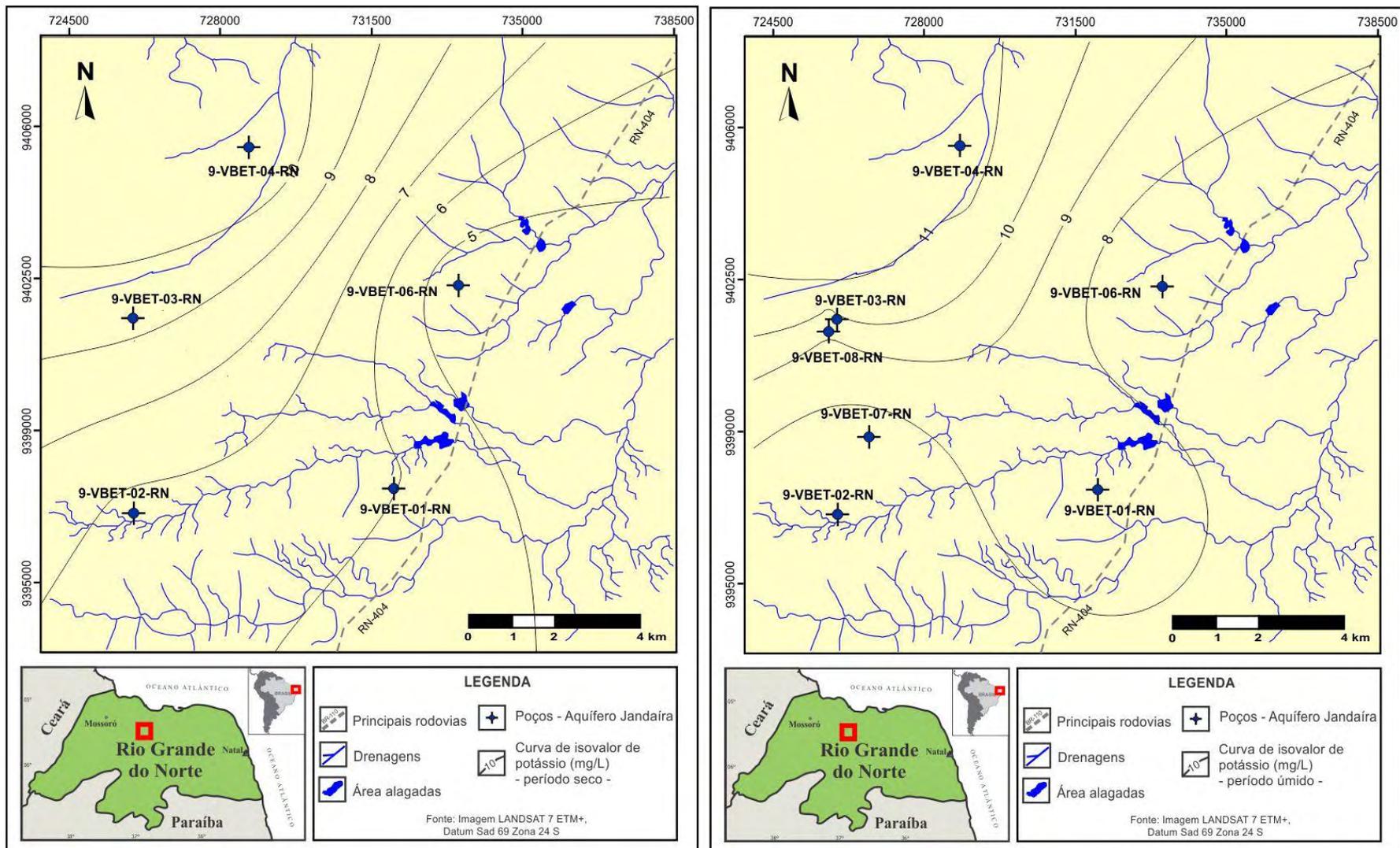


Figura 5.44 - Zoneamento do K^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

5.4.1.3 - Distribuição dos ânions no aquífero Jandaíra em Estreito

➤ Cloreto

Na amostragem representativa do período seco a concentração de Cl^- variou de 89,97 mg/L (9-VBET-06-RN) a 809,75 mg/L (9-VBET-03-RN), com média de 284,91 mg/L e mediana de 179,94 mg/L (**Tabela 5.14**). Para o período úmido, esse parâmetro apresentou variação de 110,80 mg/L (9-VBET-02-RN) até 980,80 mg/L (9-VBET-03-RN), refletindo a média de 339,56 mg/L e mediana de 207,80 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**. Esse parâmetro, juntamente com o Na^+ apresenta elevado coeficiente de variação (acima de 100%) em ambos os períodos de amostragem, indicando uma forte heterogeneidade dos resultados analíticos do conjunto amostral.

A partir dos resultados estatísticos e dos dados individuais apresentados na **Figura 5.45**, conclui-se que houve um aumento significativo na concentração de Cl^- no período úmido. A **Figura 5.46** ilustra a distribuição desse parâmetro em ambos os períodos de amostragem.

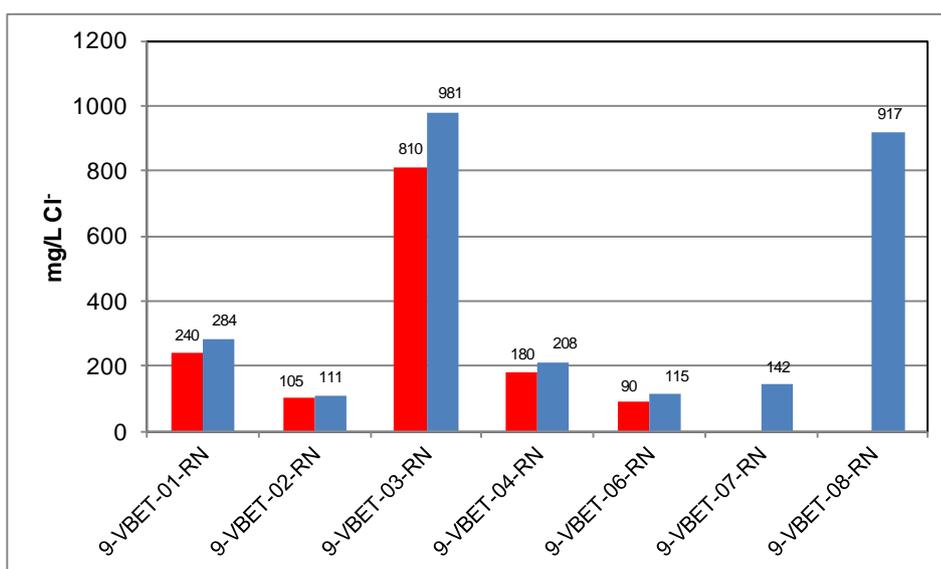


Figura 5.45 – Teor de Cl^- no aquífero Jandaíra em Estreito, no período seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

O Cl^- no aquífero Jandaíra em Estreito provém da água da chuva que tem composição cloretada sódica. Em domínio semiárido a evaporação intensa resulta na acumulação de sais de cloreto de sódio na zona não saturada, que durante os eventos de recarga são carregados para o aquífero. Esse mecanismo de concentração cíclica por evaporação constitui no principal fator de salinização das águas subterrâneas no semiárido.

Os poços 9-VBET-03-RN e 9-VBET-08-RN apresentam valores bastante superiores, quando comparados aos demais. Esse cenário deve estar associado a condição de fluxo lento que prejudica a circulação das águas, conforme abordado anteriormente.

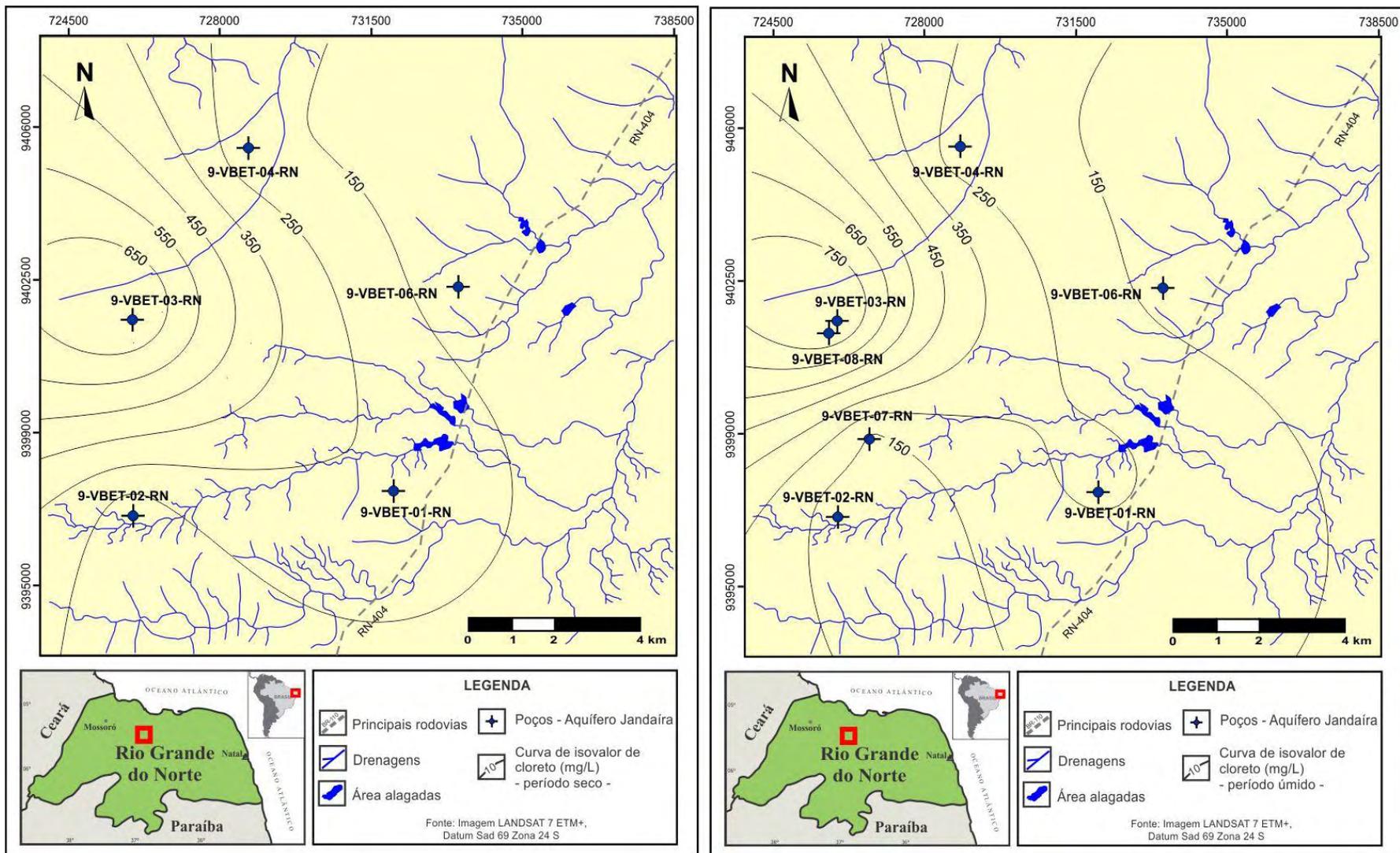


Figura 5.46 - Zoneamento do Cl⁻ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Bicarbonato

As concentrações de HCO_3^- no período seco (**Tabela 5.14**) variam de 167,75 mg/L (9-VBET-06-RN) a 265,35 mg/L (9-VBET-04-RN), refletindo uma média e mediana de 231,31 mg/L e 240,95 mg/L, respectivamente. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 265,90 mg/L (9-VBET-06-RN) até 419,99 mg/L (9-VBET-04-RN), com média de 360,76 mg/L e mediana de 369,99 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**.

A concentração de HCO_3^- no aquífero Jandaíra é significativamente superior no período úmido (**Figura 5.47**). A dissolução dos carbonatos pode explicar o aumento da concentração desse elemento no período de maior recarga. Entretanto, os resultados analíticos de Ca^{2+} e Mg^{2+} não evidenciaram esse comportamento, evidenciando que parte do HCO_3^- nessas águas subterrâneas pode ter a sua origem no CO_2 atmosférico e na decomposição da matéria orgânica presente na zona insaturada que atinge o meio saturado no período das chuvas.

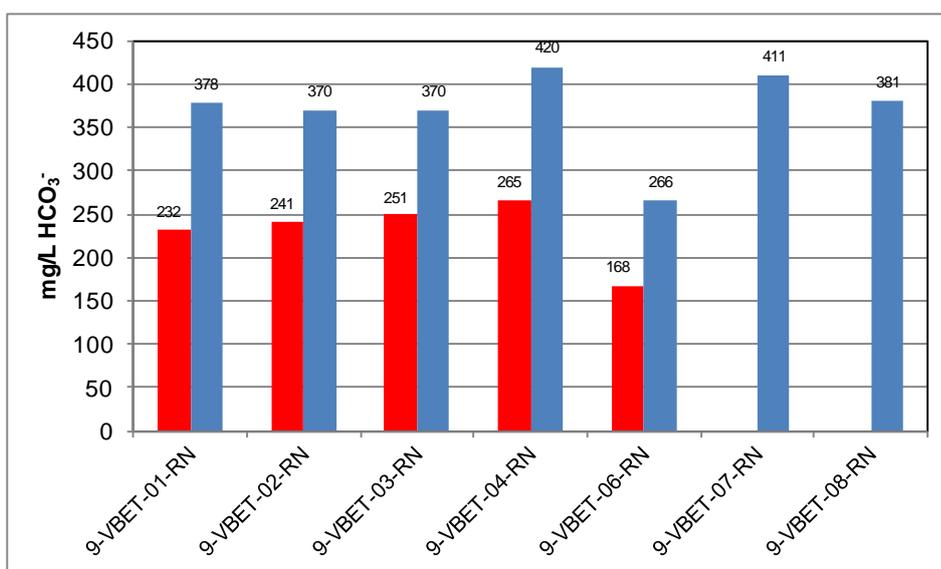


Figura 5.47 – Teor de HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Estreito, no período seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.48** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido. Observa-se a mesma configuração dos mapas, com um aumento na concentração de HCO_3^- de leste para oeste.

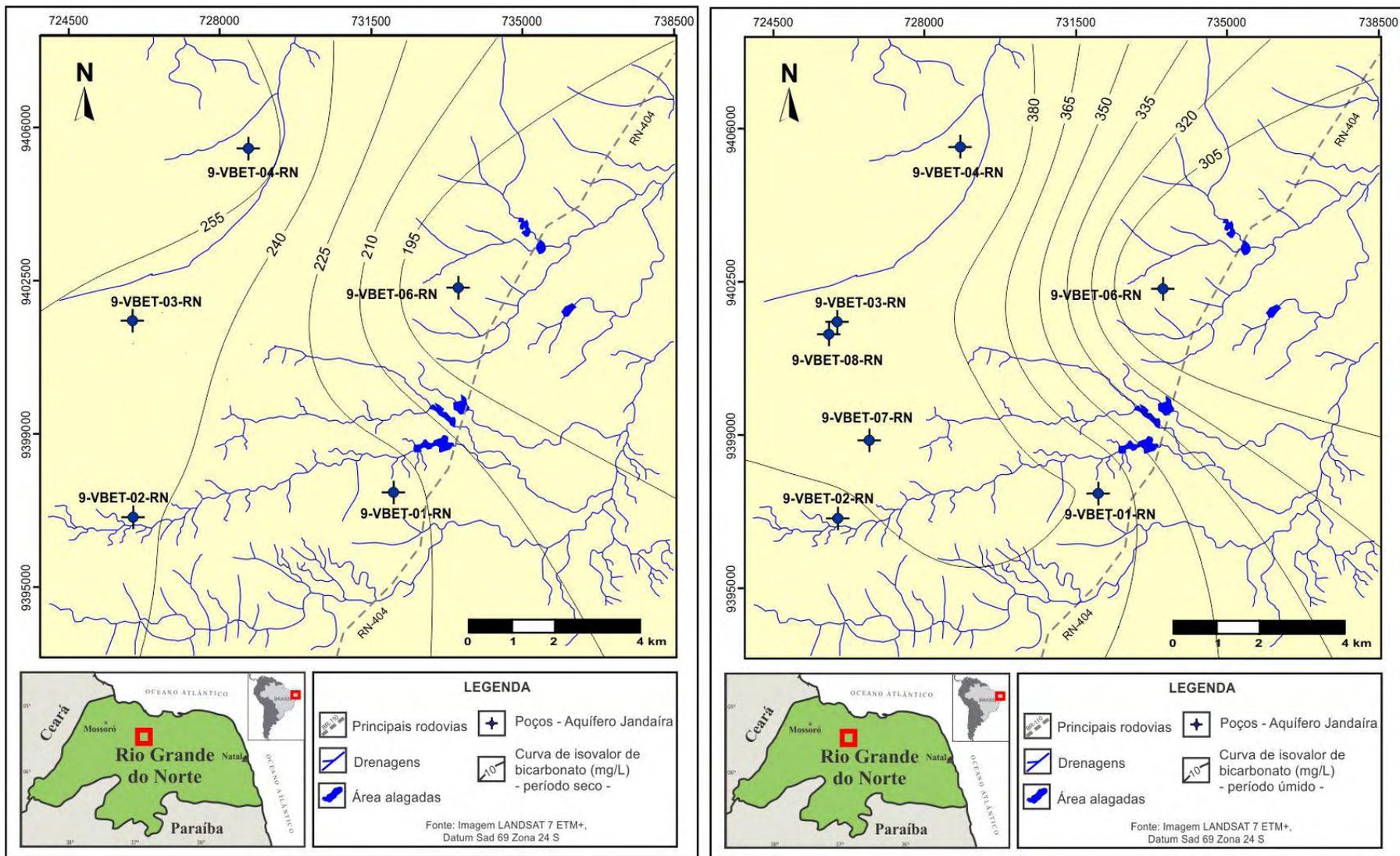


Figura 5.48 - Zoneamento do HCO_3^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

➤ Sulfato

Na amostragem representativa do período seco a concentração de SO_4^- variou de 23,20 mg/L (9-VBET-02-RN) a 124,80 mg/L (9-VBET-03-RN), com média de 63,82 mg/L e mediana de 54,80 mg/L (**Tabela 5.14**). Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 42,20 mg/L (9-VBET-02-RN) até 181,50 mg/L (9-VBET-03-RN), refletindo a média de 100,70 mg/L e mediana de 112,00 mg/L apresentada na **Tabela 5.15**.

A **Figura 5.49** apresenta os resultados analíticos obtidos para cada poço e na **Figura 5.50** a distribuição de SO_4^- no período seco e úmido. A concentração desse parâmetro é superior no período úmido para todas as amostras analisadas.

A origem do SO_4^- na área de estudo pode ser a dissolução da gipsita, que apesar de não ser um mineral abundante nas rochas da Formação Jandaíra, pode ser proveniente de traços de cristais de gipsita presentes na rocha matriz, por deposição durante a formação do calcário em ambiente marinho. O aumento da concentração durante o período úmido indica a rápida dissolução desse mineral.

Os teores mais elevados de SO_4^- são verificados na faixa oeste da área. As concentrações decrescem na faixa leste, em direção ao vale fluvial do rio Açú.

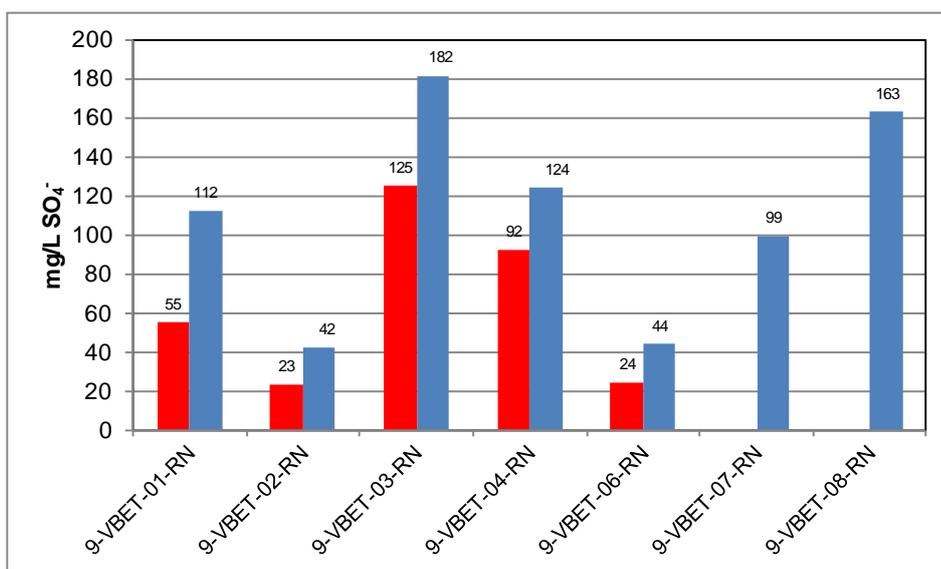


Figura 5.49 – Teor de SO_4^- no aquífero Jandaíra em Estreito, no período seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

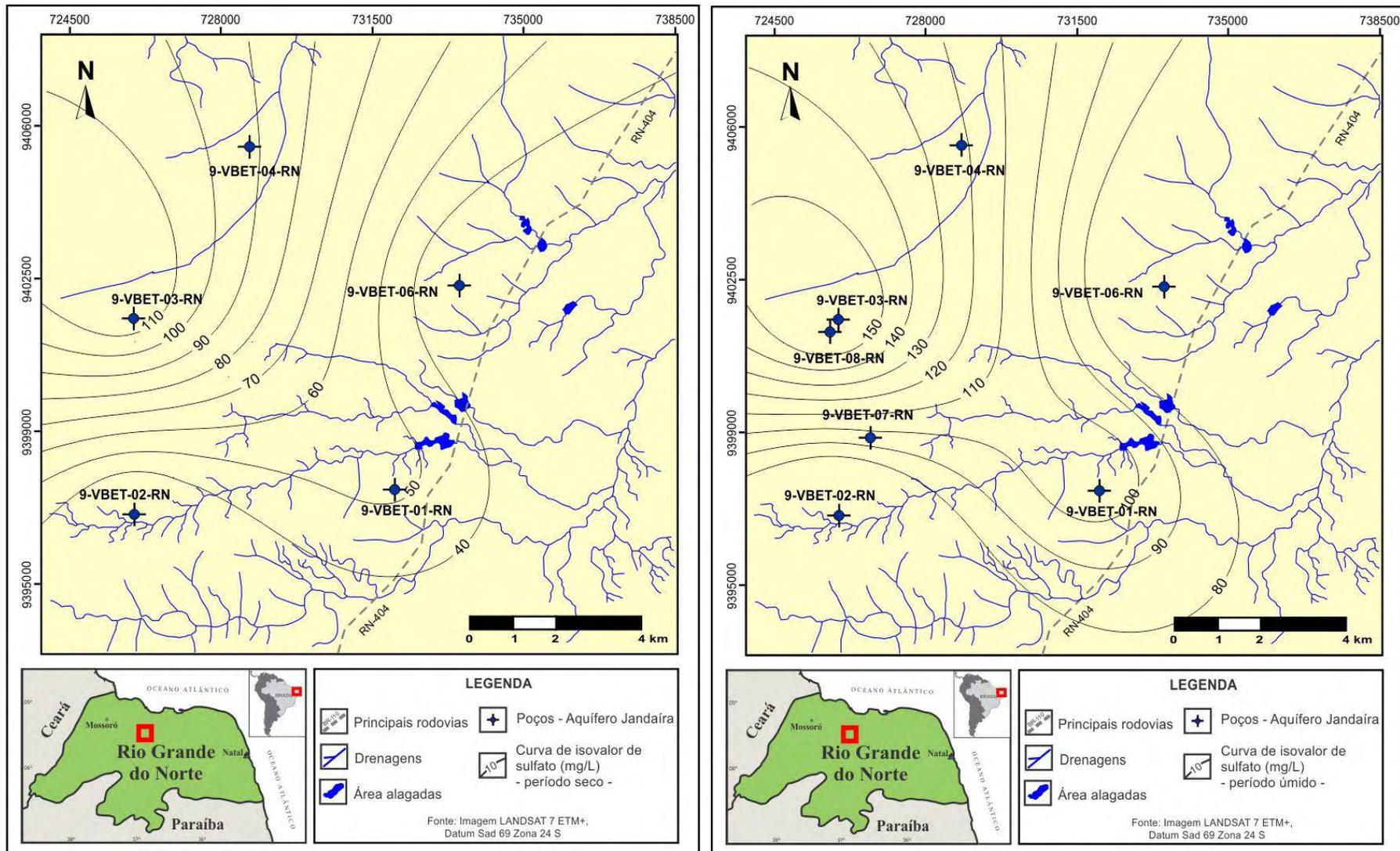


Figura 5.50 - Zoneamento do SO_4^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Estreito. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=5); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=7).

5.4.2 - Aquífero Barreiras

Devido a descontinuidade lateral dessa unidade aquífera, discutida no Capítulo 4 (Hidrogeologia), apenas um poço foi perfurado na área de Estreito captando o aquífero Barreiras, o 9-VBET-05-RN localizado no setor nordeste da área (**Figura 5.5**). O resultado analítico desse poço é apresentado nas **Tabelas 5.6 e 5.7**, para o período seco e úmido, respectivamente.

Em ambos os períodos amostrais as águas são ligeiramente salobras, o pH com tendência a águas neutras e no que tange a dureza todas as amostras classificadas como águas muito duras.

5.4.2.1 - Salinidade do aquífero Barreiras em Estreito

A condutividade elétrica das águas do aquífero Barreiras na área de Estreito variou de 2273 $\mu\text{S/cm}$ no período seco a 2607 $\mu\text{S/cm}$ no período úmido (**Figura 5.51**). Essas águas ligeiramente salobras refletem o clima semiárido da região, com maior concentração salina das águas durante o período das chuvas período em que os sais acumulados na zona não saturada atingem o domínio aquífero.

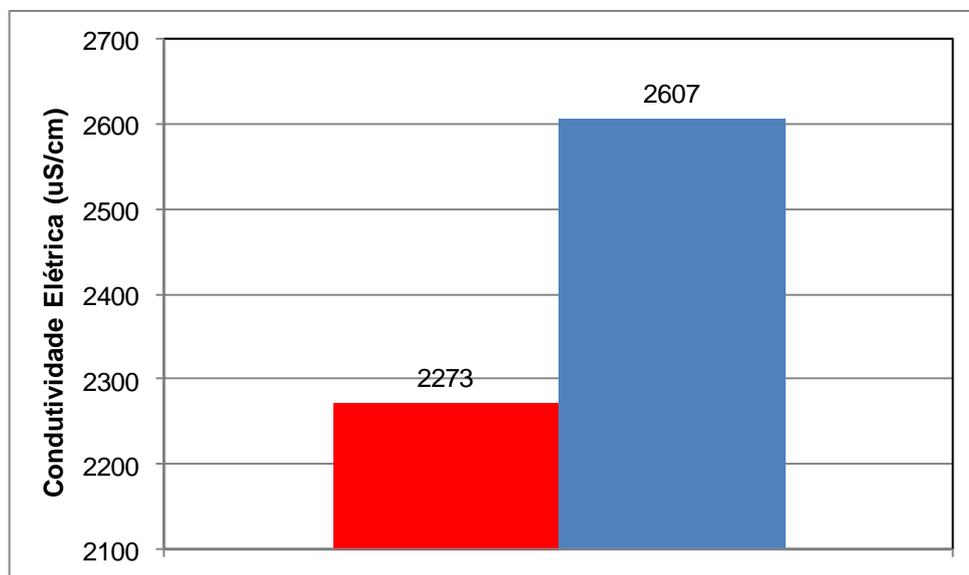


Figura 5.51 – Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) do poço 9-VBET-05-RN no aquífero Barreiras em Estreito, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.4.2.2 - Cátions no aquífero Barreiras em Estreito

A **Figura 5.52** apresenta o teor de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ no aquífero Barreiras em Estreito. A maioria dos parâmetros responde aos eventos de recarga, na medida em que se verifica um aumento na concentração dos íons dissolvidos na água durante o período das chuvas. Para o cátion K^+ essa relação não foi observada, provavelmente devido a sua característica de íon com tendência de ficar retido nos solos e nos produtos litológicos de alteração.

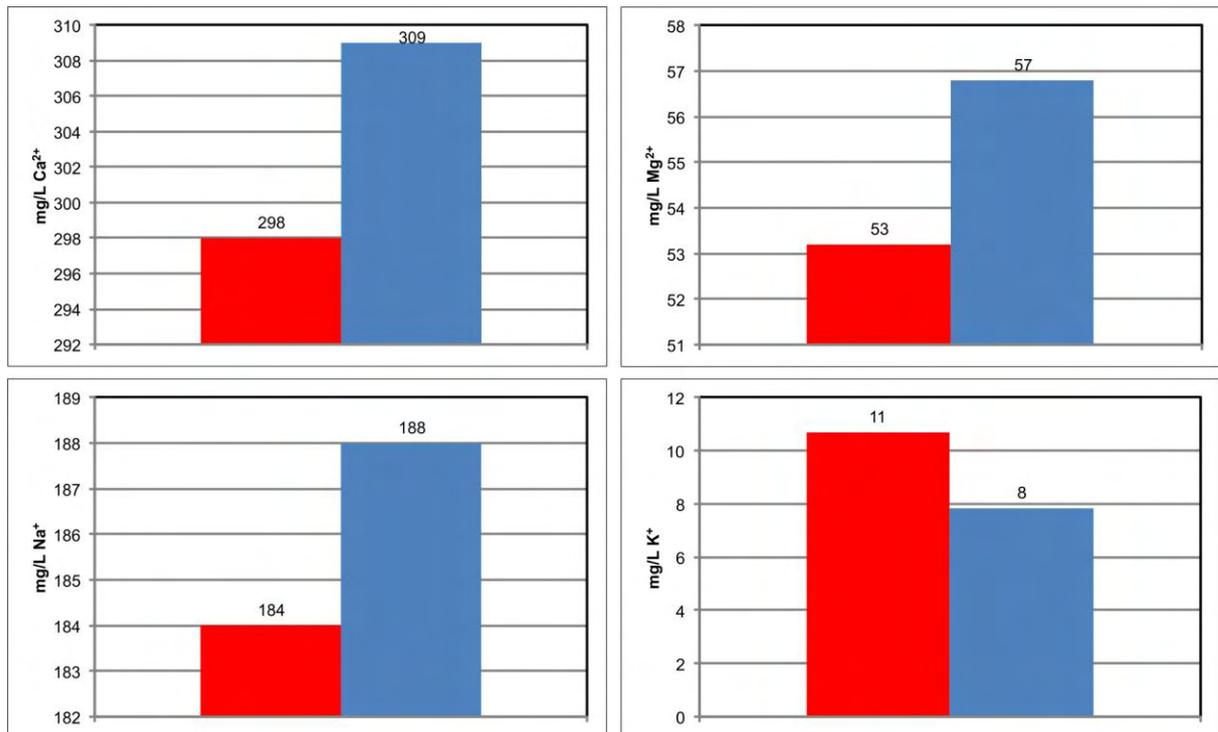


Figura 5.52 – Teor dos cátions do poço 9-VBET-05-RN no aquífero Barreiras em Estreito, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.4.2.3 - Ânions no aquífero Barreiras em Estreito

A **Figura 5.53** apresenta o teor de Cl^- , HCO_3^- e SO_4^- no aquífero Barreiras em Estreito. Para todos os elementos, observa-se um aumento das concentrações no período úmido, provavelmente em resposta aos eventos de recarga.

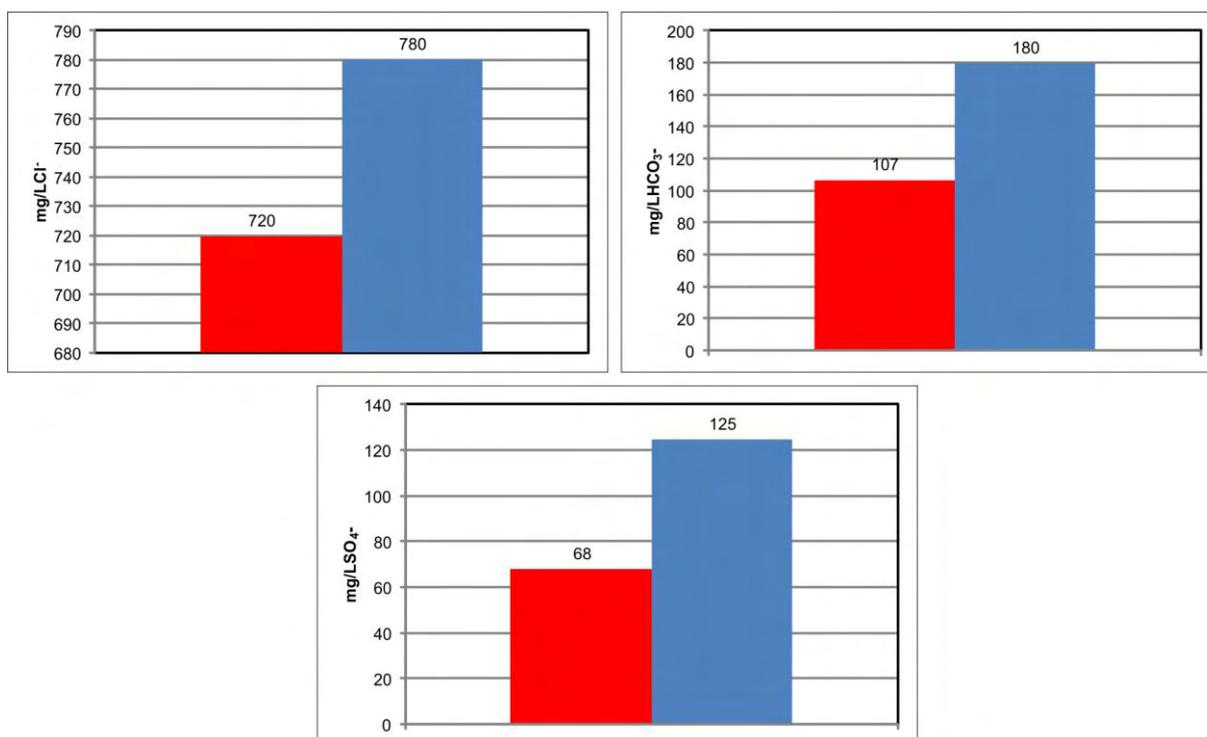


Figura 5.53 – Teor dos ânions do poço 9-VBET-05-RN no aquífero Barreiras em Estreito, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.4.3 - Fácies hidroquímicas em Estreito

Na **Figura 5.54** pode ser visualizado hidroquímica dos aquíferos Jandaíra e Barreiras na área de Estreito, através dos diagramas de Piper e Stiff. Foram utilizados unicamente os resultados analíticos da coleta representativa do período úmido, já que para essa etapa amostral se dispõe de um maior quantitativo de poços amostrados. A **Tabela 5.16** apresenta a classificação das águas de acordo com a predominância dos íons, e o seu respectivo valor de condutividade elétrica.

A área de Estreito destaca-se por apresentar águas menos mineralizadas quando comparadas às demais áreas. Para o aquífero Jandaíra a condutividade elétrica das águas variou de 881 a 4140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a única amostra de água do aquífero Barreiras nessa área apresenta condutividade elétrica de 2607 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e fácies hidroquímica cloretada cálcica.

No aquífero Jandaíra predomina o componente bicarbonatado juntamente com o aporte de Ca^{+2} e Mg^{+2} , indicando que a química dessa água pode ter sido adquirida principalmente pelo intemperismo das rochas que constituem a unidade aquífera através do processo de interação água-rocha. O enriquecimento dos íons Cl^- e Na^+ nas águas do aquífero Jandaíra em Estreito se traduz em águas mais mineralizadas, como é o caso das amostras dos poços 9-VBET-03-RN e 9-VBET-08-RN.

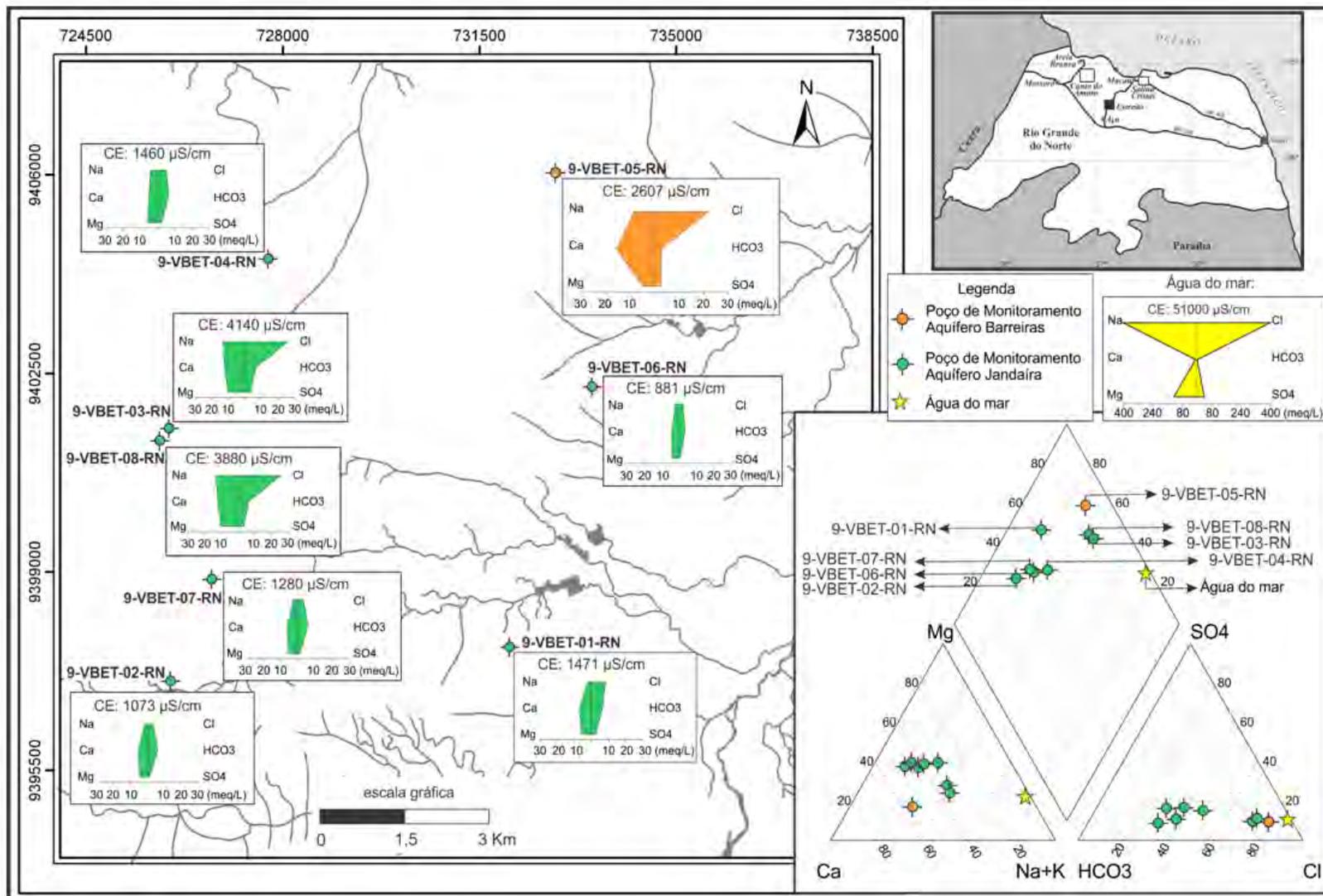


Figura 5.54 – Diagramas hidroquímicos de Stiff (com indicação da condutividade elétrica) e Piper para as águas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra na área de Estreito. A hidroquímica da água do mar está representada em amarelo.

Tabela 5.16 – Classificação das águas e condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas da área de Estreito.

Aquífero	Poço	Fácies Hidroquímicas	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)
Jandaíra	9-VBET-01-RN	Ca-Mg-Cl-HCO ₃	1471
	9-VBET-02-RN	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl	1073
	9-VBET-03-RN	Na-Ca-Mg-Cl	4140
	9-VBET-04-RN	Mg-Ca-Na-HCO ₃ -Cl	1460
	9-VBET-06-RN	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl	881
	9-VBET-07-RN	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl	1280
	9-VBET-08-RN	Na-Ca-Mg-Cl	3880
Barreiras	9-VBET-05-RN	Ca-Na-Mg-Cl	2607

5.5 – HIDROQUÍMICA DE SALINA CRISTAL

5.5.1 - Aquífero Jandaíra

A estatística dos parâmetros analisados nas águas do aquífero Jandaíra em Salina Cristal é apresentada nas **Tabelas 5.17** e **5.18**, para os períodos seco e úmido, respectivamente. No total, foram amostrados quatro poços no período seco e seis poços no período úmido, sendo que na análise estatística que se sucede apenas os quatro poços avaliados em ambos os períodos foram utilizados.

As águas do aquífero Jandaíra no período seco mostram-se bastante mineralizadas, com condutividade elétrica média de 13867,50 $\mu\text{S/cm}$. O pH médio dessas águas é 6,66, correspondente à águas com tendência a neutras. Todas as amostras são enquadradas na classe de águas muito duras, cuja dureza média foi de 4797,45 mg/L como CaCO₃.

Tabela 5.17 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=4), na área de Salina Cristal para o período seco.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
CE ($\mu\text{S/cm}$)	13867,50	4500,00	27100,00	11935,00	9776,41	70,50
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	5870,59	1732,96	11676,14	5036,64	4335,72	73,85
pH	6,66	6,54	6,87	6,62	0,15	2,27
Dureza (mg/L como CaCO ₃)	4797,45	1028,24	10626,49	3767,54	4190,73	87,35
Ca ²⁺ (mg/L)	967,25	226,00	2139,00	752,00	823,16	85,10
K ⁺ (mg/L)	29,78	21,10	35,50	31,25	6,88	23,11
Mg ²⁺ (mg/L)	575,75	134,00	1231,00	469,00	477,40	82,92
Na ⁺ (mg/L)	473,00	289,00	774,00	414,50	227,19	48,03
Cl ⁻ (mg/L)	3666,36	944,71	7557,65	3081,55	2856,17	77,90
SO ₄ ⁻ (mg/L)	43,25	7,80	92,80	36,20	39,31	90,89
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	136,49	97,60	186,05	131,15	36,97	27,09

Para o período úmido a condutividade elétrica das águas reflete a média de 10663,17 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A redução da magnitude das concentrações de sais, do período seco para o úmido, pode ser explicada genericamente pelo efeito da recarga, que promove a diluição das águas. A dureza das águas do aquífero Jandaíra no período úmido permanece elevada, com valor médio de 4397,40 mg/L, sendo todas as amostras enquadradas na classe de águas muito duras. Os valores de pH variam de 6,51 a 7,57, correspondentes a águas neutras a alcalinas, com resultados levemente superiores aos obtidos no período seco.

Tabela 5.18 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra (n=4), na área de Salina Cristal para o período úmido.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	11702,25	3780,00	22400,00	10314,50	7937,67	67,83
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	6492,26	1974,62	13105,22	5444,60	4807,73	74,05
pH	6,72	6,51	6,91	6,73	0,17	2,58
Dureza (mg/L como CaCO_3)	5087,98	1081,28	10987,34	4141,65	4224,88	83,04
Ca^{2+} (mg/L)	914,00	222,00	1863,00	785,50	687,77	75,25
K^+ (mg/L)	24,83	20,60	35,60	21,55	7,20	29,01
Mg^{2+} (mg/L)	537,25	128,00	1091,00	465,00	410,11	76,33
Na^+ (mg/L)	396,75	213,00	658,00	358,00	200,42	50,52
Cl^- (mg/L)	4141,35	1114,30	8725,30	3362,90	3286,84	79,37
SO_4^- (mg/L)	80,23	24,10	166,50	65,15	67,73	84,43
HCO_3^- (mg/L)	201,75	140,00	260,27	203,36	51,66	25,61

5.5.1.1 - Salinidade do aquífero Jandaíra em Salina Cristal

No presente trabalho, os valores da condutividade elétrica são usados como indicadores do grau de mineralização das águas subterrâneas.

No período seco (**Tabela 5.17**) condutividade elétrica das águas variou de 4500 (9-VBSC-01-RN) a 27100 (9-VBSC-03B-RN), com valor médio de 13867,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. No período úmido (**Tabela 5.18**) a elevada mineralização das águas do aquífero Jandaíra também é verificada, a condutividade elétrica das águas variou de 3780 (9-VBSC-01-RN) a 22400 (9-VBSC-03B-RN), refletindo uma média de 10663,17 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De maneira geral, a redução média da magnitude das concentrações de sais, do período seco para o úmido, pode ser explicada pelo efeito da diluição dessas águas no período de recarga.

Os resultados analíticos de todos os poços (**Figura 5.55**) em ambos os períodos amostrais apresentam valores elevados. O zoneamento da condutividade elétrica para o período seco e úmido (**Figura 5.56**) evidencia mapas com a mesma configuração espacial, onde se observa o aumento da salinidade dessas águas de sudeste para noroeste.

Conforme já foi discutido para a área de Canto do Amaro, os aspectos climáticos e geofisiográficos dessas duas áreas apresentam relação direta com a salinidade das águas subterrâneas.

O clima semiárido, com chuvas reduzidas e elevada evapotranspiração, propicia a precipitação de sais por evaporação, concentrada na camada superficial da zona não saturada. Considerando a existência das salinas no setor norte da área, essa ocorrência é maximizada. Os referidos sais foram coletados e analisados, e o resultado apontou a composição de halita (NaCl) com alguns traços de gipsita (CaSO₄) e silvita (KCl) (**Figura 5.12**). Durante os eventos de recarga, as águas das chuvas ao entrarem em contato com a zona não saturada são enriquecidas nesses sais e migram em direção a zona saturada, tornando as águas subterrâneas salinizadas.

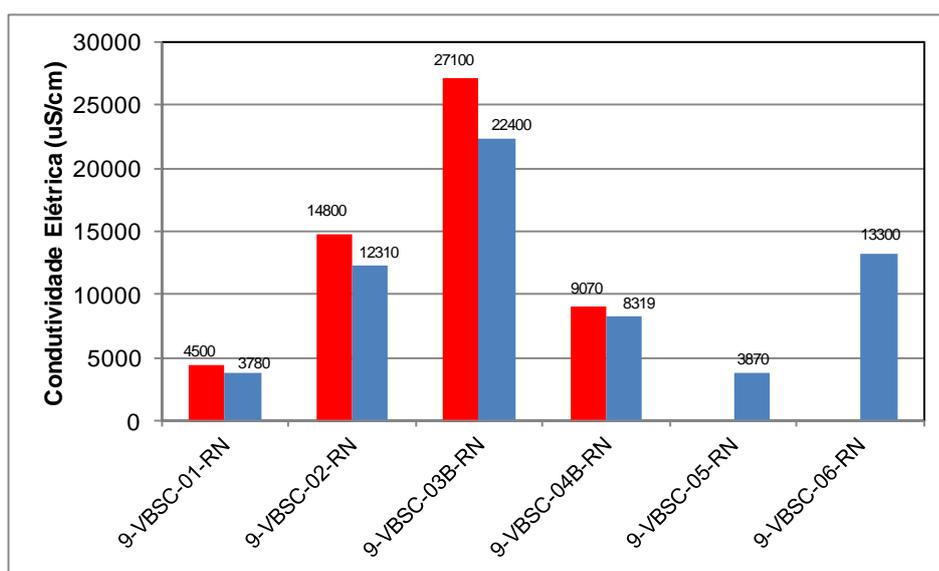


Figura 5.55 – Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) do aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A proximidade geográfica da área em relação à linha de costa também é um fator a ser considerado na origem da salinização das águas subterrâneas nesse setor. A provável ocorrência de intrusão marinha natural, notadamente ao longo dos vales fluviais como foi relatado para área de Canto do Amaro, pode estar ocorrendo também na área de Salina Cristal. A localização dos poços em relação à linha de costa pode ser visualizada na **Figura 5.57**.

Os gráficos apresentados na **Figura 5.58** evidenciam um claro aumento da condutividade elétrica das águas com a proximidade da linha de costa, em ambas as campanhas amostrais. Considerando que a exploração da água subterrâneas através de poços é insignificante na área, a intrusão marinha deve ocorrer por processos naturais. O processo de recarga e armazenamento regular de águas no aquífero Jandaíra é comprometido pelo condicionamento climático da área e, dessa forma, a frente de fluxo de água subterrânea não tem energia capaz de evitar o avanço da cunha salina em direção ao continente. Aliado aos processos supracitados tem-se a presença dos aerossóis marinhos e

sua concentração na água da chuva, que conta também com o incremento de sais provenientes das salinas. Os ventos que incidem na lâmina da água nos tanques de evaporação/precipitação das salinas provoca a formação de *sprays* que migram para as proximidades e nos eventos de chuvas – que constituem a recarga das águas subterrâneas – influenciam no aporte salino das águas subterrâneas.

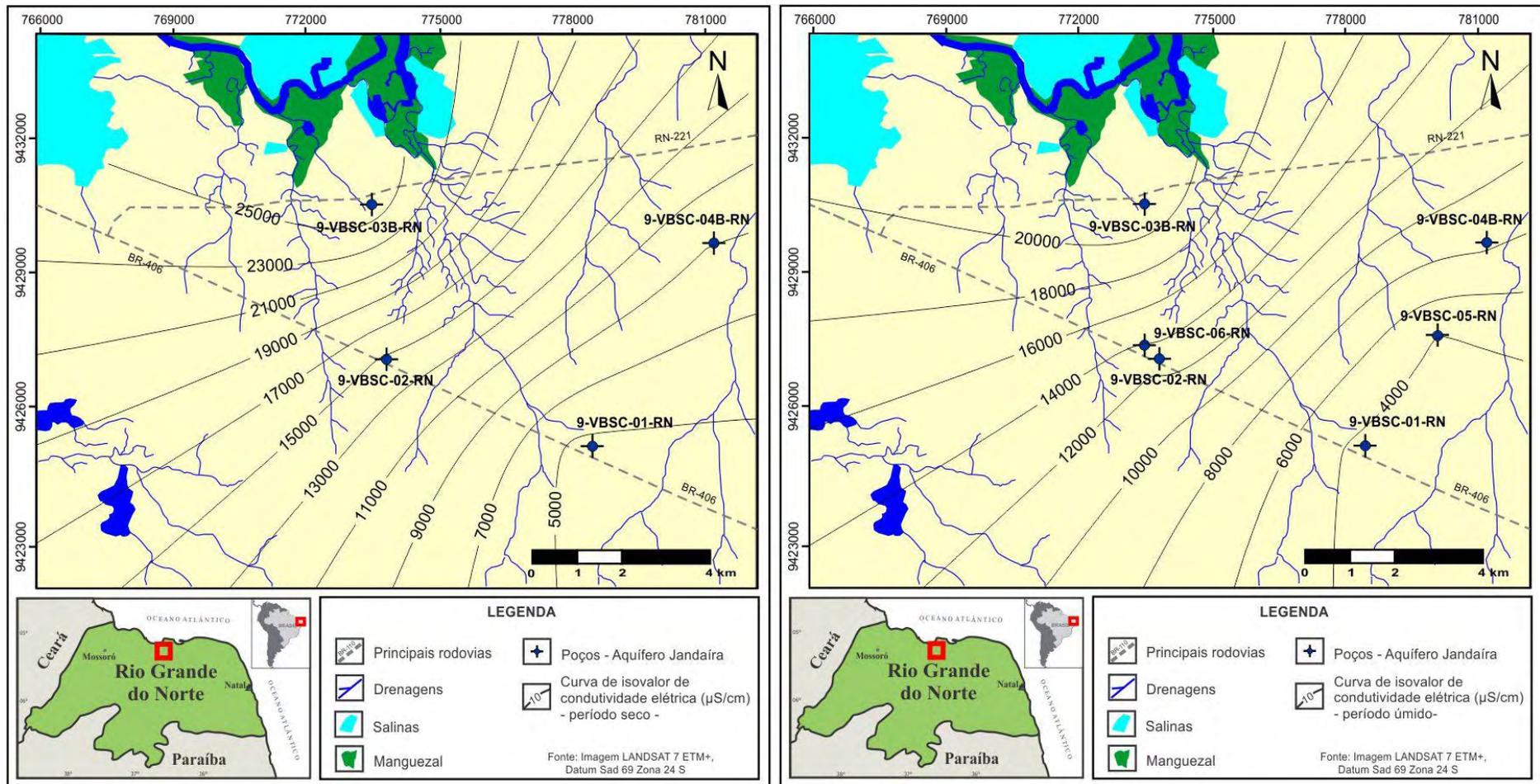


Figura 5.56- Zoneamento da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) ($n=4$); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) ($n=6$).

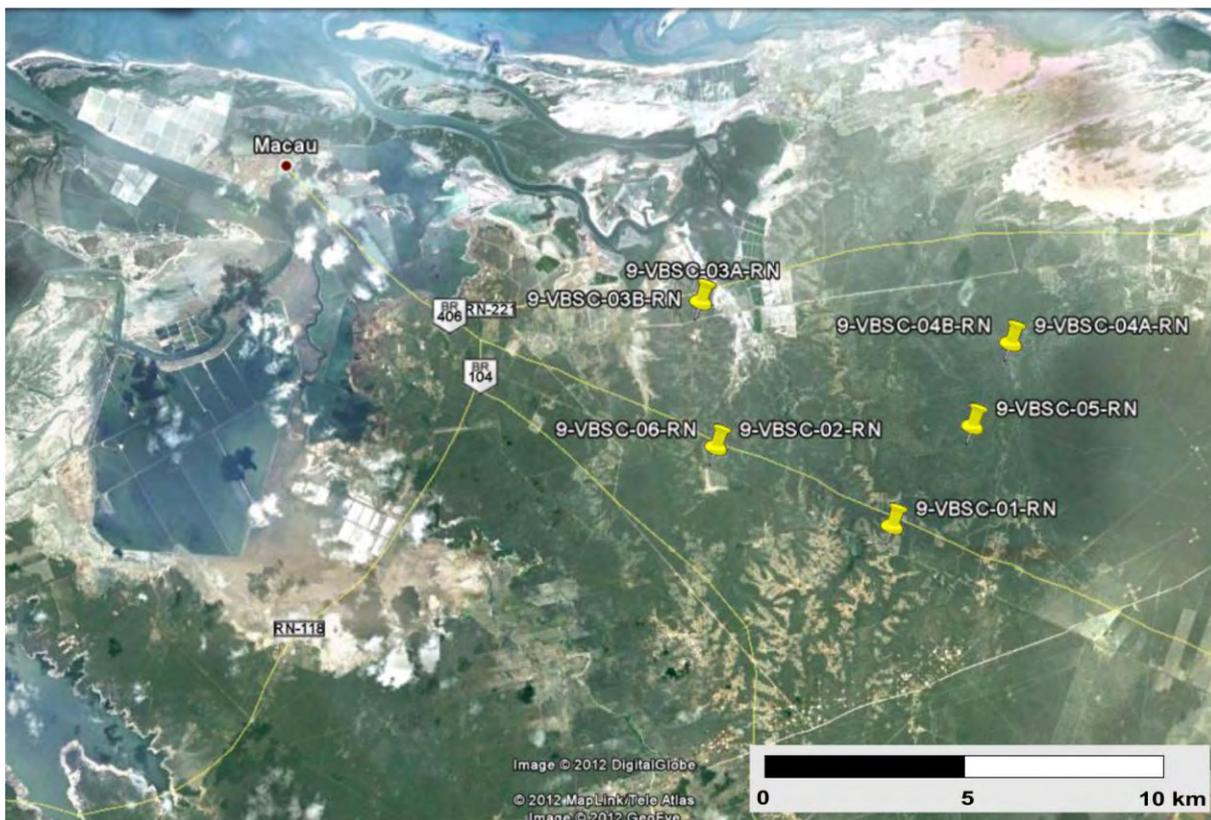


Figura 5.57 – Distribuição espacial dos poços na área de Salina Cristal, em relação a linha de costa. Base:Imagem Google Earth, julho 2012.

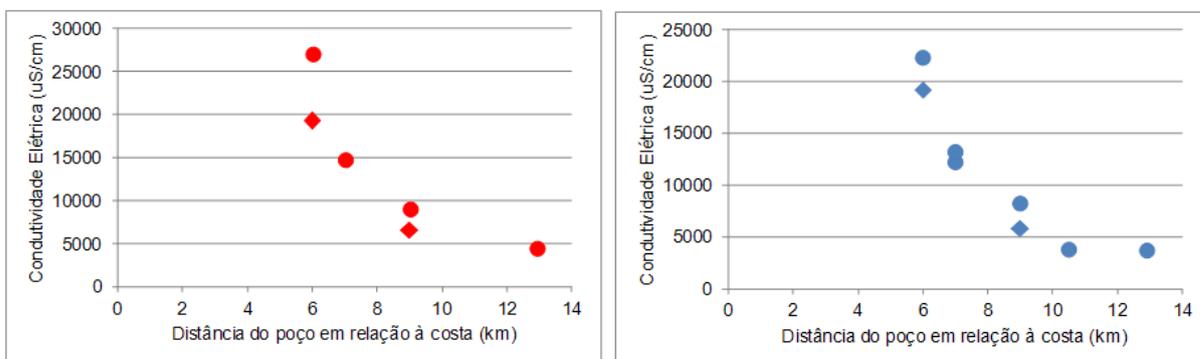


Figura 5.58– Evolução da condutividade elétrica em relação à distância da linha de costa. As séries em vermelho representam a amostragem do período seco, e as séries em azul a amostragem do período úmido. Os círculos correspondem aos poços do aquífero Jandaíra e os losangos os poços do aquífero Barreiras.

Considerando apenas o parâmetro condutividade elétrica e a partir da análise dos resultados analíticos individuais (**Figura 5.55**) e do mapa de zoneamento (**Figura 5.56**), pode-se afirmar que:

- Os poços 9-VBSC-02-RN, 9-VBSC-04B-RN e 9-VBSC-06-RN apresentam condutividade elétrica entre 8319 e 14800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (considerando ambas as etapas amostrais). A salinidade elevada dessas águas deve estar sendo controlada pela

concentração de sais a partir da zona não saturada e pela intrusão salina (fatores descritos anteriormente).

- O poço 9-VBSC-03B-RN apresenta 27100 e 22400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de condutividade elétrica no período seco e úmido, respectivamente. Esses resultados extremamente elevados apontam para a influência pontual das águas das salinas localizadas no setor norte da área.
- Os poços 9-VBSC-01-RN e 9-VBSC-05-RN, com condutividade elétrica inferior a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (considerando ambas as etapas amostrais), estão localizados mais distantes dos fatores que exercem influência na salinização. Portanto, o conteúdo salino dessas águas deve estar mais relacionado ao processo de interação água-rocha.

5.5.1.2 - Distribuição dos cátions no aquífero Jandaíra em Salina Cristal

➤ Cálcio

As concentrações de Ca^{2+} no período seco (**Tabela 5.17**) variam de 226 mg/L (9-VBSC-01-RN) a 2139 mg/L (9-VBSC-03B-RN), com média de 967,25 mg/L e mediana de 752 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 222 mg/L (VBSC-01-RN) até 1863 mg/L (9-VBSC-03B-RN), refletindo a média de 788,67 mg/L e mediana de 779,50 mg/L apresentada na **Tabela 5.18**.

Na **Figura 5.59** é apresentado o teor de Ca^{2+} para todos os poços amostrados em ambos os períodos. Não se observa uma tendência geral de aumento ou diminuição desse parâmetro em resposta ao efeito sazonal.

Na **Figura 5.60** está apresentada a distribuição espacial do Ca^{2+} no período seco e úmido, e em ambos os períodos observa-se um aumento das concentrações de sudeste para noroeste, destacando-se o poço 9-VBSC-03B-RN que apresenta valores superiores a 1800 mg/L. É provável que o teor do Ca^{2+} do aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal esteja influenciado por outros fatores, além da dissolução das rochas que compõem a unidade aquífera. A maioria dos poços, localizados na faixa noroeste apresentam valores elevados de Ca^{2+} cuja proveniência pode ser a intrusão marinha e/ou a concentração de sais existentes na superfície do terreno (no caso, a gipsita). Apenas os poços 9-VBSC-01-RN e 9-VBSC-05-RN, localizados no setor sudeste, apresentam teores de Ca^{2+} reduzidos, no caso inferiores a 245 mg/L, cuja concentração do elemento deve estar mais ligada a processos naturais de interação água-rocha.

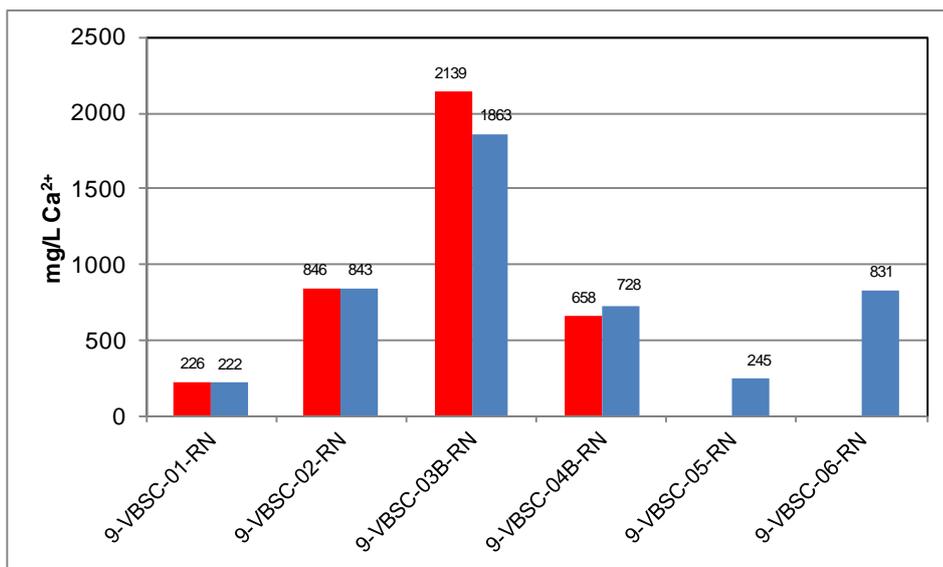


Figura 5.59 – Teor de Ca^{2+} no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

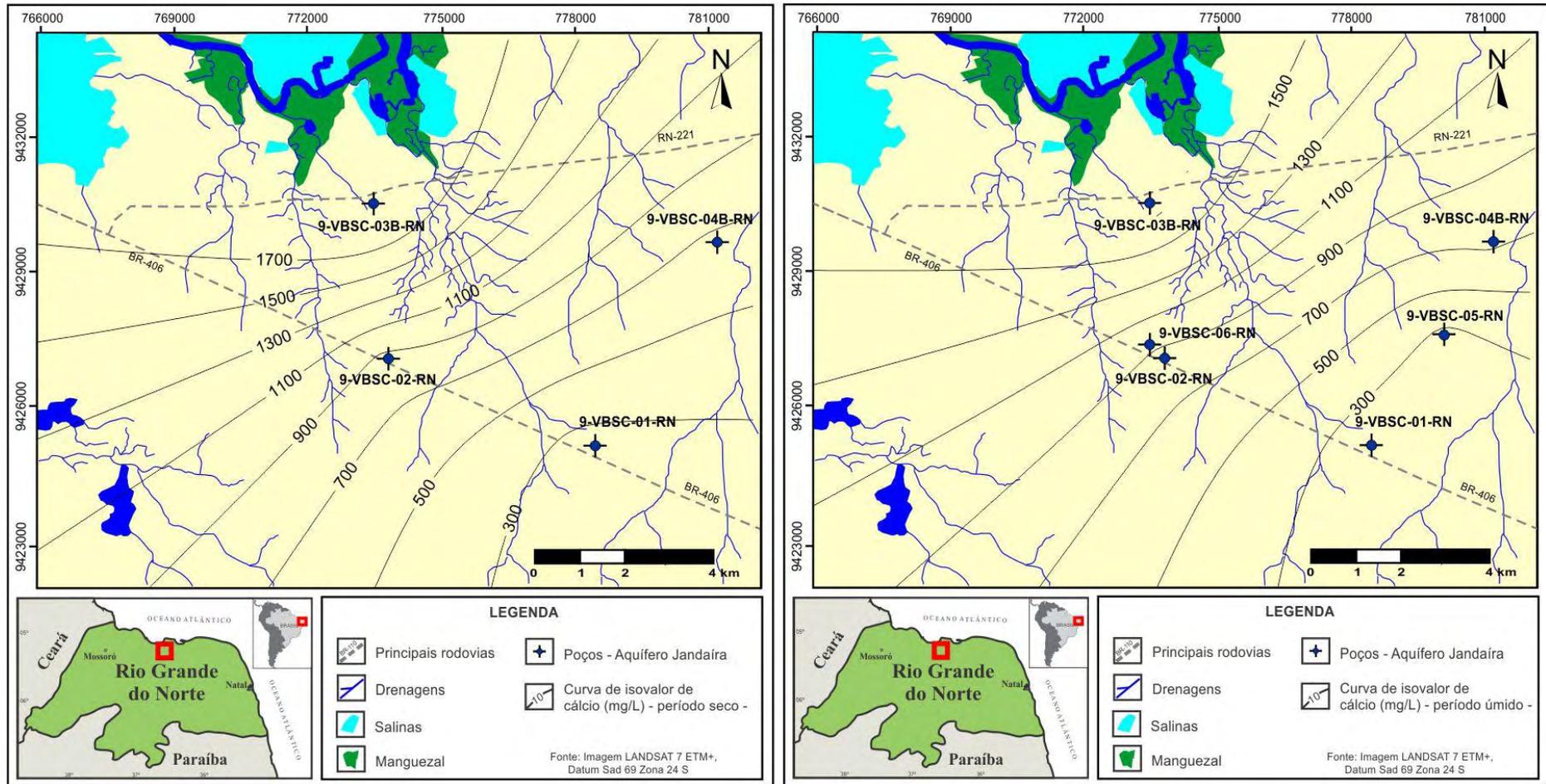


Figura 5.60 - Zoneamento do Ca^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

➤ Magnésio

Na amostragem representativa do período seco a concentração de Mg^{2+} variou de 134 mg/L (9-VBSC-01-RN) a 1231 mg/L (9-VBSC-03B-RN), com média de 575,75 mg/L e mediana de 469 mg/L (**Tabela 5.17**). Para o período úmido, esse parâmetro apresentou variação de 128 mg/L (9-VBSC-01-RN) até 1091 mg/L (9-VBSC-03B-RN), refletindo a média de 491,33 mg/L e mediana de 465 mg/L apresentada na **Tabela 5.18**.

Na **Figura 5.61** pode-se visualizar o teor de Mg^{2+} para cada amostra. A distribuição espacial desse parâmetro para os períodos amostrais consta na **Figura 5.62**. Os resultados de ambas as figuras apresentam semelhanças com as mesmas figuras elaboradas para o Ca^{2+} . De maneira geral, esse é um resultado esperado, já que a dissolução/precipitação do Mg^{2+} pode ocorrer juntamente com o Ca^{2+} através da dissociação de dolomita e calcita.

Para ambos os períodos amostrais observa-se um aumento das concentrações de Mg^{2+} de sudeste para noroeste. Apenas os poços 9-VBSC-01-RN e 9-VBSC-05-RN, localizados no setor sudeste, apresentam baixos teores de Mg^{2+} (inferiores a 164 mg/L). Esse cenário aponta para a predominância de processos naturais de interação água-rocha no meio aquífero, contrapondo com os demais resultados analíticos de poços obtidos, que apresentam teores bastante elevados de Mg^{2+} , e devem estar afetados pelo efeito da água marinha e das salinas.

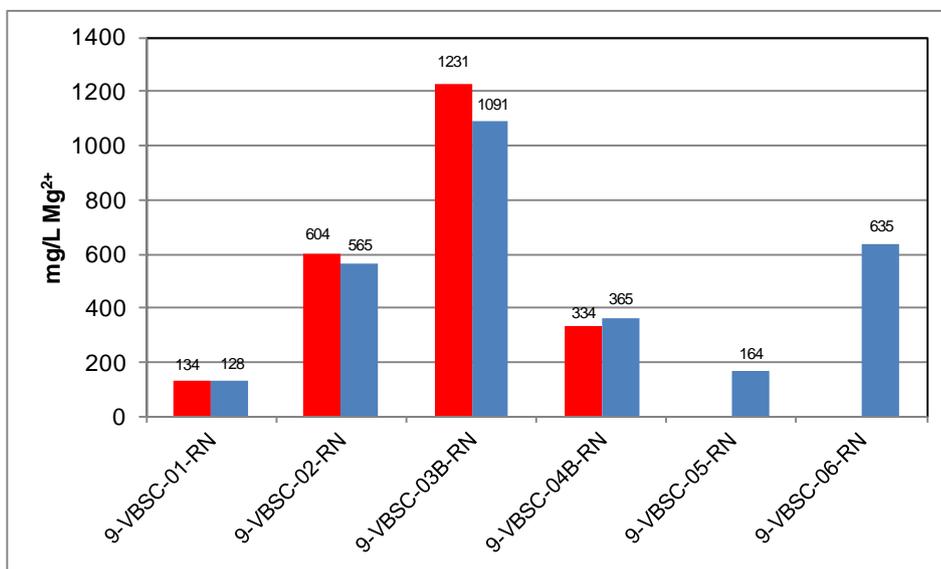


Figura 5.61 – Teor de Mg^{2+} no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

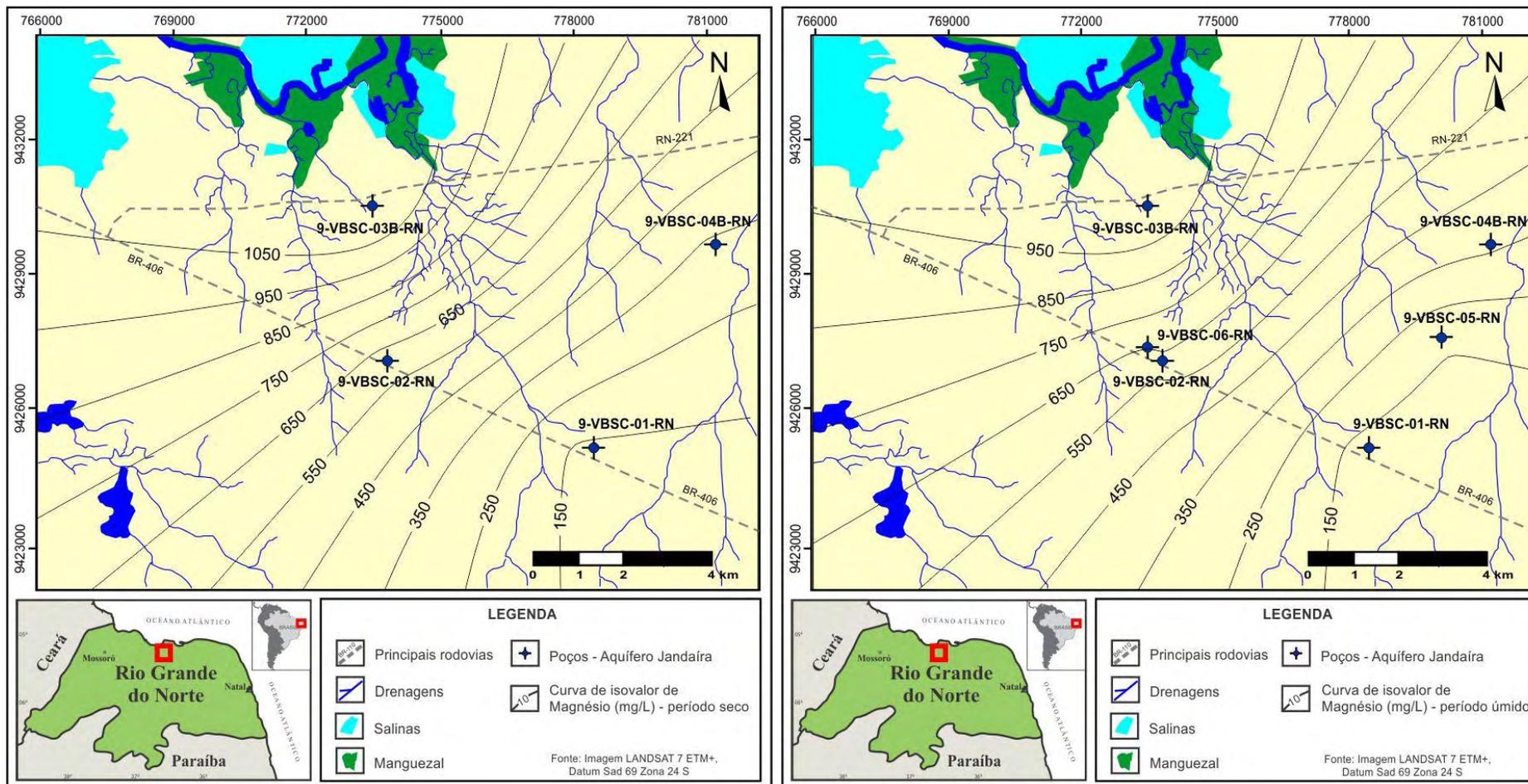


Figura 5.62 - Zoneamento do Mg^{2+} (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

➤ Sódio

As concentrações de Na^+ no período seco (**Tabela 5.17**) variam de 289 mg/L (9-VBSC-04B-RN) a 774 mg/L (9-VBSC-02-RN), com média de 473 mg/L e mediana de 414,5 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 213 mg/L (9-VBSCA-04B-RN) até 658 mg/L (9-VBSC-02-RN), refletindo a média de 413 mg/L e mediana de 358 mg/L apresentada na **Tabela 5.18**. Para todas as amostras analisadas, o teor de Na^+ (**Figura 5.63**) se manteve superior no período seco.

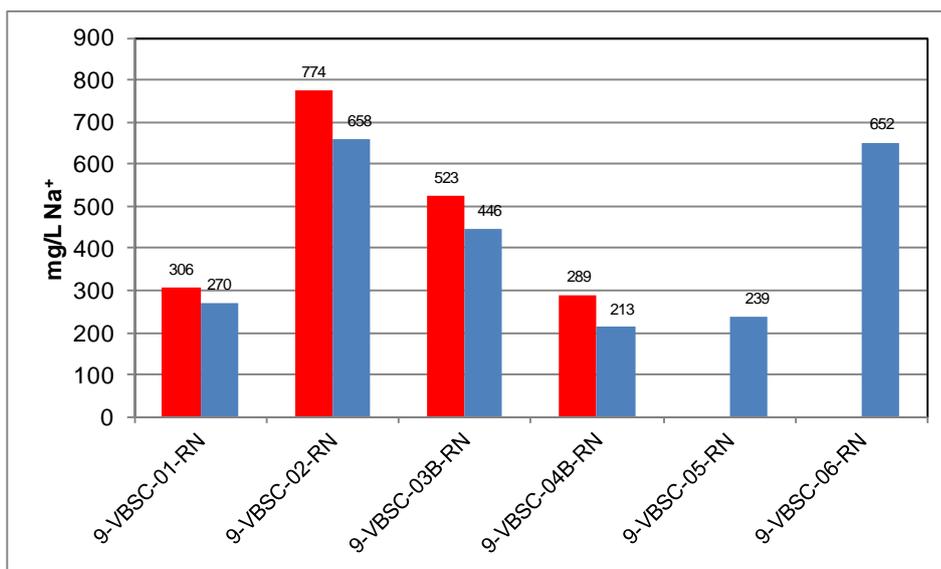


Figura 5.63 – Teor de Na^+ no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.64** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido. Em ambos os mapas, a concentração de Na^+ cresce de leste para oeste. Os poços 9-VBSC-02-RN, 9-VBSC-03B-RN e 9-VBSC-06-RN, localizados na faixa oeste, apresentam teores bastante elevados para esse parâmetro (superiores a 445 mg/L) e nesse caso grande parte da concentração de Na^+ nesses poços provem dos sais precipitados na zona não saturada, notadamente a halita. A influência da cunha salina também explica a maior concentração de Na^+ verificada no período seco, quando a redução da frente de escoamento do aquífero Jandaíra em direção ao mar, acarreta no avanço das águas marinhas em subsuperfície em direção ao continente. Os poços 9-VBSC-01-RN, 9-VBSC-04B-RN e 9-VBSC-05-RN apresentam inferiores a 306 mg/L de Na^+ (considerando ambos os períodos amostrais) e pela sua localização geográfica, pode-se afirmar que são menos afetados pelos fatores potencializadores da salinização.

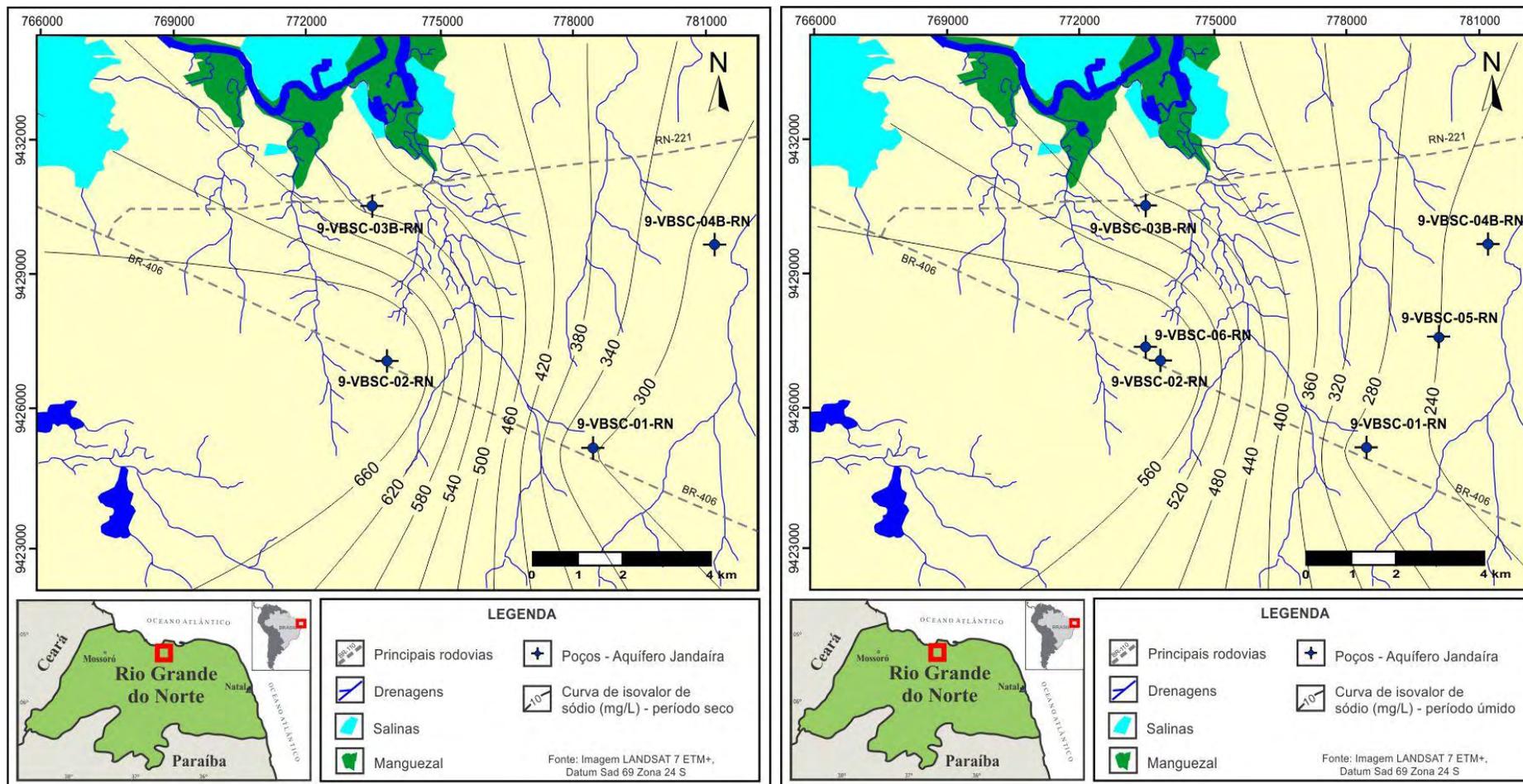


Figura 5.64- Zoneamento do Na^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

➤ Potássio

As concentrações de K^+ no período seco (**Tabela 5.17**) variam de 21,1 mg/L (9-VBSC-01-RN) a 35,5 mg/L (9-VBSC-03B-RN), com média de 29,78 mg/L e mediana de 31,25 mg/L. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 20,6 mg/L (9-VBSC-04B-RN) até 35,6 mg/L (9-VBSC-02-RN), refletindo a média de 25,12 mg/L e mediana de 21,7 mg/L apresentada na **Tabela 5.18**.

Na **Figura 5.65** pode-se verificar os resultados analíticos das amostras individualmente e na **Figura 5.66** a distribuição espacial de K^+ no aquífero Jandaíra em Salina Cristal. Para ambos os períodos amostrais os poços da faixa oeste apresentam resultados analíticos superiores aos obtidos nos poços da faixa leste. A origem dos resultados elevados de do K^+ nessas águas deve ser a silvita encontrada em precipitados na zona não saturada. Ainda, sob o efeito da intrusão marinha as águas subterrâneas também tendem a aumentar a concentração de K^+ , conforme se verifica nos poços 9-VBSC-02-RN, 9-VBSC-03B-RN e 9-VBSC-06-RN, que apresentam resultados analíticos elevados para esse parâmetro.

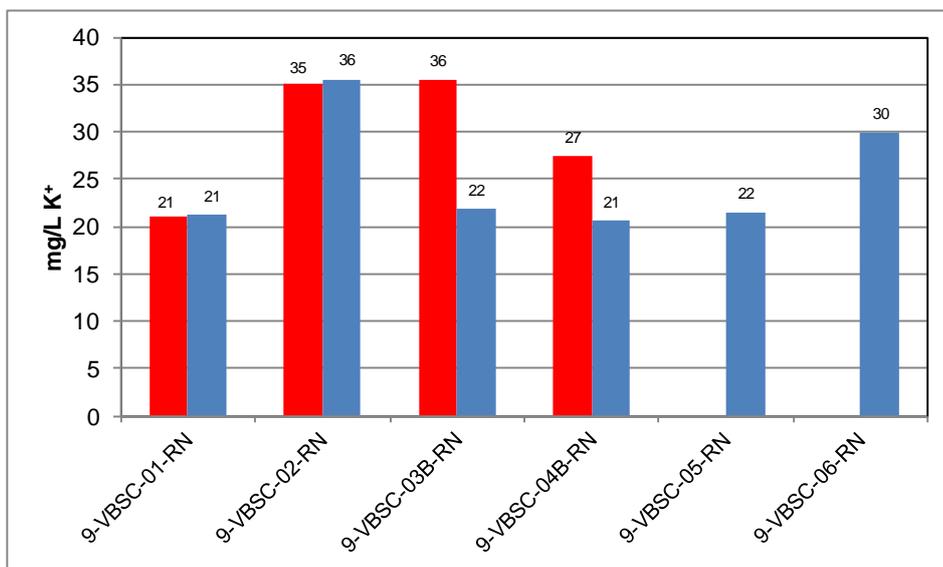


Figura 5.65 – Teor de K^+ no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

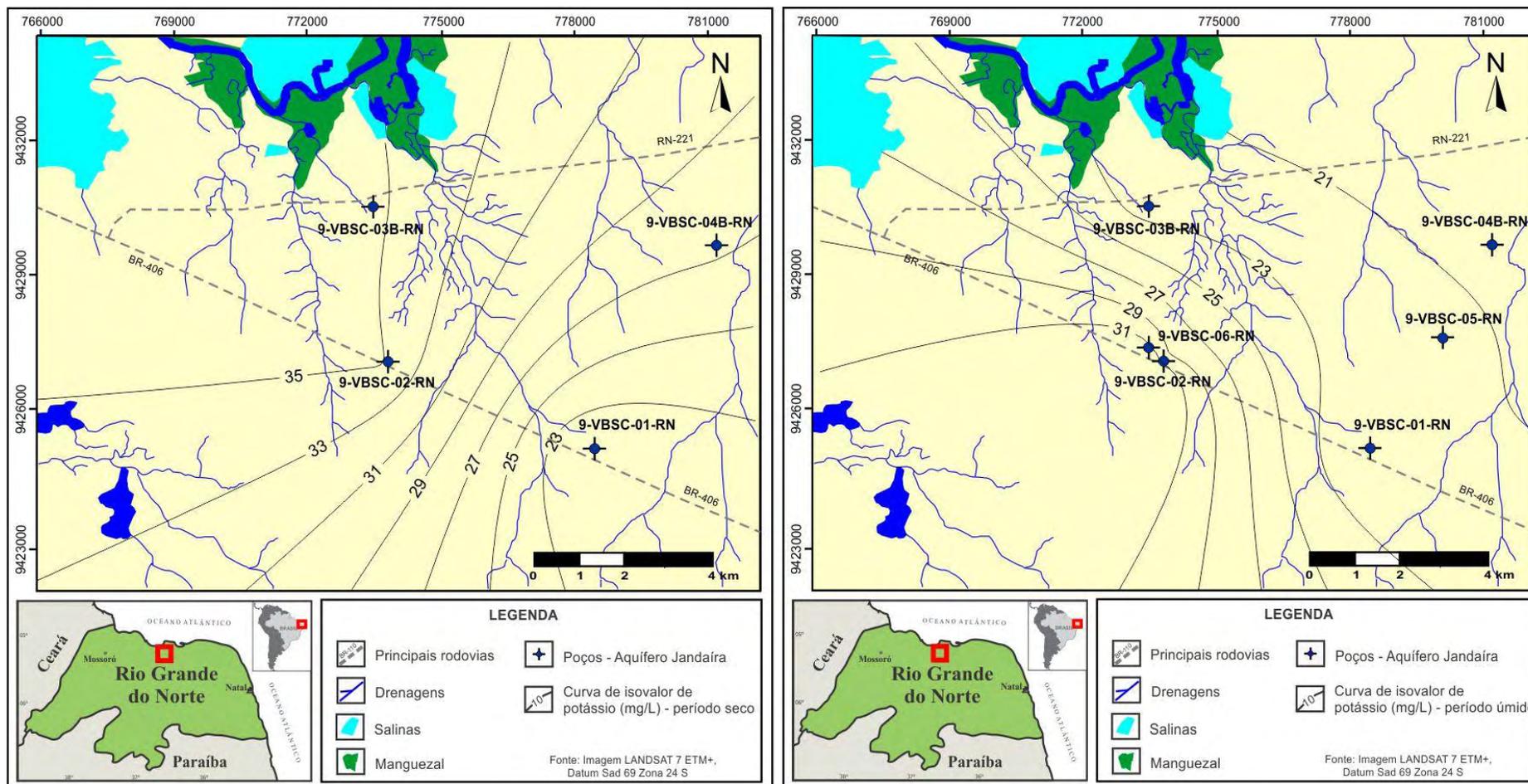


Figura 5.66 - Zoneamento do K^+ (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

5.5.1.3 – Distribuição dos ânions no aquífero Jandaíra em Salina Cristal

➤ Cloreto

Na amostragem representativa do período seco a concentração de Cl^- variou de 944,7 mg/L (9-VBSC-01-RN) a 7557,6 mg/L (9-VBSC-03B-RN), com média de 3666,3 mg/L e mediana de 3081,55 mg/L (**Tabela 5.17**). Para o período úmido, esse parâmetro apresentou variação de 1114,3 mg/L (9-VBSC-01-RN) até 8725,3 mg/L (9-VBSC-03B-RN), refletindo a média de 3664,5 mg/L e mediana de 3362,9 mg/L apresentada na **Tabela 5.18**. A partir da análise dos resultados estatísticos e dos dados individuais apresentados na **Figura 5.67**, conclui-se que houve um aumento na concentração de Cl^- no período úmido.

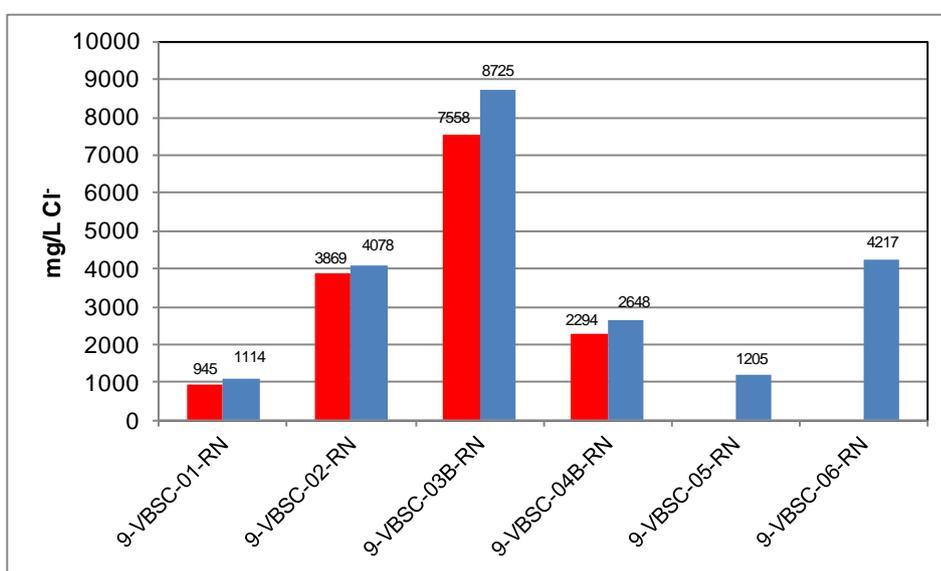


Figura 5.67 – Teor de Cl^- no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.68** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido, e em ambos os casos a concentração de Cl^- cresce de sudeste para noroeste, com valores individuais sempre mais elevados obtidos na amostragem representativa do período úmido.

Naturalmente a origem do Cl^- nas águas subterrâneas do aquífero Jandaíra decorre da sua concentração na água de chuva potencializada pela influência do aerossol marinho, característico dessa zona costeira. Adicionalmente, a lixiviação dos sais (halita e silvita) presentes na zona insaturada no domínio semiárido incrementa a sua concentração nas águas subterrâneas durante o período chuvoso, explicando o seu teor mais elevado nesse período.

A alta solubilidade desse parâmetro e sua característica de íon conservativo fazem com que naturalmente a sua concentração se torne crescente ao longo do fluxo subterrâneo.

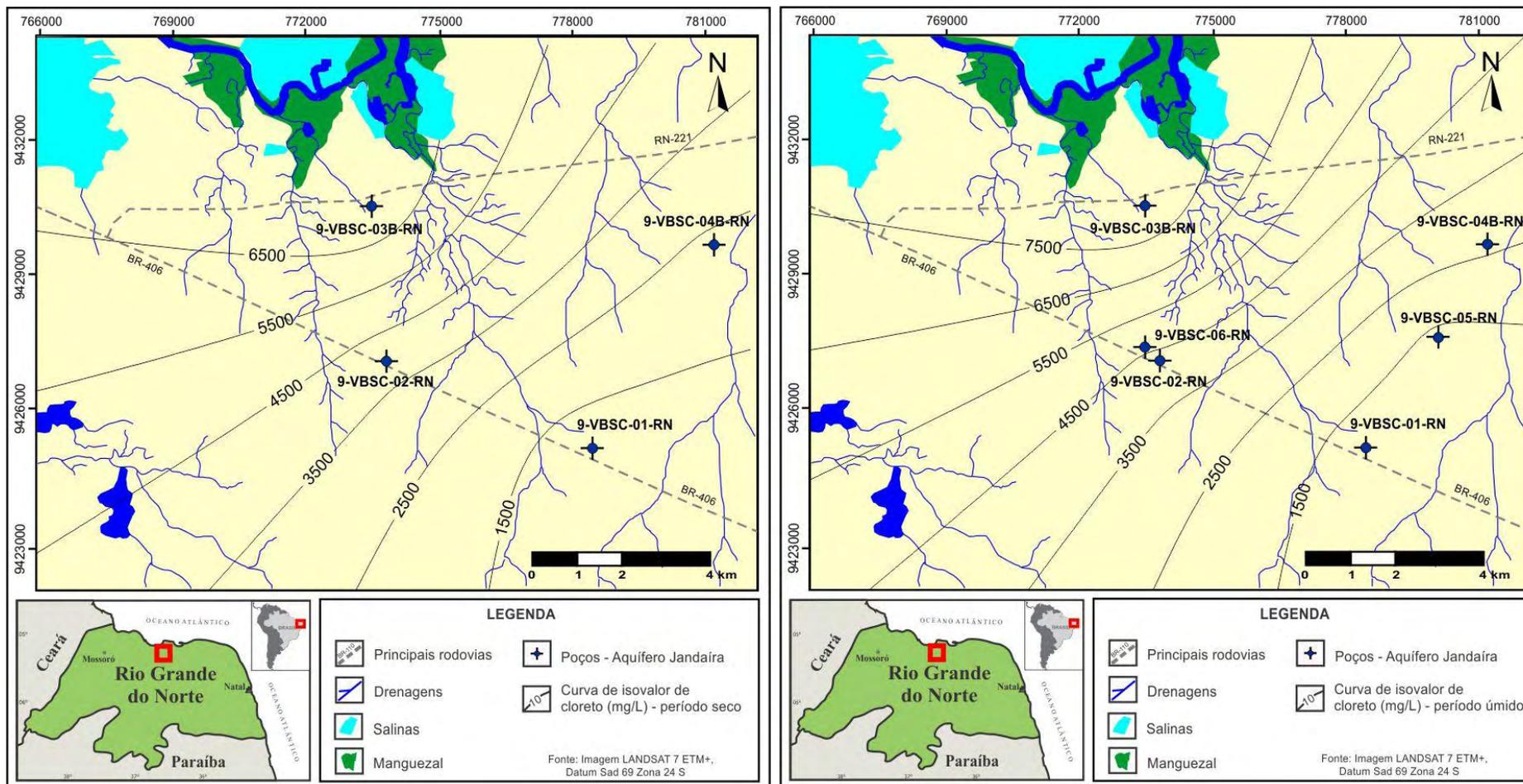


Figura 5.68 - Zoneamento do Cl^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

➤ Bicarbonato

As concentrações de HCO_3^- no período seco (**Tabela 5.17**) variam de 97,6 mg/L (9-VBSC-03B-RN) a 186,05 mg/L (9-VBSC-01-RN), refletindo uma média e mediana de 136,49 e 131,15 mg/L, respectivamente. Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 140,00 mg/L (9-VBSC-03B-RN) até 260,27 mg/L (9-VBSC-01-RN), com média de 201,75 mg/L e mediana de 203,36 mg/L, apresentadas na **Tabela 5.18**.

A concentração de HCO_3^- no aquífero Jandaíra é significativamente maior no período úmido (**Figura 5.69**). Essa relação não foi observada para os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} evidenciando que grande parte do HCO_3^- nas águas subterrâneas do aquífero Jandaíra em Salina Cristal não tem sua origem restrita à dissolução da calcita/dolomita no meio aquífero, tendo outras fontes como a dissolução do CO_2 atmosférico e a decomposição da matéria orgânica presente na zona insaturada que atinge o meio saturado notadamente no período das chuvas.

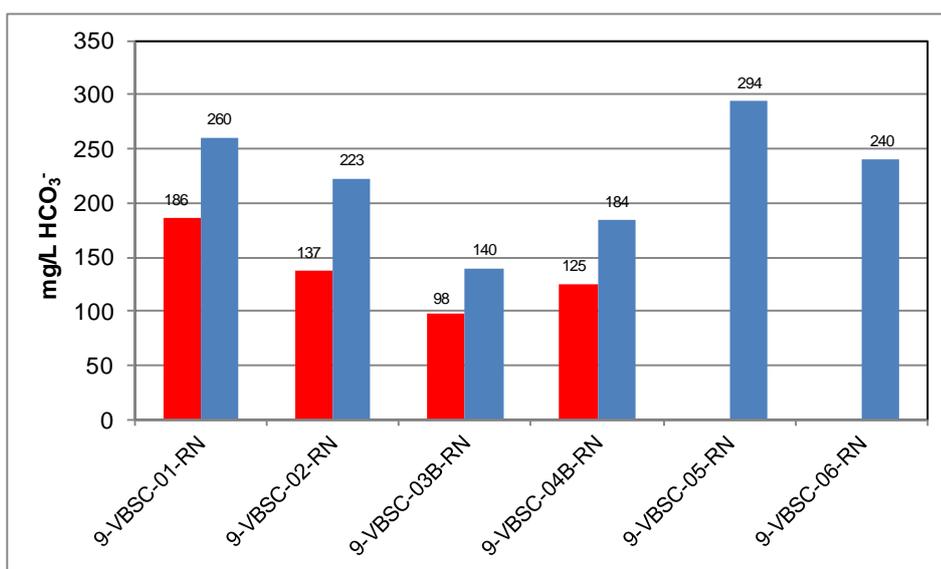


Figura 5.69 – Teor de HCO_3^- no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

A **Figura 5.70** ilustra a distribuição desse parâmetro no período seco e úmido. Em ambos os mapas se verifica um decréscimo na concentração de HCO_3^- de sudeste para noroeste. Os setores de maior concentração de HCO_3^- coincidem com os setores mais distantes da linha de costa, onde os processos de salinização não incidem de forma acentuada.

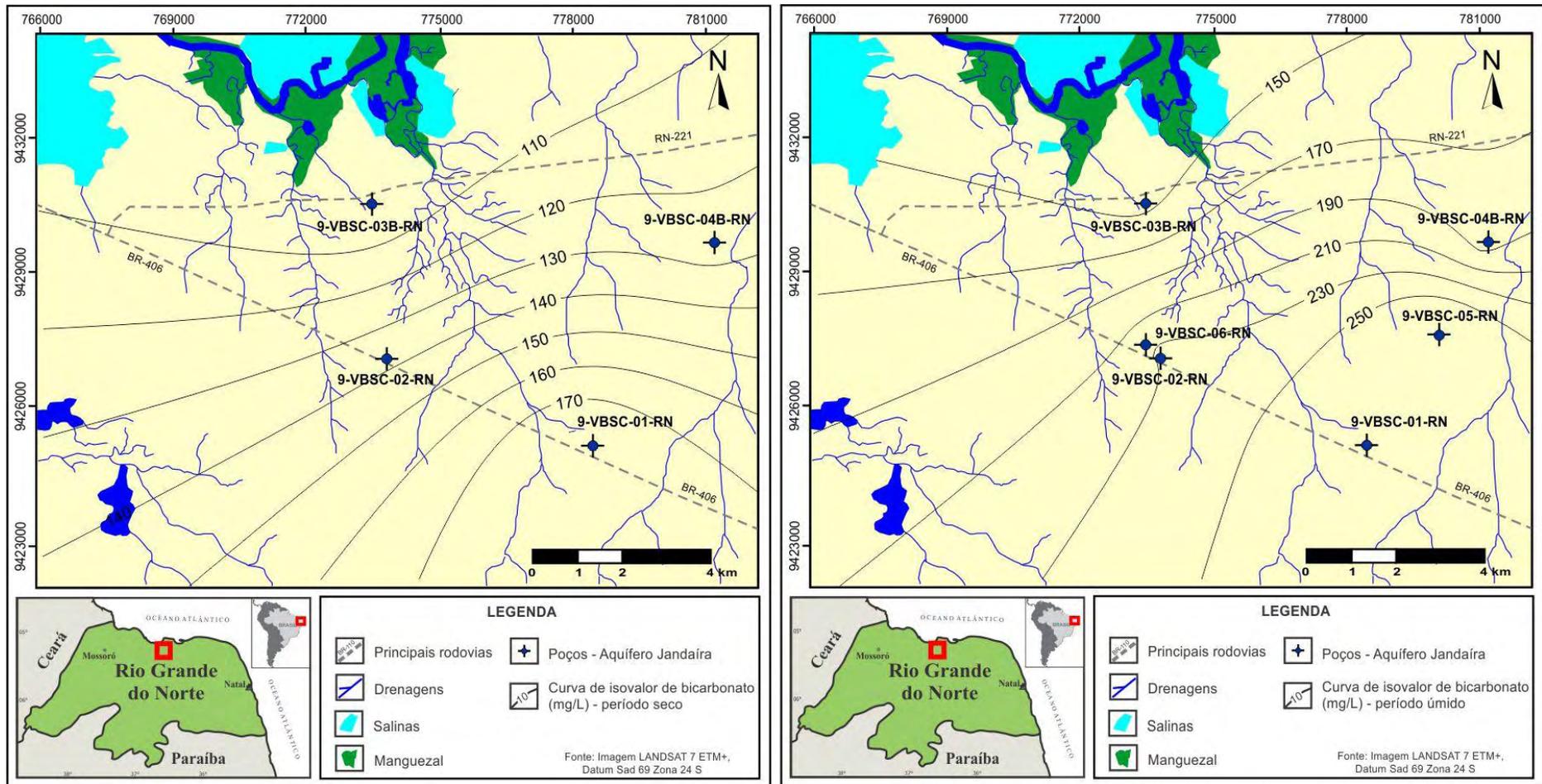


Figura 5.70 - Zoneamento do HCO_3^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

➤ Sulfato

Na amostragem representativa do período seco a concentração de SO_4^- variou de 7,80 mg/L (9-VBSC-01-RN) a 92,8 mg/L (9-VBSCA-02-RN), com média de 43,25 mg/L e mediana de 36,20 mg/L (**Tabela 5.17**). Para o período úmido, esse parâmetro apresenta variação de 24,10 mg/L (9-VBSC-01-RN) até 166,50 mg/L (9-VBSCA-02-RN), refletindo a média de 80,23 mg/L e mediana de 65,15 mg/L apresentada na **Tabela 5.18**.

A **Figura 5.71** apresenta os resultados analíticos obtidos para cada poço e na **Figura 5.72** a distribuição de SO_4^- no período seco e úmido. Em todos os casos a concentração de SO_4^- é superior no período úmido, provavelmente devido a presença de sais de gipsita na zona não saturada que atinge a zona saturada durante os eventos de recarga. O zoneamento desse parâmetro evidencia que, para ambos os períodos amostrais, os poços mais próximos dos setores potencialmente influenciados pela intrusão marinha e o efeito antrópico das salinas apresentam teores mais elevados de SO_4^- , conforme o esperado.

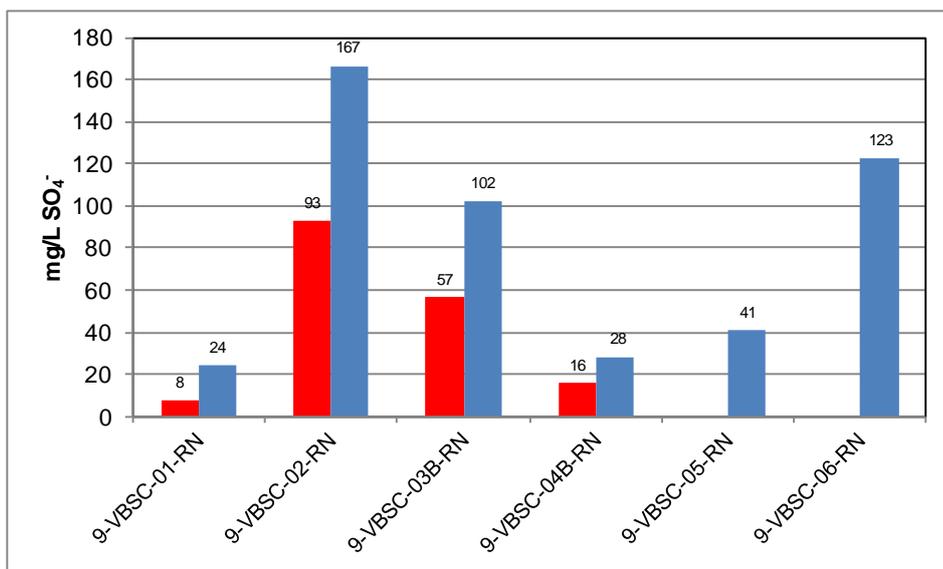


Figura 5.71 – Teor de SO_4^- no aquífero Jandaíra em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

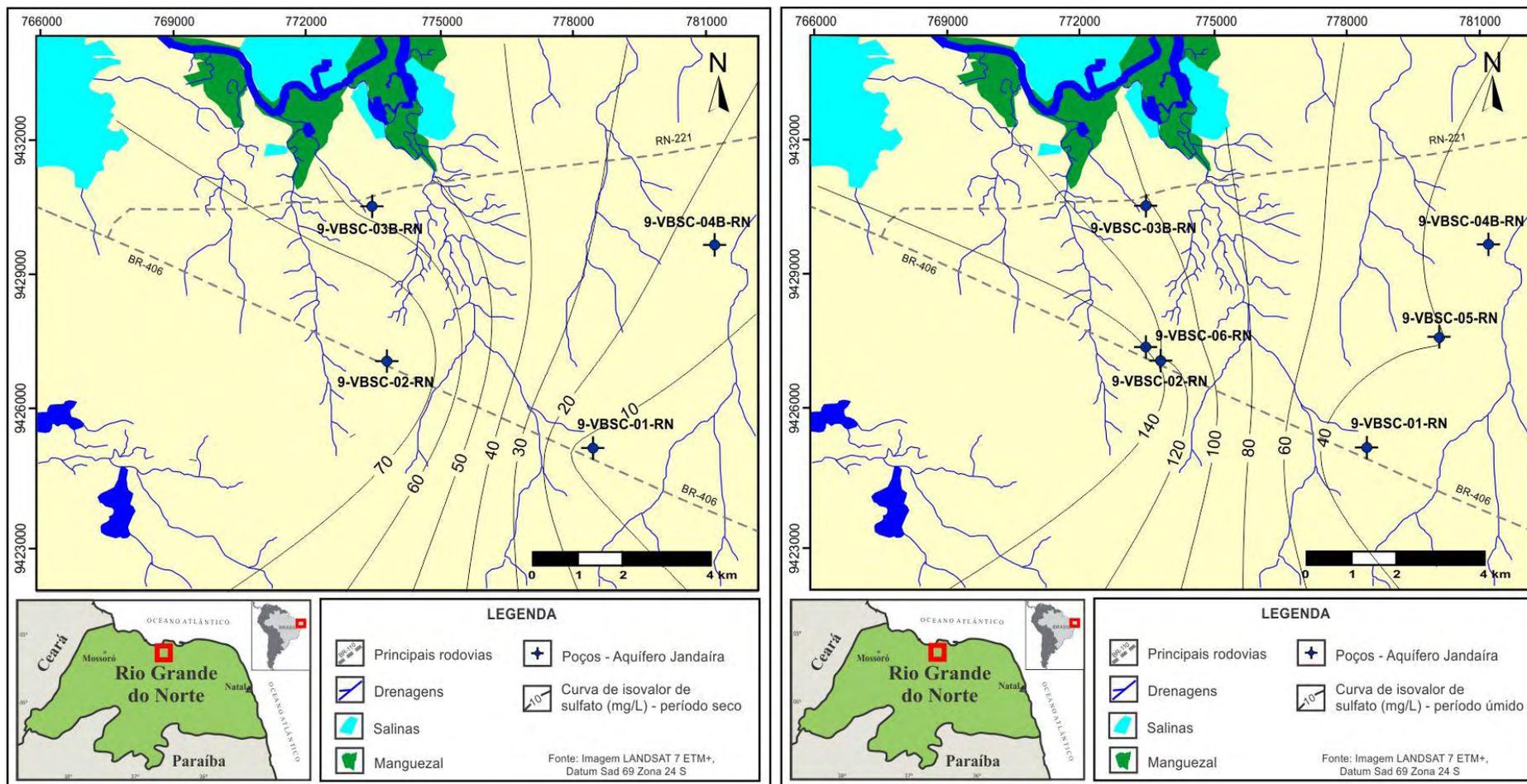


Figura 5.72 - Zoneamento do SO_4^- (mg/L) no aquífero Jandaíra na área de Salina Cristal. Mapa da esquerda representa os dados obtidos da amostragem no período seco (janeiro de 2007) (n=4); e mapa da direita a amostragem realizada no período úmido (julho de 2007) (n=6).

5.5.2. Aquífero Barreiras

Devido à descontinuidade lateral dessa unidade aquífera, discutida no Capítulo 4 (Hidrogeologia), apenas dois poços foram perfurados na área de Salina Cristal captando o aquífero Barreiras, os quais: 9-VBSC-03A-RN e 9-VBSC-04A-R168N (Figura 5.6). A estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos avaliados no aquífero Barreiras nessa área, representativa dos períodos seco e úmido, está apresentada nas Tabelas 5.19 e 5.20, respectivamente.

Tabela 5.19 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Salina Cristal para o período seco.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	12935,00	6570,00	19300,00	12935,00	9001,47	69,59
pH	7,17	6,89	7,44	7,17	0,39	5,43
Dureza (mg/L como CaCO_3)	4340,23	1655,54	7024,92	4340,23	3796,73	87,48
Ca^{2+} (mg/L)	939,50	361,00	1518,00	939,50	818,12	87,08
K^+ (mg/L)	38,40	37,90	38,90	38,40	0,71	1,84
Mg^{2+} (mg/L)	484,05	182,00	786,10	484,05	427,16	88,25
Na^+ (mg/L)	476,50	453,00	500,00	476,50	33,23	6,97
Cl^- (mg/L)	3306,48	1574,52	5038,44	3306,48	2449,36	74,08
SO_4^- (mg/L)	39,15	17,90	60,40	39,15	30,05	76,76
HCO_3^- (mg/L)	93,03	36,60	149,45	93,03	79,80	85,78

Tabela 5.20 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Barreiras (n=2), na área de Salina Cristal para o período úmido.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	12502,50	5805,00	19200,00	12502,50	9471,70	75,76
pH	7,29	7,13	7,45	7,29	0,23	3,10
Dureza (mg/L como CaCO_3)	5240,89	1670,32	8811,46	5240,89	5049,55	96,35
Ca^{2+} (mg/L)	1136,50	355,00	1918,00	1136,50	1105,21	97,25
K^+ (mg/L)	30,05	23,20	36,90	30,05	9,69	32,24
Mg^{2+} (mg/L)	600,50	181,00	1020,00	600,50	593,26	98,79
Na^+ (mg/L)	514,50	446,00	583,00	514,50	96,87	18,83
Cl^- (mg/L)	4571,43	1765,25	7377,60	4571,43	3968,53	86,81
SO_4^- (mg/L)	48,58	31,65	65,50	48,58	23,94	49,28
HCO_3^- (mg/L)	175,12	127,86	222,39	175,12	66,84	38,17

Por se tratar de um número reduzido de amostras e, principalmente, por apresentarem características distintas entre si, não será realizada a abordagem dos resultados estatísticos, e sim a análise dos dados analíticos individualizados. As referidas características distintas dizem respeito à localização geográfica de cada um dos poços, que

se reflete em resultados analíticos bastante heterogêneos entre as amostras dos dois poços (9-VBSC-03A-RN vs. 9-VBSC-04A-RN), independente da etapa amostral.

Ainda, para cada poço perfurado no aquífero Barreiras foi executado um poço vizinho captando o aquífero Jandaíra. Portanto, é possível tecer comentários e comparações acerca da hidrogeoquímica de cada unidade hidrogeológica. A correlação hidrogeológica entre os pares de poços pode ser visualizada nas **Figuras 4.17 e 4.18 (Capítulo 4)**.

5.5.2.1 - Salinidade do aquífero Barreiras em Salina Cristal

Na **Figura 5.73** pode-se visualizar os valores de condutividade elétrica das águas para os dois poços no aquífero Barreiras em Salina Cristal, em ambos os períodos amostrais. Embora não ocorra de forma significativa, observa-se uma redução no teor de sais no período úmido, em ambas as amostras. Essa tendência já havia sido observada para o aquífero Jandaíra nessa área de estudo.

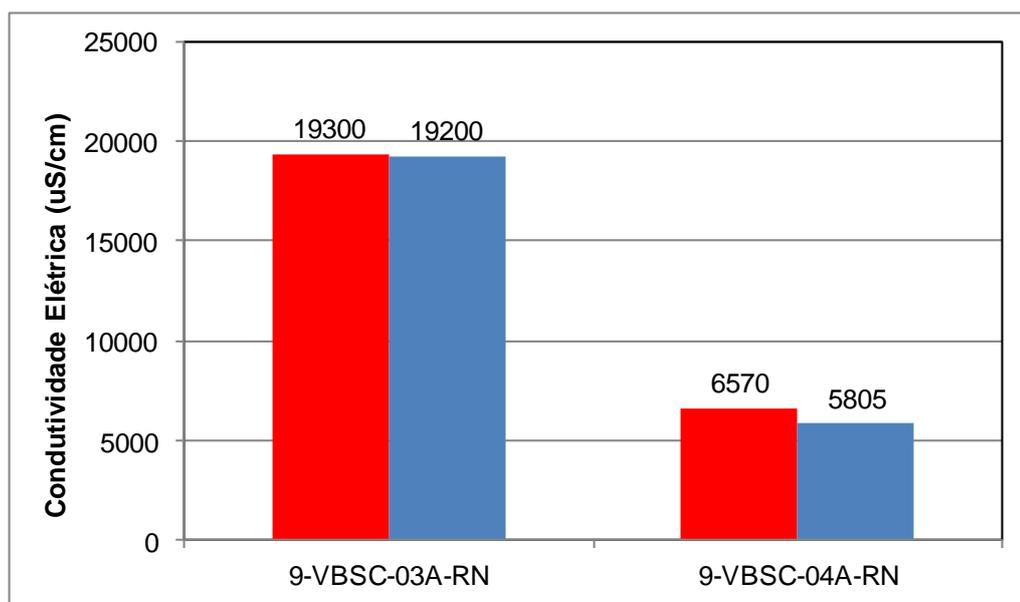


Figura 5.73 – Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Barreiras em Salina Cristal, nos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

O poço 9-VBSC-03A-RN está localizado no setor norte da área, onde os efeitos causados pela proximidade da linha de costa, presença das salinas e precipitação de sais na zona insaturada incidem com maior intensidade, aumentando a salinidade das águas subterrâneas.

Conforme abordado anteriormente, os poços no aquífero Jandaíra localizados nesse setor também são fortemente influenciados por esses fatores. Esse é o caso do poço 9-VBSC-03B-RN (aquífero Jandaíra) perfurado a poucos metros do poço 9-VBSC-03A-RN

(aquífero Barreiras) (**Figura 4.18**). Ambos os poços apresentam salinidade elevada, entretanto é superior no poço VBSC-03B-RN (27100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e 22400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período úmido) quando comparado ao poço 9-VBSC-03A-RN (19300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e 19200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período úmido). Nesse caso, é provável que além dos fatores supracitados, ocorra a dissolução dos minerais do aquífero carbonático, que são adicionados às águas aumentando sua salinidade. Ainda, a permeabilidade da Formação Barreiras propicia a percolação desses sais em subsuperfície com acumulação nos condutos cársticos da Formação Jandaíra.

O mesmo ocorre com o par de poços 9-VBSC-04B-RN (aquífero Jandaíra; 9070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e 8319 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período úmido) perfurado a poucos metros do poço 9-VBSC-04-A-RN (aquífero Barreiras; 6570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e 5805 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período úmido) (**Figura 4.6**). Isto é, a salinidade das águas é superior no aquífero Jandaíra quando comparada ao aquífero Barreiras. Ressalta-se que nesse caso, ambos os poços estão localizados mais distantes dos fatores que contribuem para o aumento da salinidade das águas, o que se verifica pelos resultados bastante inferiores de condutividade elétrica, quando comparado ao par de poços 9-VBSC-03A-RN e 9-VBSC-03B-RN discutidos anteriormente.

5.5.2.2 - Cátions no aquífero Barreiras em Salina Cristal

Os gráficos da **Figura 5.74** ilustram os resultados analíticos dos cátions presentes no aquífero Barreiras na área de Salina Cristal.

➤ Cálcio e Magnésio

A maior proximidade com a linha de costa faz com que a concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} sejam superiores no poço 9-VBSC-03A-RN, quando comparado ao poço 9-VBSC-04A-RN.

O Ca^{2+} no poço 9-VBSC-03A-RN variou de 1518 mg/L no período seco a 1918 mg/L no período úmido. Para o Mg^{2+} observa-se uma variação de 786 mg/L no período seco a 1020 mg/L no período úmido. Em ambos os poços, a concentração desses parâmetros é superior no período das chuvas, provavelmente por influência dos sais que são lixiviados até a zona saturada durante as épocas de recarga.

O poço vizinho 9-VBSC-03B-RN perfurado no aquífero Jandaíra apresenta teores ainda mais elevados para esses dois parâmetros, comprovando que a dissolução do Ca^{2+} e do Mg^{2+} no meio aquífero contribui fortemente para o enriquecimento iônico dessas águas. Essa afirmação é corroborada pelos resultados analíticos obtidos para o poço 9-VBSC-04B-

RN (aquífero Jandaíra) comparados ao poço 9-VBSC-04A-RN (aquífero Barreiras) que também apresenta maiores concentrações desses cátions.

➤ **Sódio**

Ainda que a concentração do Na^+ seja mais elevada no poço 9-VBSC-03A-RN que no poço 9-VBSC-04A-RN, essa diferença não é tão acentuada quanto à observada para os parâmetros do Ca^{2+} e do Mg^{2+} . Nesse caso, além da influência da intrusão marinha natural que incide com maior intensidade no poço 9-VBSC-03A-RN dado a sua maior proximidade com a linha de costa, a presença de Na^+ elevado no poço 9-VBSC-04A-RN deve ter outra origem. Parte da concentração de Na^+ solúvel pode ter origem nos sais precipitados na zona não saturada, notadamente a halita. O aerossol marinho propicia depósitos de cloreto de sódio nos longos períodos de estiagem. Após as primeiras chuvas todos estes sais depositados, tanto nos solos como nas coberturas vegetais, são transportados em solução para os aquíferos.

➤ **Potássio**

O K^+ nos dois poços do aquífero Barreiras apresentam teores semelhantes, e quando comparados ao seu respectivo par de poço no aquífero Jandaíra também se observa essa tendência, isto é, para ambas unidades aquíferas a concentração desse elemento é parecida. A mobilidade do K^+ em solução aquosa é limitada devido à capacidade de retenção nos solos e nos produtos litológicos de alteração secundária (como as argilas). A origem do K^+ nessas águas pode ser a silvita encontrada em precipitados na zona não saturada, que atingem a zona saturada nos eventos de precipitação pluviométrica.

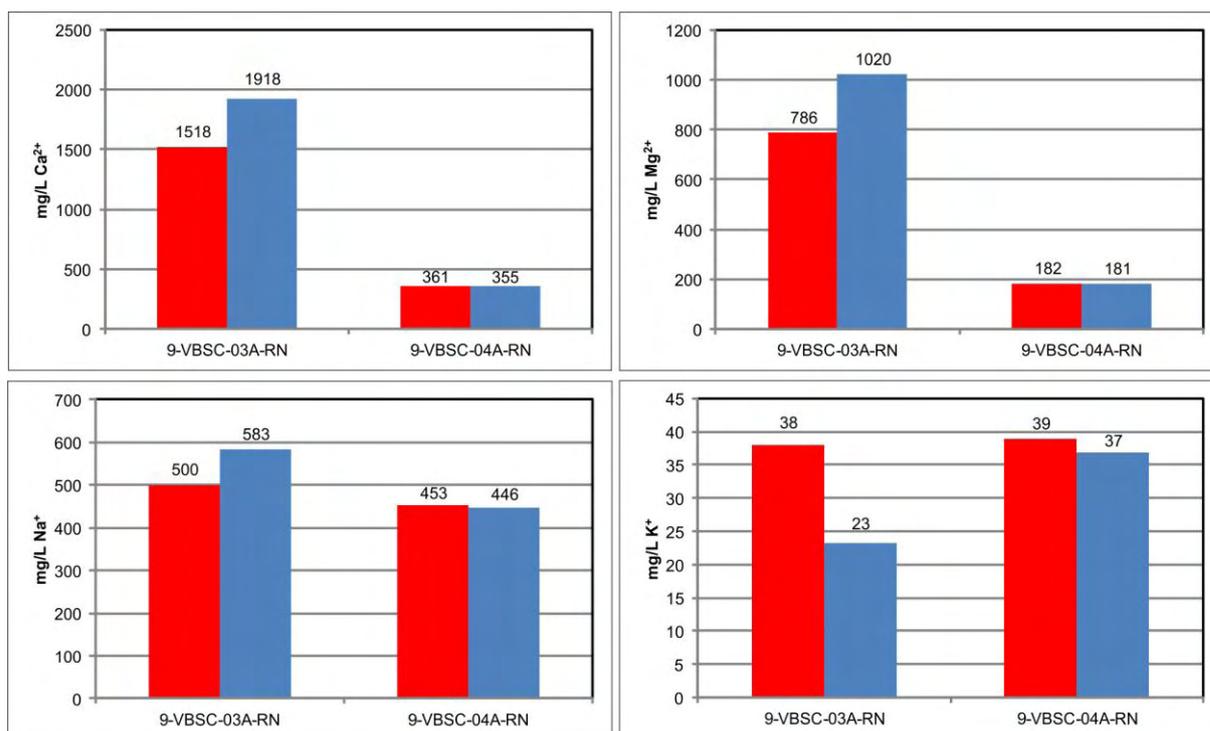


Figura 5.74 – Teor dos cátions no aquífero Barreiras em Salina Cristal, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

5.5.2.3 - Ânions no aquífero Barreiras em Salina Cristal

Os gráficos da **Figura 5.75** ilustram os resultados analíticos dos cátions presentes no aquífero Barreiras na área de Salina Cristal.

➤ Cloreto

A origem do Cl⁻ nas águas subterrâneas está principalmente relacionada com a água do mar. Por exemplo, em ambientes salinos, o Cl⁻ das águas pode ficar aprisionado no material sedimentar sofrendo deposição clástica (em folhelhos, por exemplo) ou se concentrar em evaporitos. A partir desses sítios, o Cl⁻ pode passar para as águas subterrâneas que venha a entrar em contato com esses sedimentos clásticos ou químicos. Entretanto, na maioria dos casos, a maior contribuição de Cl⁻ para as águas subterrâneas advém diretamente de aerossóis marinhos, que alcançam as terras emersas na forma de precipitação seca ou úmida, tanto nas regiões costeiras e próximas da costa como também nas regiões continentais interiores, embora em concentrações decrescentes. Em áreas costeiras, o Cl⁻ pode também alcançar as águas subterrâneas a partir de intrusão salina. Por qualquer desses caminhos, a fonte natural mais importante desse íon nas águas subterrâneas resulta, de forma direta ou indireta, da água do mar, já que os aportes provenientes da dissolução dos minerais comuns (Cl⁻ "primário") são considerados quase insignificantes. Na área de estudo, o Cl⁻ pode ter a sua origem a partir do aerossol marinho,

que transporta e deposita sais de NaCl que facilmente se dissolvem na água da chuva infiltrando-se em profundidade, ou derivado de processos de intrusão salina. Outras fontes antrópicas podem contribuir para o seu conteúdo nas águas subterrâneas, entretanto, essas atividades são consideradas incipientes nas áreas de estudo.

A maior proximidade com a linha de costa faz com que a concentração de Cl^- seja superior no poço 9-VBSC-03A-RN, quando comparado ao poço 9-VBCA-04A-RN. No que tange ao efeito sazonal, observa-se que para ambos os poços a sua concentração é superior no período úmido.

A análise dos resultados analíticos dos respectivos pares de poços perfurados no aquífero Jandaíra (9-VBSC-03B-RN e 9-VBCA-04B-RN) aponta para maior concentração de Cl^- nos poços perfurados na unidade carbonática. Essa tendência foi observada para os principais sais que mais contribuem para salinização das águas subterrâneas na área de estudo.

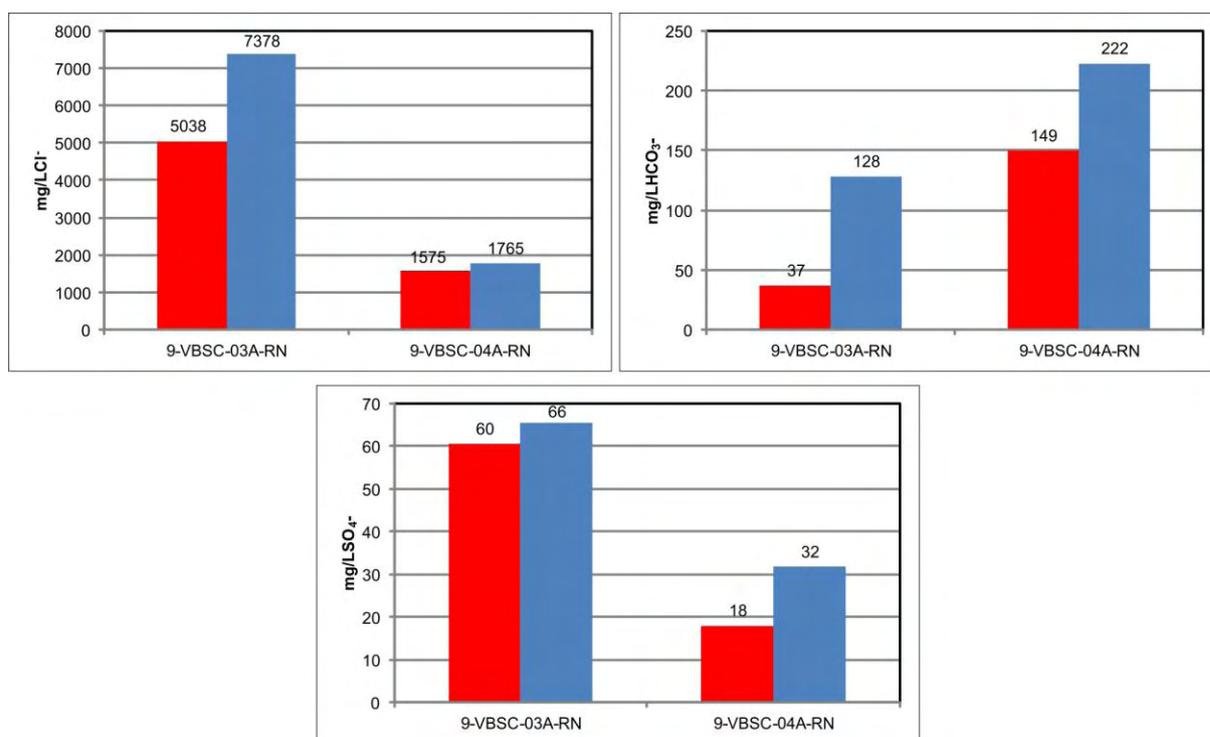


Figura 5.75 – Teor dos ânions no aquífero Barreiras em Salina Cristal, obtidos na amostragem representativa dos períodos seco (coluna da esquerda) e úmido (coluna da direita).

➤ Bicarbonato

O HCO_3^- nas águas subterrâneas do aquífero Barreiras em Salina Cristal em ambos os poços é superior no período úmido, provavelmente devido a dissolução do CO_2 atmosférico e a decomposição da matéria orgânica presente na zona insaturada que atinge o meio saturado no período das chuvas.

O HCO_3^- na área de Salina Cristal, para ambas as unidades aquíferas, apresenta uma relação inversa com a proximidade da linha de costa, isto é, os setores de maior concentração de HCO_3^- coincidem com os setores mais distantes da linha de costa, onde os processos de salinização não incidem de forma acentuada. Isso é evidenciado para os poços 9-VBSC-03A-RN (mais próximo da linha de costa e menor teor de HCO_3^-) e 9-VBSC-04A-RN (mais distante da linha de costa e maior teor de HCO_3^-).

➤ Sulfato

Em ambos os poços a concentração de SO_4^- é superior no período úmido, provavelmente devido a presença de sais de gipsita na zona não saturada que atinge a zona saturada durante os eventos de recarga.

Os teores observados no poço 9-VBSC-03A-RN são superiores aos do poço 9-VBSC-04A-RN, para ambos os períodos amostrais. Isso evidencia, as águas subterrâneas nas proximidades da linha de costa estão potencialmente influenciadas pela intrusão marinha e o efeito antrópico das salinas, notadamente para o parâmetro SO_4^- .

5.5.3 - Fácies hidroquímicas em Salina Cristal

A representação da abundância relativa dos elementos principais, bem como, a avaliação das diferenças e similaridades entre amostras e/ou processos hidrogeoquímicos foi levada a efeito mediante a representação de diagramas de Piper e Stiff (**Figura 5.76**). A hidroquímica da água do mar também é representada nos referidos diagramas. Na elaboração da figura foram considerados os resultados analíticos da coleta representativa do período úmido, já que para essa etapa amostral se dispõe de um número maior de poços amostrados. A **Tabela 5.21** apresenta a classificação das águas de acordo com a predominância dos íons, e o seu respectivo valor de condutividade elétrica.

Tabela 5.21 – Classificação das águas e condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas da área de Salina Cristal

Aquífero	Poço	Fácies Hidroquímicas	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Jandaíra	9-VBSC-01-RN	Na-Ca-Mg-Cl	3780
	9-VBSC-02-RN	Mg-Ca-Na-Cl	12310
	9-VBSC-03B-RN	Ca-Mg-Cl	22400
	9-VBSC-04B-RN	Ca-Mg-Cl	8319
	9-VBSC-05-RN	Mg-Ca-Na-Cl	3870
	9-VBSC-06-RN	Mg-Ca-Na-Cl	13300
Barreiras	9-VBSC-03A-RN	Ca-Mg-Cl	19200
	9-VBSC-04A-RN	Na-Ca-Mg-Cl	5805

Os diagramas de Stiff mostram que ocorrem águas com maior concentração iônica na faixa oeste da área. O forte componente cloretado cálcico-magnésiano observada nessas águas de oeste deve contribuir para a elevada salinidade nessas amostras, a qual se verifica em ambas as unidades aquíferas dessa faixa. Na faixa leste, ocorrem as águas menos mineralizadas e o predomínio de fácies cloretada mista, entretanto com menor concentração iônica quando comparada às demais.

No diagrama de Piper é possível agrupar o conjunto amostral em dois grupos, com características distintas, discutidas a seguir:

Grupo A:

Nesse grupo estão os poços 9-VBSC-03B-RN, 9-VBSC-04B-RN, 9-VBSC-02-RN e 9-VBSC-06-RN captando o aquífero Jandaíra e o poço 9-VBSC-03A-RN no aquífero Barreiras. Essas águas encontram-se altamente mineralizadas, com condutividade elétrica superior à 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e fácies cloretada cálcica a cloretada magnésiana.

Os processos hidrogeoquímicos que ocorrem nessas águas estão ligados à mistura com águas de origem marinha e o aporte de sais precipitados na superfície do terreno que migra em direção à zona saturada nos eventos de chuva. A presença das salinas na faixa noroeste potencializa esses fatores. O processo de recarga e armazenamento regular de águas subterrâneas é comprometido, caracterizando uma frente de fluxo de água subterrânea com energia incapaz de evitar o avanço da cunha salina para o continente. Esse cenário, provavelmente, se traduz numa mudança brusca da salinização das águas da faixa oeste, marcada pelo contato transicional de águas subterrâneas mais salinas dos trechos mais afetados pela cunha salina e águas menos salinas dos trechos menos afetados pela cunha (faixa leste).

Grupo B:

Nesse grupo estão os poços 9-VBSC-01-RN e 9-VBSC-05-RN captando o aquífero Jandaíra e o poço 9-VBSC-04A-RN no aquífero Barreiras. Essas águas apresentam menor grau de mineralização (quando comparadas ao grupo A), com condutividade elétrica inferior à 5800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e fácies cloretada mista. Nelas, os processos predominantes evidenciados nas águas do Grupo A, agem com menor intensidade.

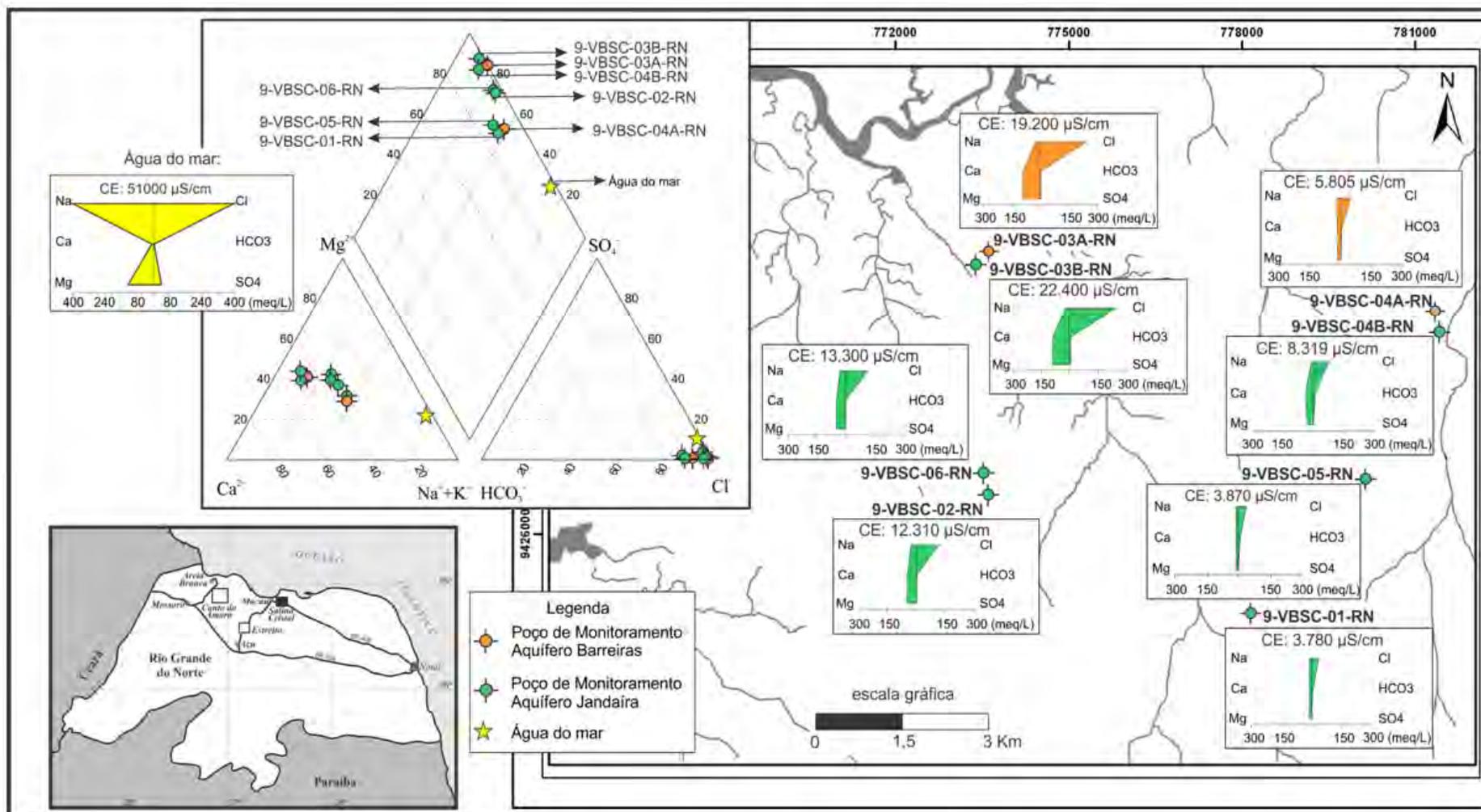


Figura 5.76 – Diagramas hidroquímicos de Stiff (com indicação da condutividade elétrica) e Piper para as águas dos aquíferos Barreiras e Jandaíra na área de Salina Cristal. A hidroquímica da água do mar está representada em amarelo.

Capítulo VI: IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS HIDROGEOQUÍMICOS NO AQUÍFERO JANDAÍRA

6.1 – ANÁLISE GLOBAL DOS DADOS HIDROQUÍMICOS

A avaliação dos processos hidrogeoquímicos que controlam a salinização das águas foi levada a efeito apenas para o aquífero cárstico Jandaíra, já que para o aquífero Barreiras dispõe-se de um número reduzido de amostras. Optou-se por avaliar conjuntamente os dados obtidos em ambos os período de amostragem, já que não são consideradas diferenças significativas nos resultados obtidos, que justifiquem uma abordagem sazonal a esse levantamento.

Na presente interpretação são utilizadas as concentrações iônicas expressas em meq/L, de modo a permitir a avaliação das fácies a partir do equilíbrio iônico entre as espécies químicas, o que torna essa avaliação independente das diferenças contrastantes observadas para os valores numéricos das concentrações, quando expressas em mg/L. O diagrama hidroquímico de Piper apresentado na **Figura 6.1** mostra a concentração relativa dos íons principais nas águas subterrâneas analisadas. Nele, foram plotados todos os resultados analíticos fazendo distinção às áreas de estudo.

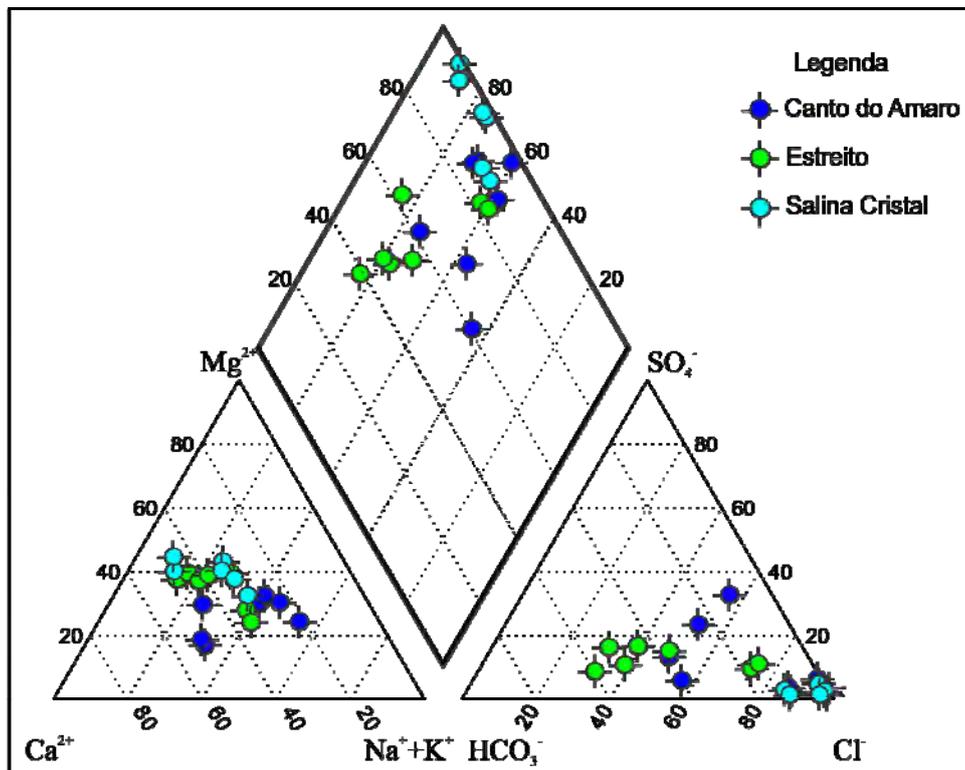


Figura 6.1 - Distribuição das principais fácies hidroquímicas através do diagrama de Piper, no aquífero Jandaíra nas três áreas de estudo. Canto do Amaro = 12 amostras. Estreito = 12 amostras. Salina Cristal = 10 amostras.

Observa-se que as amostras se agrupam em dois campos principais, onde a principal diferença diz respeito à concentração do Cl^- ou do HCO_3^- na água. Na área de Salina Cristal predominam águas cloretadas cálcicas a cálcico-sódicas. Em Estreito as águas são bicarbonatadas cloretadas cálcicas a cálcico-sódicas. Amostras de águas da área de Canto do Amaro ocorrem em ambos os campos. É provável que os diferentes grupos representem evoluções geoquímicas distintas.

Na investigação dos principais processos que determinam o quimismo da água foi utilizado o diagrama de Gibbs para cátions e ânions, apresentado na **Figura 6.2**. O diagrama de Gibbs (1970), muito utilizado na avaliação de águas superficiais, tem sido frequentemente aplicado para dados de águas subterrâneas, como exemplo: Shanyengana *et.al*, (2004), Jalali (2007), Ydana *et.al*, (2010) e Mondal *et. al* (2010).

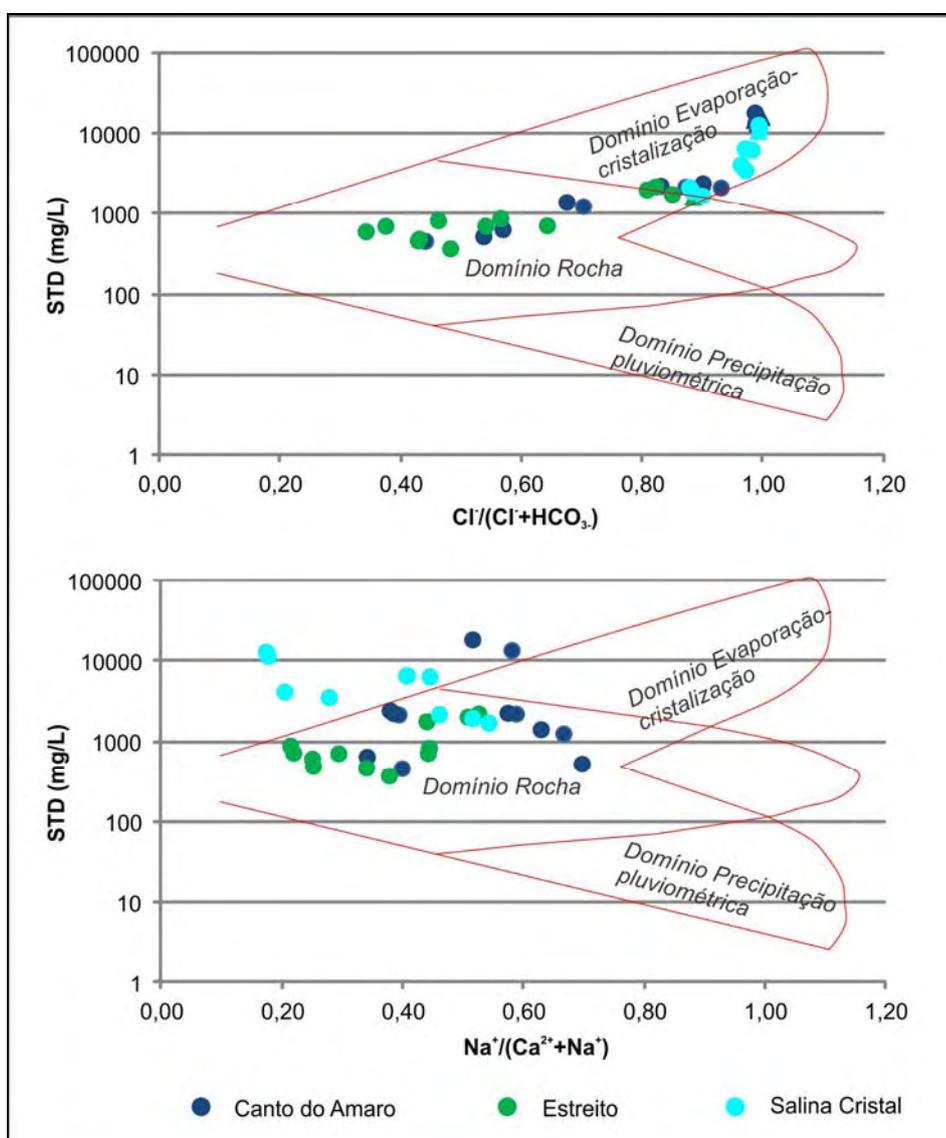


Figura 6.2 - Indicação dos principais mecanismos que governam a geoquímica do aquífero Jandaíra, através do diagrama de Gibbs. Ions são expressos em meq/L.

Esse diagrama considera a hidroquímica governada por três assinaturas principais, os quais:

- (i) água da chuva, que é predominantemente cloretada sódica e com baixas concentrações de STD;
- (ii) interação água-rocha, que propiciam um incremento de STD mediante o aumento da proporção de Ca^{2+} e HCO_3^- em relação ao Na^+ e Cl^- ;
- (iii) evaporação e cristalização (precipitação), que aumentam sensivelmente o conteúdo de Na^+ e Cl^- juntamente com o aumento de STD.

O diagrama de Gibbs para ânions na abscissa indica que o quimismo das águas subterrâneas na área de Estreito e em parte de Canto do Amaro é adquirido principalmente pelo processo de interação água-rocha. No campo de influência dos processos de evaporação-cristalização aparecem as águas da área de Salina Cristal e parte de Canto do Amaro. Obviamente, o domínio semiárido da área favorece esse mecanismo, mas deve-se considerar também os processos decorrentes da mistura com águas marinhas, que propiciam um incremento de Na^+ e Cl^- e concomitantemente de STD.

No diagrama para cátions, parte das amostras se enquadra nas afirmações acima, entretanto algumas plotam fora dos campos definidos no diagrama. Nesse caso, é provável que processos de troca catiônica prejudique a utilização dessa representação. Essas pontos anômalas podem, por exemplo, representar enriquecimento anormal apenas em Ca^{2+} (causando a consequente diminuição na razão $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+)$) em amostras dominadas por processos de evaporação-cristalização ou representar enriquecimento em outras espécies iônicas que não os cátions da abscissa (causando a consequente elevação em STD) em amostras dominadas por processos de interação água-rocha.

Normalmente, nas águas doces ocorre um predomínio de Ca^{2+} e nas águas marinhas de Mg^{2+} ; e em relação aos ânions, se espera uma concentração maior de HCO_3^- nas águas doces e de Cl^- na água do mar (Walther, 2009). A aplicação dessas razões iônicas é estudada para avaliar o efeito da intrusão marinha (Custódio & Llamas, 2001). A razão $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ (**Figura 6.3**) é claramente superior na área de Salina Cristal, seguida de Canto do Amaro, evidenciando a transformação da água subterrânea em água salina nas proximidades da linha de costa. Para as amostras de Salina Cristal, há inclusive uma amostra composicionalmente evoluída em direção à composição da água do mar, representando o maior grau de interação das águas subterrâneas de Salina Cristal com as águas marinhas, definido inclusive uma possível tendência composicional, como verificado na seta representada na referida figura.

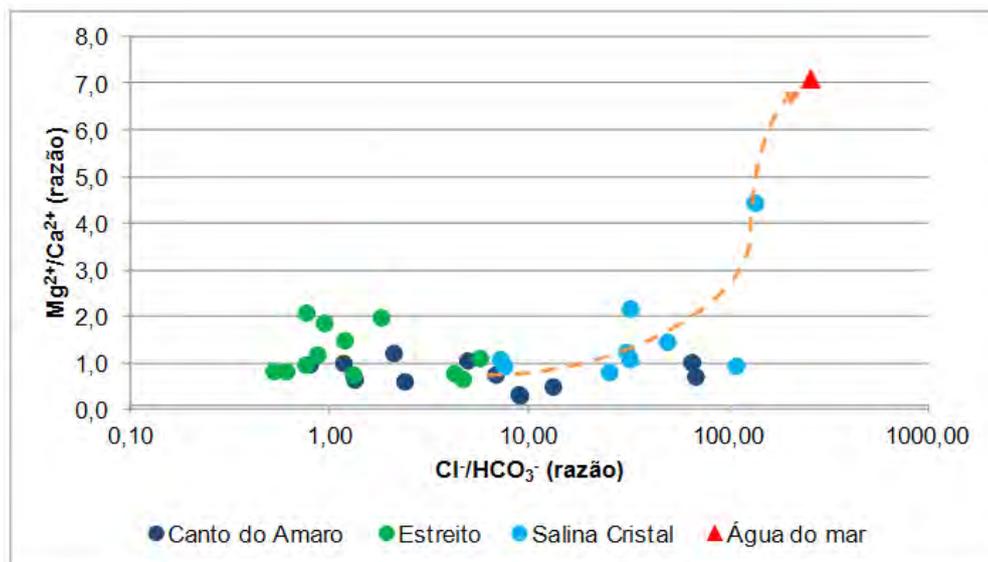


Figura 6.3 - Gráfico Mg^{2+}/Ca^{2+} versus Cl^{-}/HCO_3^{-} .

6.2 - GRUPOS DE ÁGUAS

Para a identificação dos mecanismos e processos hidrogeoquímicos atuantes nas águas do aquífero Jandaíra, optou-se pela separação das amostras em grupos. A divisão de dados químicos, de uma mesma unidade aquífera, em conjuntos com características semelhantes é utilizada em diversos trabalhos (Jalali *et al.*, 2008; Jalali, 2007; Jalali, 2005, Saleh *et al.*, 2001; Hiscock, 1993) para estudar a evolução hidrogeoquímica.

No presente estudo, foram individualizados dois grupos principais de águas, denominados **Grupo 1** e **Grupo 2**, cujo embasamento para classificação foi a análise da distribuição dos parâmetros hidroquímicos em cada área amostral, discutida no capítulo anterior, bem como a disparidade na salinidade das águas. A interpretação dos dados considerando a sua concentração iônica, conforme discutido nas **Figuras 6.1 a 6.3**, ratificou o entendimento de haver grupos de águas que passam por evoluções geoquímicas distintas. A distribuição espacial desses poços nas três áreas de trabalho pode ser visualizada na **Figura 6.4**.

No **Grupo 1** foram agrupadas 12 poços, que representam 60% do total de poços avaliados, sendo a maioria deles localizado na área de Estreito e secundariamente em Canto do Amaro. Neste grupo estão as amostras menos salinizadas. No **Grupo 2** estão 8 poços, que corresponde a 40% dos poços avaliados, localizados na área de Salina Cristal e Canto do Amaro. Neste grupo, as amostras apresentam maior concentração salina, isto é, são mais enriquecidas.

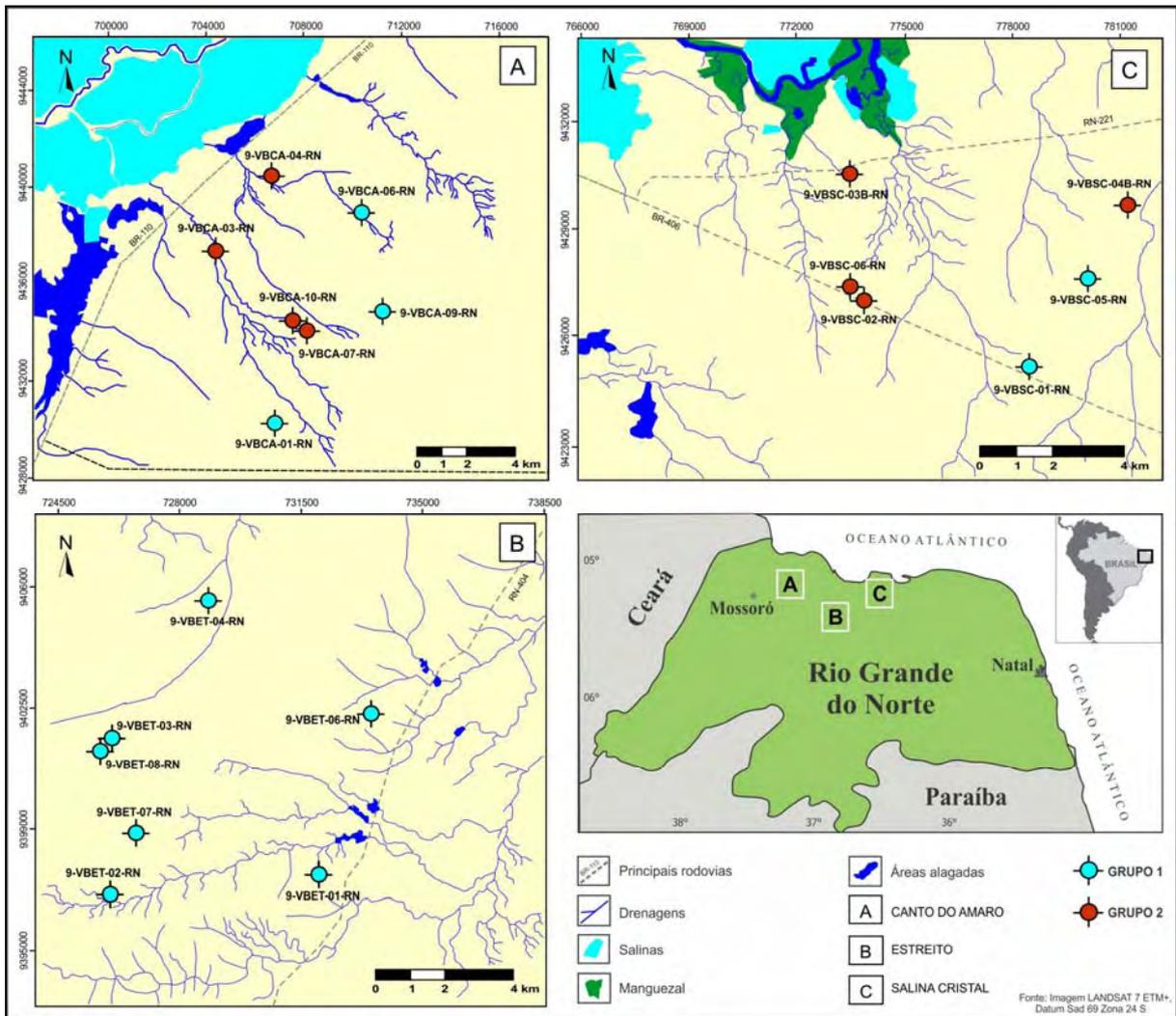


Figura 6.4 - Distribuição dos grupos de águas nas áreas de estudo. Grupo 1 (baixa salinidade) – 12 amostras no total (3 em Canto do Amaro, 7 em Estreito e 2 em Salina Cristal). Grupo 2 (alta salinidade) – 8 amostras no total (4 em Canto do Amaro e 4 em Salina Cristal).

6.2.1 - Avaliação estatística das amostras agrupadas

As **Tabelas 6.1** e **6.2** apresentam os dados estatísticos relativos ao Grupo 1 e Grupo 2. As águas do **Grupo 1** apresentam valor de STD variando de 378 a 2257 mg/L, com média e mediana de 1116 e 790 mg/L, respectivamente. Nesse grupo as águas são doces a ligeiramente salobras (com base na classificação de Mcneely *et al.*, 1979). As águas do **Grupo 2** são altamente mineralizadas, com valor mínimo de STD de 2192 e máximo de 18703 mg/L, com média e mediana de 6888 e 5350 mg/L, respectivamente. Este grupo comporta águas classificadas como moderadamente salobras a salgadas.

Considerando-se o coeficiente de variação de cada grupo, observa-se uma baixa variabilidade (inferior a 100%, na maioria dos casos) nos resultados analíticos das amostras analisadas, isto é, dentro de cada conjunto para um mesmo parâmetro os resultados analíticos são pouco heterogêneos. Isso aponta para a ocorrência de mesmos processos governando as concentrações dos sais nas águas de cada grupo. A pequena faixa de

concentração para as espécies químicas se reflete nas características hidroquímicas semelhantes das amostras agrupadas.

Tabela 6.1 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra **Grupo 1**, para ambos os períodos amostrais (n=20)

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2191,93	876,00	4500,00	1465,75	1292,45	58,96
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	1116,25	378,00	2257,00	790,50	659,12	59,05
pH	7,06	6,56	7,83	6,93	0,36	5,14
Dureza (mg/L como CaCO_3)	693,68	206,45	1323,36	578,34	340,26	49,05
Ca^{2+} (mg/L)	145,06	40,00	282,00	117,00	73,18	50,45
K^+ (mg/L)	11,84	4,00	28,60	9,50	6,80	57,45
Mg^{2+} (mg/L)	80,76	24,80	164,00	71,35	39,86	49,35
Na^+ (mg/L)	146,54	37,70	357,00	91,88	112,44	76,73
Cl^- (mg/L)	435,62	89,96	1204,80	232,41	392,90	90,19
SO_4^- (mg/L)	89,53	7,80	270,20	56,40	78,91	88,14
HCO_3^- (mg/L)	292,34	167,75	419,99	265,63	77,66	26,56

Tabela 6.2 – Estatística descritiva da composição química das águas do aquífero Jandaíra **Grupo 2**, para ambos os períodos amostrais (n=14)

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	12836,25	4000,00	27100,00	10690,00	8712,18	67,87
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	6887,79	2192,00	18703,00	5350,00	5348,35	77,65
pH	6,81	6,33	7,60	6,69	0,37	5,37
Dureza (mg/L como CaCO_3)	4724,13	1212,55	10987,34	4089,66	3616,37	76,55
Ca^{2+} (mg/L)	918,14	239,00	2139,00	779,50	627,04	68,29
K^+ (mg/L)	33,82	5,50	103,00	28,65	27,75	82,06
Mg^{2+} (mg/L)	527,49	84,80	1231,00	465,00	410,85	77,89
Na^+ (mg/L)	690,61	213,00	2391,00	421,00	672,47	97,37
Cl^- (mg/L)	4131,59	674,79	11660,00	3258,35	3476,88	84,15
SO_4^- (mg/L)	239,81	15,90	875,00	97,40	288,86	120,45
HCO_3^- (mg/L)	195,65	97,60	311,97	191,03	62,16	31,77

A hidroquímica do aquífero Jandaíra é determinada pela combinação de fatores diversos como: a interações entre a água e a litologia aquífera durante o processo de circulação; a presença de sais na zona insaturada que atingem a zona saturada durante os eventos de recarga e a distância em relação à linha de costa.

6.2.2 - Correlação entre os Íons

A matriz de correlação apresentada nas **Tabelas 6.3** e **6.4** foi realizada com o objetivo de compreender a relação das espécies iônicas com a salinidade das águas do Grupo 1 e 2. Optou-se por apresentar a correlação considerando ambos os períodos amostrais para cada grupo de águas, já que a confecção individualizada (sazonal) evidenciou o mesmo resultado.

As águas do Grupo 1 (baixa salinidade) tem a sua mineralização controlada principalmente pelos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e Cl^- , que apresentam ótima correlação com o parâmetro STD, da ordem de 0,94, 0,95, 0,92 e 0,97, respectivamente. Entre estes íons também se observa elevada correlação (superior a 0,80), corroborando com o fato de contribuírem mutuamente na hidroquímica das águas desse grupo. Para os demais íons não se observa correlação significativa.

Nas amostras do Grupo 2 (alta salinidade) o parâmetro STD apresenta ótima correlação com o os íons Ca^{2+} (0,90), K^+ (0,82), Mg^{2+} (0,92) e Cl^- (0,99). Para os íons, observa-se correlação superior a 0,93 entre o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- . A comparação da correlação entre os dois grupos, evidencia que o Na^+ participa de forma mais intensa do processo de mineralização do Grupo 1, ao passo que o K^+ participa de forma mais intensa no Grupo 2. Esse cenário aponta para processos de troca iônica, que serão abordados posteriormente.

Tabela 6.3 – Coeficiente de correlação (r) de Pearson das águas do Grupo 1 para ambos os períodos amostrais ($n=20$).

	<i>CE</i>	<i>STD</i>	<i>pH</i>	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	SO_4^-
STD	0,97	1,00	-	-	-	-	-	-	-
pH	-0,20	-0,16	1,00	-	-	-	-	-	-
Ca^{2+}	0,92	0,94	-0,38	1,00	-	-	-	-	-
K^+	0,63	0,63	0,31	0,38	1,00	-	-	-	-
Mg^{2+}	0,94	0,95	-0,15	0,91	0,64	1,00	-	-	-
Na^+	0,94	0,92	-0,11	0,80	0,69	0,83	1,00	-	-
Cl^-	0,96	0,97	-0,15	0,93	0,60	0,94	0,87	1,00	-
SO_4^-	0,28	0,36	0,04	0,19	0,42	0,26	0,48	0,13	1,00
HCO_3^-	0,05	0,21	0,02	0,18	0,10	0,13	0,08	0,06	0,51

Tabela 6.4 – Coeficiente de correlação (r) de Pearson das águas do Grupo 2 para ambos os períodos amostrais ($n=14$).

	CE	STD	pH	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻
STD	0,95	1,00	-	-	-	-	-	-	-
pH	0,00	0,16	1,00	-	-	-	-	-	-
Ca ²⁺	0,97	0,90	-0,03	1,00	-	-	-	-	-
K ⁺	0,81	0,82	0,15	0,56	1,00	-	-	-	-
Mg ²⁺	0,98	0,92	-0,03	0,97	0,63	1,00	-	-	-
Na ⁺	0,67	0,77	0,08	0,51	0,94	0,57	1,00	-	-
Cl ⁻	0,96	0,99	0,17	0,93	0,77	0,94	0,71	1,00	-
SO ₄ ⁻	0,21	0,34	-0,05	0,07	0,67	0,16	0,69	0,25	1,00
HCO ₃ ⁻	-0,14	0,09	0,54	-0,25	0,37	-0,19	0,33	0,05	0,40

6.2.3 - Percentual Iônico

A **Figura 6.5** apresenta o percentual da concentração dos íons para as amostras dos grupos. Nas águas do **Grupo 1**, a concentração do Ca²⁺ (em meq/L) predomina com 35% do total de cátions, o Mg²⁺ representa 32%, o Na⁺ 31% e o K⁺ 2%. Entre os ânions, destaca-se a concentração do Cl⁻ com 65% do total, em seguida aparece o HCO₃⁻ com 25% e por fim o SO₄⁻ com 10%. Portanto:

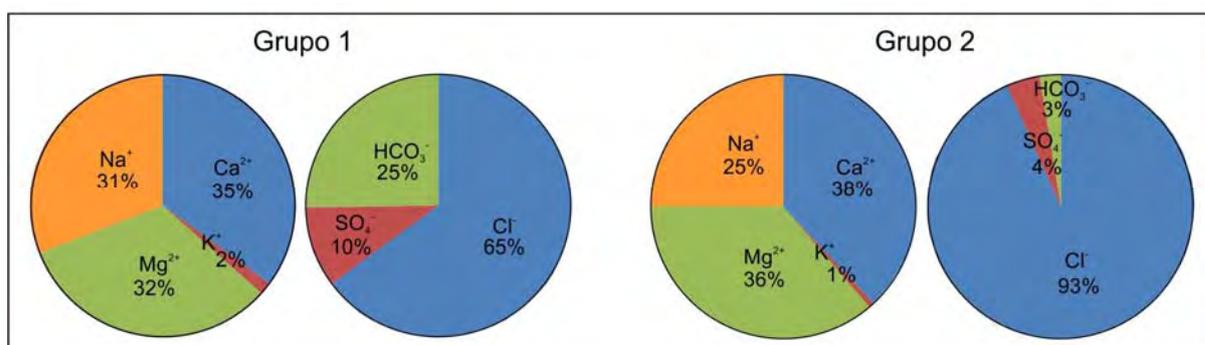
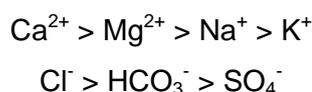
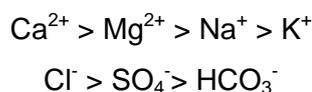


Figura 6.5 - Gráficos do percentual médio de íons para os grupos de água, calculados em concentração expressa em meq/L.

Nas águas do **Grupo 2**, a concentração do Ca²⁺ (meq/L) é predominante e representa 38% do total de cátions, seguido do Mg²⁺ com 36%, do Na⁺ com 25% e o K⁺ com 1%. O Cl⁻ é o ânion altamente dominante, representando 93% do total de ânions. Secundariamente está o SO₄⁻² com 4%, seguido do HCO₃⁻ com 3%. Portanto:



A comparação entre o percentual dos cátions (cátions Grupo 1 vs. cátions Grupo 2) demonstra um decréscimo na concentração de Na⁺ (de 31% para 25%) e acréscimo na

concentração de Ca^{2+} (de 35% para 38%, do Grupo 1 para o Grupo 2). Essa relação inversa entre o Na^+ e o Ca^{2+} sugere processos de troca catiônica na transição entre os dois grupos de água nas áreas estudadas. Como consequência da intrusão marinha, quando as águas salinas enriquecidas em Na^+ entram em contato com as águas doces, a água do aquífero (por troca catiônica) passa a ter menos Ca^{2+} e mais Na^+ . Processos de evaporação também resultam na precipitação de CaCO_3 que tem como consequência a diminuição do Ca^{2+} em solução no aquífero.

No que tange aos ânions, os teores elevados de Cl^- nas águas do **Grupo B** apontam para o predomínio da influência marinha nessas águas. Embora esse ânion também ocorra de forma significativa no **Grupo 1** (65%), ele ainda é superior no Grupo 2 (93%). Neste grupo, o HCO_3^- corresponde a apenas 3% do total de ânions, enquanto no **Grupo 1** representa 25% do total de ânions. No **Grupo 1** são agrupadas grande parte das amostras de Estreito, onde ocorre o predomínio dos processos de interação água-rocha e a concentração do HCO_3^- reflete a dissolução das rochas carbonáticas.

O aporte de Cl^- nas águas do **Grupo 2** deve-se à proximidade geográfica com a linha de costa. Notadamente nesse grupo está agrupada grande parte dos poços localizados em Canto do Amaro e Salina Cristal. Ainda, o componente cloretado dos aerossóis marinhos nas águas meteóricas, que participam do processo de recarga das águas desse grupo, é intensificado pela presença antrópica das salinas localizadas a norte/noroeste das áreas de Canto do Amaro e Salina Cristal.

6.2.4 - Fácies Hidroquímicas

A síntese da composição e evolução química das águas no aquífero Jandaíra pode ser feita através da descrição das fácies hidroquímica predominante, representada de forma gráfica no diagramas Piper (**Figura 6.6**). A classificação dessas águas é apresentada na **Tabela 6.5**.

O aquífero Jandaíra no domínio dos processos de interação água-rocha que agem com maior intensidade no **Grupo 1**, tem uma composição predominante do tipo bicarbonatada cloretada mista e águas com baixa salinidade (inferior a 2257 mg/L).

Esta composição revela a influência da dissolução dos minerais carbonatados, sendo o aporte de Na^+ e Cl^- explicado pelo clima semiárido que favorece a evaporação cíclica aportando esses íons às águas.

As águas que circulam próximo à linha de costa (**Grupo 2**) apresentam uma fácies hidroquímica do tipo cloretada mista com valores de STD elevados, de até 18703 mg/L. O componente climático é o mesmo atuante nas águas do Grupo 1, entretanto a presença das salinas favorece o aporte de Na^+ e Cl^- aos aerossóis, maximizando a deposição desses sais na superfície do solo, que atingem a zona saturada na época das chuvas. A problemática da

intrusão marinha natural, causada pela recarga limitada do aquífero Jandaíra no setor estudado, torna o aquífero vulnerável ao avanço da cunha salina, notadamente através dos vales fluviais.

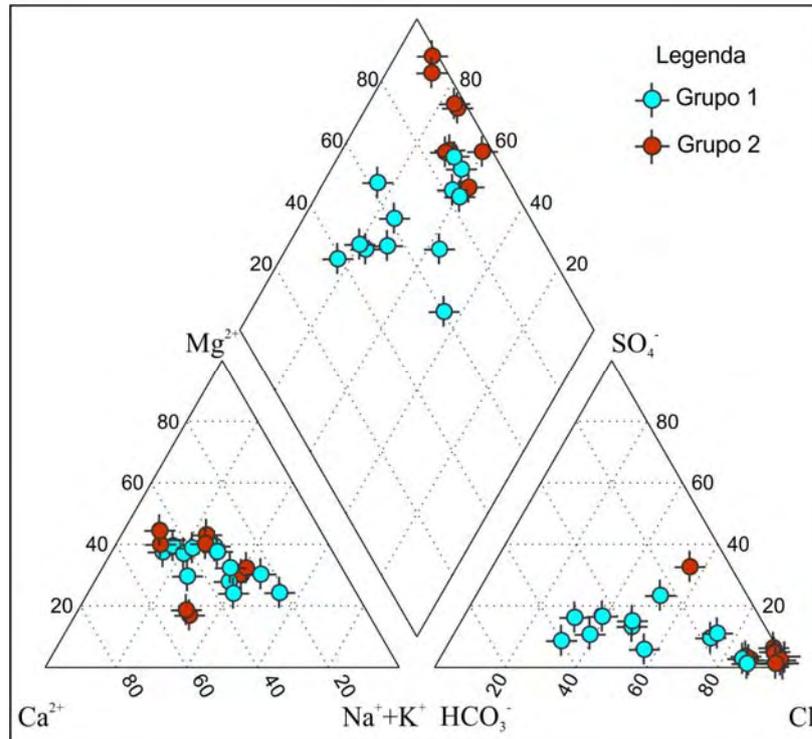


Figura 6.6 - Distribuição das principais fácies hidroquímicas (Grupo 1 e Grupo 2).

Tabela 6.5 - Fácies hidroquímicas predominante no Grupo 1 e Grupo 2.

	Poço	Fácies Hidroquímicas
Grupo 1 (Sólidos Totais Dissolvidos entre 378 e 2257 mg/L)	9-VBET-08-RN	Na-Ca-Mg-Cl
	9-VBSC-01-RN	Na-Ca-Mg-Cl
	9-VBCA-06-RN	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃ -SO ₄
	9-VBCA-09-RN	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃
	9-VBET-03-RN	Na-Ca-Mg-Cl
	9-VBET-02-RN	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl
	9-VBET-06-RN	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl
	9-VBET-07-RN	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl
	9-VBCA-01-RN	Ca-Mg-Na-Cl-HCO ₃
	9-VBET-01-RN	Ca-Mg-Cl-HCO ₃
	9-VBET-04-RN	Mg-Ca-Na-HCO ₃ -Cl
	9-VBSC-05-RN	Mg-Ca-Na-Cl
	Grupo 2 (Sólidos Totais Dissolvidos entre 2192 e 18703 mg/L).	9-VBCA-07-RN
9-VBCA-10-RN		Ca-Na-Cl
9-VBSC-03B-RN		Ca-Mg-Cl
9-VBSC-04B-RN		Ca-Mg-Cl
9-VBSC-02-RN		Mg-Ca-Na-Cl
9-VBSC-06-RN		Mg-Ca-Na-Cl
9-VBCA-03-RN		Na-Mg-Ca-Cl
9-VBCA-04-RN		Na-Mg-Ca-Cl-SO ₄

6.2.5 - Índices de Saturação

O estado de saturação de uma água pode ser representado pelo índice de saturação (IS) (índice de Langelier) da água relativa a determinado mineral, permitindo prever a tendência da mesma para precipitar ou dissolver determinada espécie (Appelo and Postma, 1996; Drever 1998):

- Índices de saturação **nulos** ($IS=0$): água encontra-se em equilíbrio (**saturada**) com a espécie mineral dissolvida.
- Índices de saturação **negativos** ($IS<1$): água encontra-se **subssaturada** nessa espécie mineral, tendendo a dissolver essa espécie até atingir o equilíbrio.
- Índices de saturação **positivos** ($IS>1$): água está **sobressaturada** numa determinada espécie mineral e tende a precipitar a quantidade necessária da espécie para atingir o equilíbrio hidroquímico.

A **Tabela 6.6** apresenta os índices de saturação em relação à calcita e à dolomita para o aquífero Jandaíra. Para ambos os grupos predominam águas sobressaturadas em calcita e dolomita, indicando a tendência da água para a precipitação dessas espécies carbonatadas.

Tabela 6.6 – Índice de Saturação (IS) da calcita e dolomita para as amostras do Grupo 1 e Grupo 2.

Grupo	IS Calcita			IS Dolomita		
1	9-VBCA-01-RN	0,8	Supersaturada	9-VBCA-01-RN	1,7	Supersaturada
	9-VBCA-06-RN	1,6	Supersaturada	9-VBCA-06-RN	3,5	Supersaturada
	9-VBCA-09-RN	-0,1	Subsaturada	9-VBCA-09-RN	-0,1	Subsaturada
	9-VBET-01-RN	-0,2	Subsaturada	9-VBET-01-RN	-0,3	Subsaturada
	9-VBET-02-RN	0,0	Saturada	9-VBET-02-RN	0,2	Supersaturada
	9-VBET-03-RN	0,0	Saturada	9-VBET-03-RN	0,1	Supersaturada
	9-VBET-04-RN	0,7	Supersaturada	9-VBET-04-RN	1,7	Supersaturada
	9-VBET-06-RN	-0,1	Subsaturada	9-VBET-06-RN	-0,1	Subsaturada
	9-VBET-07-RN	0,1	Supersaturada	9-VBET-07-RN	0,4	Supersaturada
	9-VBET-08-RN	0,0	Saturada	9-VBET-08-RN	0,2	Supersaturada
	9-VBSC-01-RN	0,1	Supersaturada	9-VBSC-01-RN	0,4	Supersaturada
9-VBSC-05-RN	0,8	Supersaturada	9-VBSC-05-RN	1,9	Supersaturada	
2	9-VBCA-03-RN	1,3	Supersaturada	9-VBCA-03-RN	2,9	Supersaturada
	9-VBCA-04-RN	-0,1	Subsaturada	9-VBCA-04-RN	-0,1	Subsaturada
	9-VBCA-07-RN	0,1	Supersaturada	9-VBCA-07-RN	0,0	Saturada
	9-VBCA-10-RN	1,6	Supersaturada	9-VBCA-10-RN	3,1	Supersaturada
	9-VBSC-02-RN	0,0	Saturada	9-VBSC-02-RN	0,2	Supersaturada
	9-VBSC-03B-RN	0,0	Saturada	9-VBSC-03B-RN	0,2	Supersaturada
	9-VBSC-04B-RN	0,0	Saturada	9-VBSC-04B-RN	0,2	Supersaturada
9-VBSC-06-RN	0,5	Supersaturada	9-VBSC-06-RN	1,4	Supersaturada	

Obeve-se uma correlação linear positiva entre o IS da calcita e o IS da dolomita segundo uma função linear (**Figura 6.7**), ou seja, para valores de IS dolomita crescentes, maiores serão também os valores de IS da calcita. Observa-se uma forte correlação entre as variáveis, da ordem de 0,99 para o Grupo 1 e 0,98 para o Grupo 2.

Entretanto, observa-se uma tendência de haverem mais amostras subsaturadas em calcita e dolomita no Grupo 1 (25%, para ambos os minerais), quando comparado com o Grupo 2 (12,5%, para ambos os minerais). Indicando que a dissolução desses minerais exercem maior influência na composição química das águas do Grupo 1 (**Figura 6.8**).

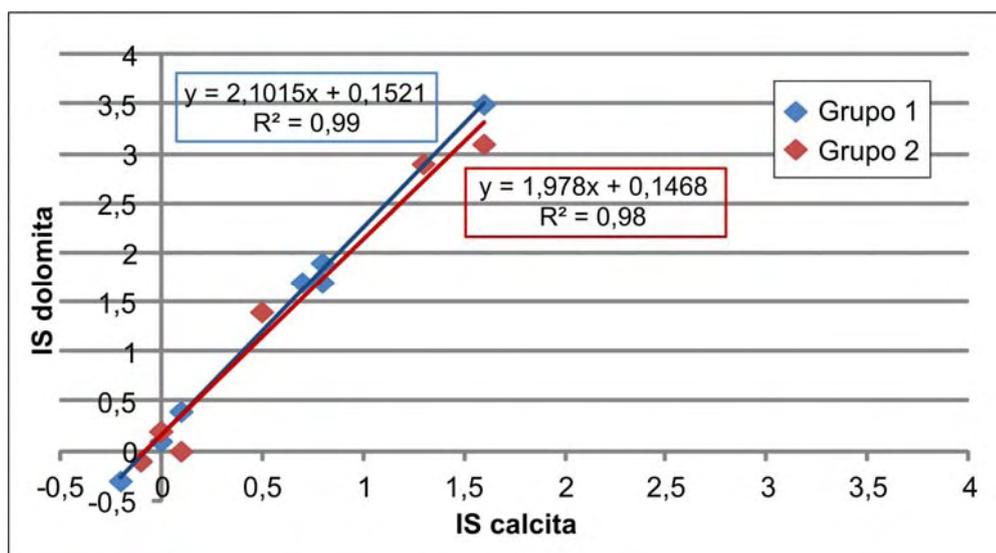


Figura 6.7 - Variação do IS da calcita, em função do IS da dolomita.

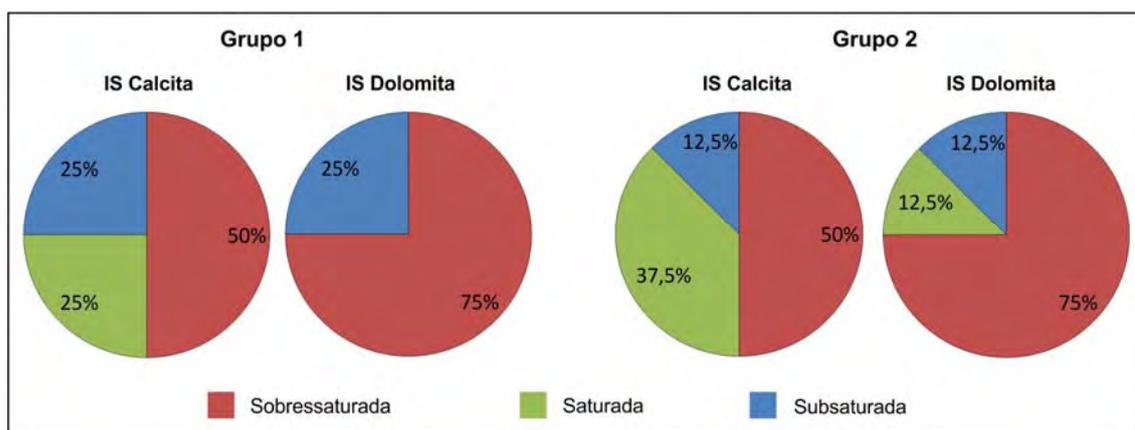


Figura 6.8 – Percentual de IS da calcita e da dolomita para as amostras do Grupo 1 e Grupo 2.

O inverso ocorre para a situação de equilíbrio (saturação) da calcita e dolomita do Grupo 1 (25% e 37%, respectivamente) para o Grupo 2 (0% e 12,5%, respectivamente).

Isso indica que do Grupo 1 para o Grupo 2, as águas tendem a adquirir a situação de saturação, podendo evoluir para a sobressaturação nessas espécies minerais.

A evolução hidrogeoquímica das águas junto à linha de costa, na ocorrência da intrusão salina, acarreta num aumento dos alcalinos terrosos majoritários como consequência dos processos de troca catiônica, e esse enriquecimento leva à tendência para saturação e precipitação de calcita e dolomita.

6.2.6 - Troca Catiônica

Processos de troca catiônica ocorrem principalmente quando o equilíbrio químico da água subterrânea é alterado por algum episódio, como por exemplo, a mistura de águas de outra origem. Nesse caso, o equilíbrio dos cátions entre o material aquífero e a água subterrânea é perturbado, havendo dessa forma, a busca de um novo equilíbrio que ocorre através da troca catiônica, libertando certos cátions à água e retirando outros.

O Ca^{2+} e o Na^+ são os principais íons que participam dos processos de troca catiônica, uma vez que são os cátions dominantes na água doce e água marinha, respectivamente. No entanto, outros cátions como o Mg^{2+} , K^+ e NH^+ igualmente podem participar.

Em decorrência da troca catiônica com a mistura da água do mar, a água do aquífero passa a ter menos Na^+ e mais Ca^{2+} e a razão Na^+/Cl^- começa a descer. O aumento da concentração de Ca^{2+} na água, aumenta a razão $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$.

Essa relação é observada na **Figura 6.9**, onde verifica-se no Grupo 1 que a razão Na^+/Cl^- é maior que no Grupo 2. As águas do aquífero Jandaíra afetadas pela intrusão marinha (Grupo 2) tem seu conteúdo de Na^+ diminuído. No que tange a relação do $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$, verifica-se que as águas do aquífero Jandaíra não são afetadas pela intrusão marinha (Grupo 1) apresentam essa relação inferior quando comparadas às águas afetadas pela água do mar (Grupo 2)

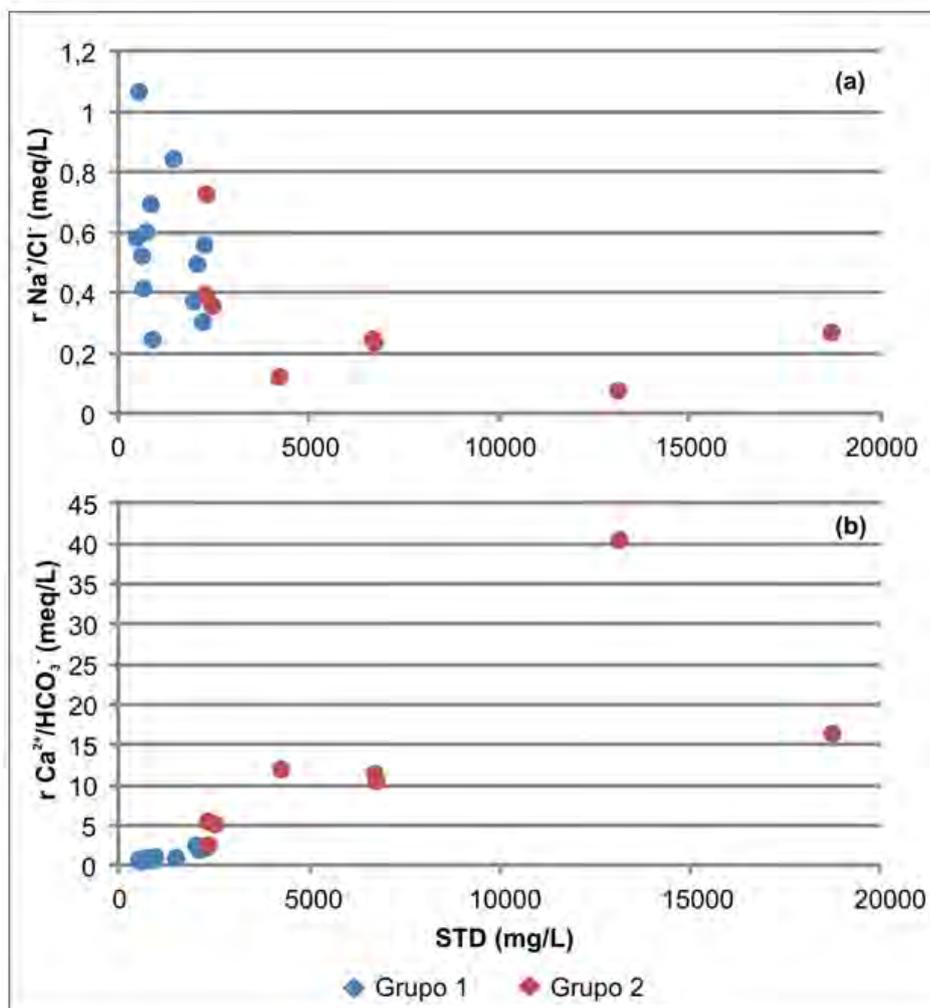


Figura 6.9 – Gráficos da razão Na^+/Cl^- versus STD (a) e da razão $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ versus STD (b) para as amostras do Grupo 1 e Grupo 2.

6.2.7 - Intrusão Marinha

Em diversos países, a intrusão marinha é causada por superexploração dos aquíferos, comumente para fins de irrigação, que demanda um grande volume de água. A exploração excessiva acarreta no rebaixamento do nível da água no aquífero, aumentando o risco de a água do mar - antes em equilíbrio - entrar nos aquíferos e se misturar com a água doce.

Na área de estudo o panorama de uso da água acima descrito não é verificado. O aquífero Jandaíra nesse setor é reconhecidamente de baixo potencial hidrogeológico, fazendo com que historicamente o desenvolvimento da região tenha se dado através do uso de outras fontes de água para suprimento, seja através do aquífero Açú confinado (profundo) ou através das grandes adutoras que fornecem águas vindas de outras regiões do Estado.

Dessa forma, a intrusão marinha junto à costa das áreas de Canto do Amaro e Salina Cristal se dá através de um processo natural, dado às condições climáticas severas (baixa precipitação anual e concentrada em poucos meses do ano), ficando comprometido o processo de recarga e armazenamento regular de águas subterrâneas. Isso acarreta numa frente de fluxo de água subterrânea com energia incapaz de evitar o avanço da cunha salina para o continente. Esse fato ocasiona uma mudança brusca da salinização das águas do aquífero, marcada pelo contato transicional de águas subterrâneas mais salinas dos trechos mais afetados pela cunha salina e águas menos salinas dos trechos menos afetados pela cunha.

A presença das salinas instaladas próximo à linha de costa maximiza o efeito da salinização no local. A exploração extensiva das salinas de Mossoró e litoral de Areia Branca e Macau data de meados de 1800. Nelas, a água do mar é represada em grandes tanques de evaporação que captam água do mar através de canais. Esse panorama faz com que se torne difícil a separação do efeito causado pela intrusão marinha e a contribuição da água do mar proveniente das salinas. Muito provavelmente, a salinização das águas do aquífero Jandaíra nesse setor seja ocasionada por esses dois fatores.

Portanto, no presente trabalho será avaliado somente o aspecto da intrusão marinha natural, sabendo-se que ela está atrelada também a exploração histórica das salinas, que provavelmente, também, ocasionou a salinização das águas em subsuperfície. Considera-se que, na atualidade, próximo à linha de costa, as águas salinizadas no setor ocupado pelas salinas estejam em equilíbrio com a água subterrânea salinizada por influência da intrusão marinha.

6.2.7.1 - Avaliação da influência marinha no aquífero Jandaíra

A mistura de águas doces com águas marinhas induz a várias reações geoquímicas que podem ser avaliadas através dos ganhos ou perdas na concentração dos íons na água misturada. No presente trabalho foi utilizada a metodologia aplicada por Mondal *et. al*, (2010) e Mondal *et. al*, (2011). O referido trabalho calcula a fração de água marinha (f_{mar}) com base na concentração de Cl^- (ion conservativo) da seguinte forma:

$$f_{mar} = \frac{e_{Cl,amostra} - e_{Cl,ág.doce}}{e_{Cl,mar} - e_{Cl,ág.doce}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- $e_{Cl,amostra}$ = concentração de Cl^- na amostra (meq/L);
- $e_{Cl,ág.doce}$ = concentração de Cl^- na água doce (meq/L);
- $e_{Cl,mar}$ = concentração de Cl^- na água do mar (meq/L).

Para a concentração de Cl^- na água doce foi selecionado um poço da área de Estreito, distante da influência marinha, que representa a hidroquímica do aquífero Jandaíra característico do processo de interação água-rocha, no caso o poço 9-VBET-02-RN. A concentração de Cl^- na água do mar foi obtida de uma amostra coletada em 2010 no litoral de Areia Branca (laudo cedido).

A concentração de um íon qualquer (i) na mistura conservativa de água doce e água do mar – sem haver reações geoquímicas – se dá através da seguinte fórmula:

$$e_{i,mist.} = f_{mar} \times e_{i,mar} + (1 - f_{mar}) \times e_{i,ág.doce} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$e_{i,mist.}$ = concentração do íon i na mistura (meq/L);

f_{mar} = fração de água marinha (obtido da fórmula anterior)

$e_{i,mar}$ = concentração do íon i na água do mar (meq/L);

$e_{i,ág.doce}$ = concentração do íon i na água doce (9-VBET-02-RN) (meq/L).

Sabendo-se que a mudança de concentração de um íon i não resulta unicamente da mistura, e sim de reações geoquímicas, aplica-se a seguinte equação:

$$e_{i,reação} = e_{i,conservativa} - e_{i,mist.} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$e_{i,reação}$ = mudança da concentração do íon i (meq/L);

$e_{i,amostra}$ = concentração do íon i na amostra (meq/L);

$e_{i,mist.}$ = concentração do íon i na água do mar (obtido da fórmula anterior).

A fração de água do mar para todos os poços de Canto do Amaro e Salina Cristal foi calculada através da equação 1, cujo resultado expressa o percentual de contribuição da água marinha em cada amostra. A hidroquímica no setor de mistura foi determinada através do cálculo da mistura conservativa esperada na solução (equação 2). Posteriormente, procedeu-se a comparação com a concentração da amostra de água subterrânea (equação 3). Os resultados destes cálculos constam nas **Tabelas 6.7** (período seco) e **6.8** (período úmido).

A razão média da intrusão marinha nos poços do Grupo 1 foi de 1,78% no período seco e 2,52% no período úmido. Nos poços do Grupo 2 representou 18,44% no período seco e 20,54% no período úmido. Embora se tivesse assumido que nos poços do Grupo 1 não ocorra a intrusão salina, os cálculos realizados evidenciaram que parte da composição dessas águas é, também, influenciada pelo aporte de águas marinhas, numa proporção bastante inferior ao Grupo 2 e que podem estar contempladas dentro de uma faixa de erro inerente à modelagem simplificada adotada. Em relação a área amostral, verifica-se que a intrusão marinha age com maior intensidade na área de Salina Cristal, revelado pelo percentual de fração da água do mar nos poços dessa área (**Figura 6.10**).

Quando a água do mar avança sobre aquíferos costeiros, ocorrem reações de troca catiônica. Na metodologia adotada, os resultados negativos de $e_{i,reação}$ para os cátions revelam a influência marinha às amostras. A **Figura 6.11** mostra que, para ambos os períodos amostrais, as amostras do Grupo 2 assumem valores negativos de Na^+ e K^+ , evidenciando reações de troca iônica envolvendo estes íons.

Tabela 6.7 – Constituintes químicos da água do mar, água fresca (9-VBET-02-RN) e amostras (Grupos 1 e 2); cálculo da fração de água do mar nas amostras e concentração da mistura conservativa e da reação (troca iônica). Dados obtidos da amostragem representativa do **período seco**. Resultados expressos em meq/L (exceto quando indicado).

Íon	Água		Grupo 1			Grupo 2					
	Mar	Doce (9-VBET-02-RN)	9-VBCA-01-RN	9-VBCA-06-RN	9-VBSC-01-RN	9-VBCA-03-RN	9-VBCA-04-RN	9-VBCA-07-RN	9-VBSC-02-RN	9-VBSC-03B-RN	9-VBSC-04B-RN
Ca ²⁺	17,11	4,98	4,71	5,84	11,28	75,45	12,13	20,96	42,22	106,74	32,83
K ⁺	10,72	0,17	0,13	0,47	0,54	2,19	0,57	0,14	0,90	0,91	0,70
Mg ²⁺	121,87	4,12	3,09	7,28	11,03	76,04	13,33	6,98	49,70	101,30	27,48
Na ⁺	417,60	1,67	3,11	11,61	13,31	104,01	17,23	13,53	33,67	22,75	12,57
Cl ⁻	581,13	2,96	2,54	10,15	26,65	218,28	19,04	33,00	109,14	213,20	64,72
SO ₄ ⁻	45,94	0,48	0,16	5,63	0,16	18,22	13,56	0,70	1,93	1,18	0,33
HCO ₃ ⁻	2,29	3,95	3,25	4,35	3,05	3,25	2,85	2,55	2,25	1,60	2,05
<i>f</i> de água do mar			0,00	0,01	0,04	0,37	0,03	0,05	0,18	0,36	0,11
<i>f</i> de água do mar (%)			0,00%	1,24%	4,10%	37,25%	2,78%	5,20%	18,37%	36,37%	10,68%
Concentração do íon na mistura conservativa (e _{i,mist})	Ca ²⁺		4,97	5,13	5,47	9,46	5,31	5,60	7,19	9,35	6,26
	K ⁺		0,17	0,31	0,62	4,21	0,48	0,74	2,16	4,11	1,33
	Mg ²⁺		4,04	5,59	8,95	48,03	7,40	10,25	25,78	47,00	16,72
	Na ⁺		1,36	6,85	18,73	156,75	13,24	23,30	78,14	153,09	46,15
	Cl ⁻		2,54	10,15	26,65	218,28	19,04	33,00	109,14	213,20	64,72
	SO ₄ ⁻		0,45	1,05	2,35	17,44	1,75	2,85	8,84	17,04	5,35
	HCO ₃ ⁻		3,95	3,92	3,87	3,22	3,89	3,85	3,59	3,24	3,74
Concentração do íon na amostra (e _{i,reação})	Ca ²⁺		-0,26	0,71	5,80	65,99	6,81	15,35	35,03	97,38	26,57
	K ⁺		-0,04	0,16	-0,08	-2,02	0,10	-0,60	-1,26	-3,20	-0,63
	Mg ²⁺		-0,95	1,69	2,07	28,00	5,93	-3,27	23,93	54,30	10,77
	Na ⁺		1,75	4,77	-5,42	-52,74	3,98	-9,77	-44,47	-130,34	-33,58
	Cl ⁻		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SO ₄ ⁻		-0,29	4,58	-2,19	0,78	11,81	-2,15	-6,91	-15,86	-5,02
	HCO ₃ ⁻		-0,70	0,42	-0,82	0,03	-1,05	-1,30	-1,34	-1,64	-1,69

Tabela 6.8 – Constituintes químicos da água do mar, água fresca (9-VBET-02-RN) e amostras (Grupos 1 e 2); cálculo da fração de água do mar nas amostras e concentração da mistura conservativa e da reação (troca iônica). Dados obtidos da amostragem representativa do **período úmido**. Resultados expressos em meq/L (exceto quando indicado).

Íon	Água		Grupo 1					Grupo 2							
	Mar	Doce (9-VBET-02-RN)	9-VBCA-01-RN	9-VBCA-06-RN	9-VBCA-09-RN	9-VBSC-01-RN	9-VBSC-05-RN	9-VBCA-03-RN	9-VBCA-04-RN	9-VBCA-07-RN	9-VBCA-10-RN	9-VBSC-02-RN	9-VBSC-03B-RN	9-VBSC-04B-RN	9-VBSC-06-RN
Ca ²⁺	17,11	4,98	5,14	6,24	2,00	11,08	12,23	84,28	11,93	21,71	20,36	42,07	92,96	36,33	41,47
K ⁺	10,72	0,17	0,16	0,73	0,33	0,54	0,55	2,63	0,85	0,23	0,23	0,91	0,56	0,53	0,76
Mg ²⁺	121,87	4,12	3,43	7,71	2,04	10,53	13,50	87,31	12,84	7,04	7,12	46,49	89,78	30,04	52,25
Na ⁺	417,60	1,67	2,64	10,53	4,57	11,75	10,40	89,31	16,01	13,18	12,68	28,62	19,40	9,27	28,36
Cl ⁻	581,13	2,96	6,34	12,45	4,28	31,43	33,99	328,93	21,95	36,74	31,90	115,04	246,14	74,70	118,96
SO ₄ ⁻	45,94	0,48	0,69	5,50	1,21	0,50	0,85	11,31	12,03	0,99	0,93	3,47	2,12	0,59	2,55
HCO ₃ ⁻	2,29	3,95	4,85	6,05	3,72	4,27	4,81	5,11	4,54	4,15	3,65	3,65	2,29	3,01	3,93
<i>f</i> de água do mar			0,01	0,02	0,00	0,05	0,05	0,56	0,03	0,06	0,05	0,19	0,42	0,12	0,20
<i>f</i> de água do mar (%)			0,56%	1,61%	0,20%	4,90%	5,34%	56,38%	3,26%	5,82%	4,98%	19,37%	42,05%	12,39%	20,04%
Concentração do íon na mistura conservativa ($e_{i,mist}$)	Ca ²⁺		5,01	5,13	4,96	5,53	5,58	11,74	5,33	5,64	5,54	7,28	10,01	6,43	7,36
	K ⁺		0,24	0,35	0,20	0,71	0,75	6,28	0,53	0,81	0,71	2,27	4,73	1,52	2,35
	Mg ²⁺		4,84	6,09	4,42	9,96	10,48	70,61	8,03	11,04	10,06	27,00	53,73	18,78	27,80
	Na ⁺		3,96	8,36	2,47	22,04	23,88	236,38	15,20	25,86	22,37	82,27	176,73	53,21	85,10
	Cl ⁻		6,34	12,45	4,28	31,43	33,99	328,93	21,95	36,74	31,90	115,04	246,14	74,70	118,96
	SO ₄ ⁻		1,13	1,61	0,97	3,09	3,29	26,32	2,35	3,50	3,13	9,62	19,85	6,47	9,92
	HCO ₃ ⁻		6,04	6,00	6,06	5,87	5,85	3,77	5,93	5,83	5,86	5,28	4,36	5,56	5,25
Concentração do íon na amostra ($e_{i,reação}$)	Ca ²⁺		0,13	1,10	-2,97	5,55	6,64	72,54	6,59	16,06	14,82	34,79	82,95	29,89	34,11
	K ⁺		-0,07	0,38	0,13	-0,16	-0,20	-3,64	0,32	-0,58	-0,48	-1,36	-4,17	-0,99	-1,58
	Mg ²⁺		-1,41	1,62	-2,38	0,57	3,02	16,70	4,81	-4,01	-2,93	19,49	36,05	11,26	24,45
	Na ⁺		-1,31	2,17	2,10	-10,29	-13,48	-147,08	0,80	-12,68	-9,69	-53,65	-157,33	-43,94	-56,74
	Cl ⁻		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SO ₄ ⁻		-0,44	3,89	0,24	-2,59	-2,44	-15,01	9,69	-2,51	-2,19	-6,15	-17,73	-5,88	-7,37
	HCO ₃ ⁻		-1,20	0,06	-2,34	-1,60	-1,03	1,34	-1,39	-1,68	-2,21	-1,62	-2,06	-2,55	-1,32

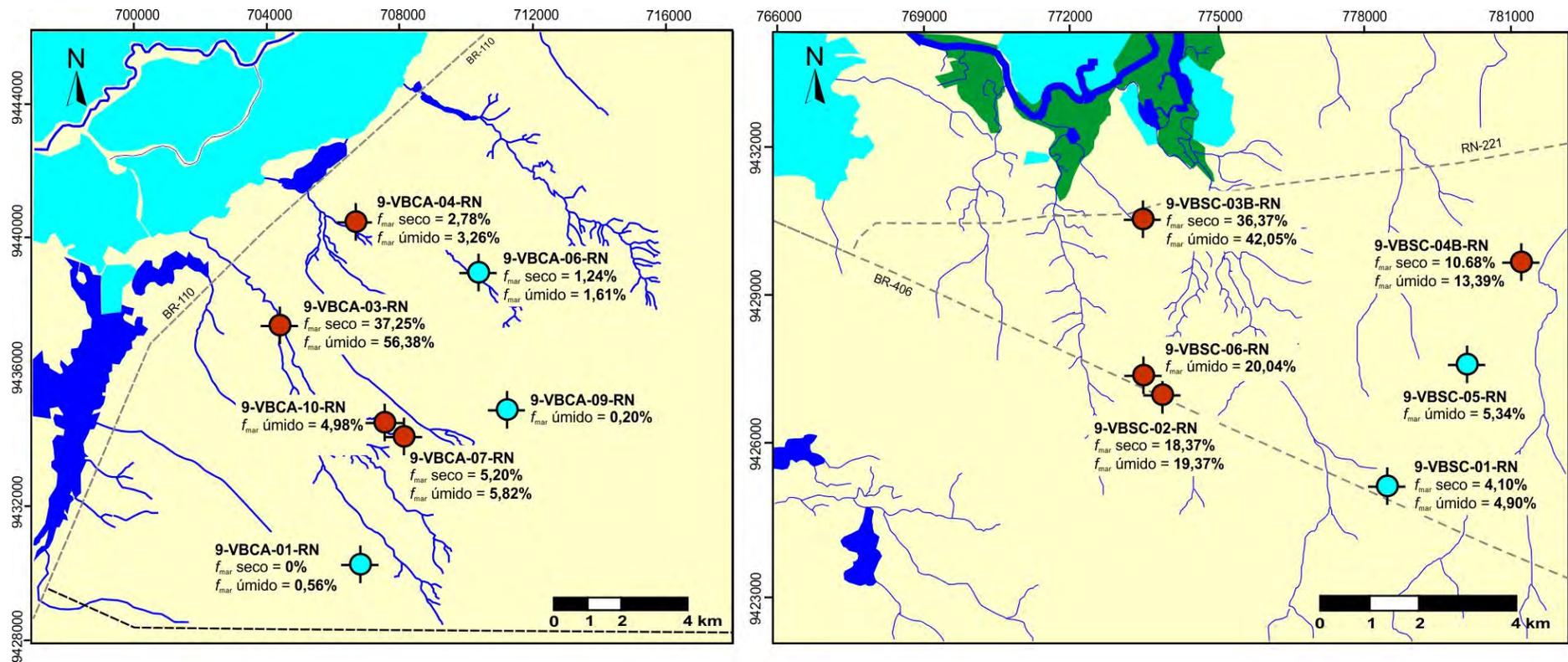


Figura 6.10 - Percentual da fração marinha nas amostras do aquífero Jandaíra (Grupo 1 e 2) no período seco e úmido, para as áreas de Canto do Amaro (esquerda) e Salina Cristal (direita).

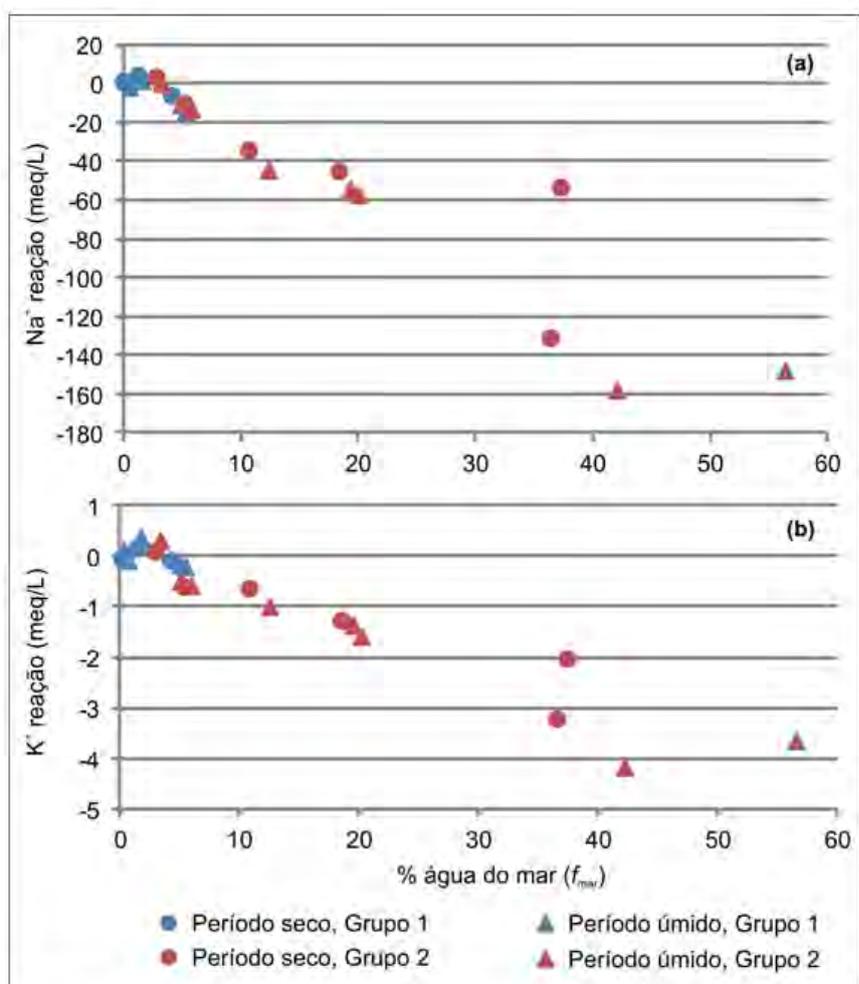


Figura 6.11 – Resultados de $e_{i, reação}$ do Na^+ e K^+ em relação ao percentual de água marinha nas amostras do Grupo 1 e 2, em ambos os períodos amostrais.

Capítulo VII: CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta de forma resumida os conhecimentos adquiridos ao longo deste estudo, que proporcionou a aquisição de novos dados no domínio da hidrogeologia e hidrogeoquímica das águas subterrâneas desse setor da Bacia Sedimentar Potiguar no RN, e que se espera possam contribuir para um melhor conhecimento dos aspectos que influenciam na geoquímica das águas no setor avaliado. As conclusões apresentadas não encerram, certamente, o objeto de estudo, uma vez que nem todas as metodologias e técnicas foram utilizadas, mas certamente constituem num referencial para um maior aprofundamento subsequente.

Para sistematizar melhor as conclusões, estas serão apresentadas sequencialmente de acordo com a estrutura com que foi elaborada esta Tese.

Hidrogeologia

O aquífero Jandaíra, de natureza livre, constitui na principal unidade rasa no âmbito estudado, considerando que se comporta espacial e geometricamente de forma contínua, mesmo apresentando composição litológica e entradas de água variáveis em profundidade. Em qualquer domínio geográfico estudado se registra a ocorrência de entradas de água saturadas no meio aquífero carbonático.

O aquífero Barreiras, estratigraficamente superior ao Jandaíra, representa um meio hidroestratigráfico poroso granular e essencialmente livre, com espessura litológica e saturada heterogênea e descontínua, compondo uma unidade amostral secundária, na qual não se registra a ocorrência de níveis saturados de forma persistente. Sua assinatura hidroquímica foi possível se caracterizar apenas localmente, e usada na comparação com a unidade amostral principal (aquífero Jandaíra).

O aquífero Jandaíra constitui um meio de porosidade cárstico-fissural. O nível estático dos poços foi registrado/estabilizado em posições mais rasas em relação às profundidades das entradas de água saturadas efetivamente interceptadas. Estas se compõem por canais, condutos, planos de estratificação, e localmente por camadas siliciclásticas mais permeáveis intercaladas nos calcários. Dessa forma, após ser interceptada a entrada de água, se dá a elevação do nível até sua posição estática de equilíbrio potenciométrico no poço.

Estes fatores sugerem mecanismos de recarga e interconexão hidráulica complexos no maciço rochoso carbonático, em que a descompressão das entradas de água saturadas provoca a ascensão do nível da água no poço, provavelmente atendendo ao princípio de comunicação dos vasos.

O nível potenciométrico em geral se situa abaixo do topo da camada aquífera carbonática, denotando um sistema aquífero livre. O aquífero Barreiras, normalmente insaturado, funciona como uma unidade de transferência e recarga do aquífero Jandaíra subjacente, considerando os excedentes infiltrados após sucessivos anos chuvosos.

A superfície potenciométrica do aquífero Jandaíra apresenta comportamento uniforme e contínuo, refletindo a ocorrência de uma rede de condutos e cavidades interligadas, impondo condições que definem um padrão regular de escoamento das águas subterrâneas que coincide com a declividade geral do terreno. Em função deste padrão, admite-se que as cavidades e condutos cársticos representem um sistema de fluxo difuso (e não em rotas preferenciais), num complexo e intrincado sistema de pequenos condutos interligados, notadamente no domínio estudado.

Hidrogeoquímica

Os componentes climáticos que imperam nesse setor da Bacia Potiguar impõem um forte controle na salinização das águas subterrâneas dos aquíferos Jandaíra e Barreiras. No que tange ao aquífero Jandaíra, objeto principal desse levantamento, a área de Salina Cristal se sobressai por apresentar águas mais salinizadas quando comparado às demais áreas de estudo, nesse caso, a média dos sólidos totais dissolvidos variou de 5870,59 mg/L (período seco) a 6492,26 mg/L (período úmido). No outro extremo, isto é, com águas de menor salinidade, destaca-se a área de Estreito, com sólidos totais dissolvidos médio variando de 828,67 mg/L (período seco) a 5116,12 mg/L (período úmido). A área de Canto do Amaro apresenta salinidade intermediária quando comparado às demais áreas de estudo, cuja média dos sólidos dissolvidos totais das águas do aquífero Jandaíra variou de 3989,74 mg/L (período seco) a 7751,20 mg/L (período úmido).

No domínio semiárido os sais se acumulam progressivamente no solo pelo efeito da alta evaporação e evapotranspiração, e dos baixos índices de precipitação pluviométrica. Em seguida são carregados com as águas de recarga ao aquífero Jandaíra. O mecanismo de concentração cíclica de sais por evaporação constitui no principal fator de salinização das águas subterrâneas no setor estudado. Com isso, há um enriquecimento progressivo da salinidade das águas subterrâneas, além daquela originada pelos processos normais de interação água-rocha.

O aumento da concentração iônica verificado na amostragem representativa do período úmido ocorre em resposta aos eventos de recarga proveniente da precipitação pluviométrica, quando as chuvas lixiviam os sais através da zona não saturada que progressivamente, ao longo do tempo, vão se acumulando na zona saturada, aumentando a salinidade das águas. Entretanto, dados às condições heterogêneas de circulação de água no domínio carbonático nem sempre essa premissa é verificada nas águas analisadas para

todos os parâmetros analisados, o que poderia ser percebido e melhor evidenciado num tempo de observação mais longo.

Dentro de cada uma das três áreas de trabalho foram evidenciadas mudanças bruscas na distribuição dos parâmetros hidroquímicos, bem como, na salinidade das águas. Esse cenário permitiu a separação de todo o conjunto amostral (para as três áreas) em dois grupos principais de águas.

As águas do primeiro grupo (Grupo 1) tem uma composição predominante do tipo bicarbonatada cloretada mista e baixa salinidade (inferior a 2257 mg/L de STD), sendo classificadas como doces a ligeiramente salobras. Nesse grupo predominam os processos de interação água-rocha, notadamente em domínio semiárido, e estão agrupadas todas as águas de Estreito e parte das amostras de Canto do Amaro e Salina Cristal especialmente as localizadas mais distantes da linha de costa.

As águas do segundo grupo (Grupo 2) são altamente mineralizadas (STD variando de 2192 a 18703 mg/L), classificadas como moderadamente salobras a salgadas, e fácies hidroquímica cloretada mista. Nesse conjunto estão agrupadas parte das águas de Canto do Amaro e Salina Cristal, notadamente as amostras obtidas dos poços localizados mais próximos da linha de costa. Esse cenário denota que a salinidade das águas do aquífero Jandaíra pode ser influenciada pela cunha salina natural. Ainda, a contribuição dos aerossóis marinhos nas águas de recarga é potencializada pela presença das salinas. Nas salinas, a água do mar é represada em grandes tanques de evaporação que captam água marinha através de canais. Sob a ação do sol e dos ventos, a água do mar represada sofre evaporação e os sais se depositam no fundo dos tanques. As salinas podem estar contribuindo para um incremento de sais na água precipitada através da evaporação dessas águas e, também, por efeito dos ventos que incidem na lâmina da água, provocando a formação de *sprays* que migram para as proximidades, influenciando desse modo os processos hidroquímicos de salinização mais acentuada observada nas áreas de Canto do Amaro e Salina Cristal.

O fenômeno de intrusão salina é natural, já que na área a captação de águas subterrâneas por poços é insignificante, e ocorre em função das baixas taxas anuais de recarga das águas subterrâneas devido às condições climáticas em domínio semiárido. Desta forma, a recarga insuficiente gera uma frente de escoamento subterrâneo com menor energia, o que induz a uma descarga subterrânea pequena ao longo da linha de costa. Diante disso, se torna incapaz de evitar o avanço e implantação da cunha salina para o interior do continente, notadamente nos setores topograficamente mais baixos. Estes aspectos também são evidenciados no aquífero Barreiras, notadamente nos poços situados próximo à linha de costa.

No modelo adotado de cálculo da influência marinha nas águas do aquífero Jandaíra foi evidenciado que a razão média de cloreto de influencia marinha nos poços do Grupo 2 representou 18,44% no período seco e 20,54% no período úmido

REFERÊNCIAS

- ABNT, 1997. NBR 13895:1997. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Construção de poços de monitoramento e amostragem. p. 21.
- ABNT, 2010. NBR 15847:2010. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento - Método de Purga. p.15.
- Alfaro, P.E., Martinez Santos, P., Castano, S. 2006. Fundamentos de Hidrogeologia. Ediciones Mundi-Prensa. Espanha.
- ANA. 2012. Agência Nacional de Águas. Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Volume IV: Hidrogeoquímica, Vulnerabilidade dos Aquíferos e Riscos de Contaminação. 152p.
- APHA, AWWA, WEF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. 21 st Edition. Washington, DC.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 1996. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema, Rotterdam.
- Berner, K.E., Berner, R.A., 1996. Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles. Prentice Hall, New Jersey.
- Bertani et al., 1990. Bertani R.T., Costa, I.G. Matos, R.M.D., 1990. Evolução Tectono-Sedimentar, Estilo Estrutural e Habitat do Petróleo na Bacia Potiguar. De Raja Gabaglia, G.P. e Milani E.J. (Coords), Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRAS.
- Castany, G. – 1975 – Prospección y explotación de las águas subterráneas. Barcelona: Omega, p. 738.
- Chan, H.J., 2001. Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. J. Hydrology 253, 194–210.
- Chapelle, F.H., 2001. Ground-water Microbiology and Geochemistry. Segunda Edição. John Wiley and Sons, Inc., New York. 477 páginas.
- Chen, K., Jiao, J. J., Huang, J., Huang, R., 2007. Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China. Environmental Pollution 147 (2007) 771-780.
- Costa, W. D., 1990. O aquífero cárstico-fissural. Notas de aula. Mestrado em Geociências. UFPE. Recife, PE.
- Custodio E. & Llamas M.R. 2001. Hidrologia Subterranea. Barcelona, Ômega, v. 2.
- Dantas, E. P., 1998. Gravimetria e Sensoriamento Remoto: Uma Aplicação ao Estudo da Tectônica Recente entre Macau e São Bento do Norte (RN). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dissertação de Mestrado, 98 páginas.
- Deller, J. W., 1999. The Handbook of Groundwater Engineering. Hardcover. 992 p

- Domenico, P.A., Schwartz, F.W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. Ed. John Wiley & Sons. New York, U.S.A.824p.
- Drever, J., 1988. The Geochemistry of Natural Waters. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- E.S. Shanyengana, M.K. Seely, R.D. Sanderson. Major-ion chemistry and ground-water salinization in ephemeral floodplains in some arid regions of Namibia. *Journal of Arid Environments*. 57 (2004) 71–83
- Farias, P.R.C., 1998. Caracterização Ambiental das Áreas de Atuação da PETROBRAS no Rio Grande do Norte. Geologia de Superfície da Área de Detalhe de Mossoró. Relatório Final. E&P RNCE – GEXP/GELAB, Comunicação Técnica 054/98.
- Fernandes, P. G., Carreira, P., da Silva, M. O., 2008 Anthropogenic sources of contamination recognition — Sines coastal aquifer (SW Portugal). *Journal of Geochemical Exploration* 98 (2008) 1–14.
- Fetter, C. W. – 1994 – Applied hydrogeology. 3ª ed. New Jersey: University of Wisconsin – Oshkosh.
- Fetter, C. W., 1999. Contaminant Hydrogeology. Segunda Edição. Prentice Hall, Upper Saddle River. 500 páginas.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. 1979. Groundwater. New Jersey: Prentice Hall, 604p.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 17, 1088–1090.
- Goldscheider, N. and Drew, D. 2007. Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology. Hardcover. 264 p.
- Grunsky, E., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, vol. 10, páginas 27-74.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., Fernandez, L., 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. *Water Research* 34, 807–816.
- Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US Geological Survey water-supply
- Hiscock, K. M., 1993. The influence of pre-Devensian glacial deposits on the hydrochemistry of the chalk aquifer system of north Norfolk, United Kingdom. *J Hydrol* 144:335–369.
- Hoaglin, D.C., Mosteller, F., e Tukey, J.W., 2000. Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. John Wiley & Sons, New York. 447 páginas.
- Hollander, M. e Wolfe, D.A., 1999. Nonparametric Statistical Methods. Segunda Edição. John Wiley & Sons, New York. 787 páginas.
- HOUNSLOW, A.W. (Ed). 1995. Water Quality Data – Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, New York, 397pp
- Hounslow, A.W., 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation. CRC Press. Boca Raton. 397.

INMET. 2007. Instituto Nacional de Meteorologia. 3º DISME. Distrito Meteorológico de Recife. Normal Climatológica de Mossoró, Macau e Assú. Série Histórica 1961-1990.

IPT, 1982. Estudo Hidrogeológico Detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)/Secretaria de Planejamento do Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 9 Vol.

Jalali, M., 2005. Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. *Environ Geol* (2005) 47: 763–772.

Jalali, M., 2007. Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example from Tajarak, western Iran. *Environ Geol* (2007) 52:1133–1149.

Jalali, M., Khanlari, Z.V., 2008. Major ion chemistry of groundwaters in the Damagh area, Hamadan, western Iran. *Environ Geol* (2008) 54:87–93.

Jalali, M., Khanlari, Z.V., 2008. Major ion chemistry of groundwaters in the Damagh area, Hamadan, western Iran. *Environ Geol* (2008) 54:87–93.

Jiang, Y., Wu, Y., Groves, C., Yuan, D. Kambesis, P., 2009. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunan, China. *J. Contaminant Hydrogeology* 109:49-61.

Mandel, S. and Shiftan, Z.L. 1981. *Groundwater Resources. Water pollution.* Academic Press Inc., U.S. 269 páginas.

Manoel Filho, J. 1971. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste. Folha nº 10 Jaguaribe NE. SUDENE. DD. Série Hidrogeologia, 30. 342p. mapas.

Matos, R.M.D., 1987. Sistema de Riftes Cretáceos do Nordeste Brasileiro. PETROBRAS/DEPEX/DEBAR. Relatório Interno, 34p.

McGarigal, K., Cushman, S., Stafford, S., 2000. *Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research.* Springer, New York. 283 páginas.

MCNEELY, R. N.; NEIMANIS, V. P.; DWYER, L., 1979. *Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parameters.* Ottawa, Canadá. 89 p.

McSween, H.Y.; Richardson, S.M.; Uhle, M.E., 2003. *Geochemistry: Pathways and Processes.* Segunda Edição. Columbia University Press. New York. 363 páginas.

Mistreta, G., 1984. O Aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar. Dissertação de Mestrado em Geociências. USP, São Paulo.

N. C. Mondal · V. S. Singh · V. K. Saxena · V. P. Singh. Assessment of seawater impact using major hydrochemical ions: a case study from Sadras, Tamilnadu, India. *Environ Monit Assess* (2011) 177:315–335

N. C. Mondal, V. P. Singh, V. S. Singh, V. K. Saxena. 2010. Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry. *Journal: Journal of Hydrology* . vol. 388, no. 1, pp. 100-111, 2010

Nielsen, D.N., Nielsen, G.L., 2007. *Technical Guidance on Low-Flow Purging & Sampling and Minimum-Purge Sampling: Second Edition.* The Nielsen Environment Field School. Galé, OH, U.S.A.

Pais, István., e Jones, J.B., 1997. *The Handbook of Trace Elements*. St. Lucie Press. Boca Raton., 223 páginas.

Pessoa Neto O. da C., Soares U.M., Silva J.G.F.da, Roesner E.H., Florêncio C.P. & Souza C.A.V. de., 2007. Bacia Potiguar. *Revista de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 357-369.

Puls, R.W. and Barcelona, M.J., 1996. Low Flow (Minimal Drawdown) Ground Water. Sampling Procedures; US EPA Ground Water Issue, EPA/540/5-95/504, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, 12 pages.

Richter, B.C., Kreitler, W.C., 1993. *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Groundwater Salinization*. CRC Press, New York ISBN 1-56670-000-0.

Richter, B.C., Kreitler, W.C., 1993. *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Groundwater Salinization*. CRC Press, New York ISBN 1-56670-000-0.

S. M. Yidana, B. Banoeng-Yakubo and T. M. Akabzaa, "Analysis of Groundwater Quality Using Multivariate and Spatial Analyses in the Keta Basin, Ghana," *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 58, No. 2, 2010, pp. 220-234.

Salama, R. B., Otto, C. J., Fitzpatrick, R. W., 1999. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization. *Hydrogeology Journal* (1999) 7:46–64.

Saleh, A., Al-Ruwiah, F. M., Shehata, M., 2001. Ground-water quality of the Nile west bank related to soil characteristics and geological setting. *J Arid Environ* 49:761–784.

SERHID. 1998a. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos do Rio Grande do Norte. Natal/RN. 78 p.

SERHID. 1998b. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Caracterização Hidroquímica dos aquíferos do Rio Grande do Norte e estudos de vulnerabilidade. Natal/RN. 52p.

Sokal, R.R.; Rohlf, F.J., 2003. *Biometry*. W.H. Freeman and Co., New York. 887 páginas

Stein, P., Melo, J. G., 2006. Potencial Hidrogeológico e Caracterização Hidrogeoquímica do Aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar no Trecho Apodi-Upanema, RN. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 11 n.3: 171-181.

Walther, J.V., 2009 *Essentials of Geochemistry*. Jones and Bartlett Publishers, Boston, 797 p.

White, William B., 1988, *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford University Press, New York, 464 p.