

PROGRAMA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS
HÍDRICOS - PROÁGUA NACIONAL
Acordo de Empréstimo Nº 7420-BR
Banco Mundial

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.

Relatório Final - RF
Volume IV

**Hidrogeoquímica,
Vulnerabilidade dos
Aqüíferos e Riscos
de Contaminação**

República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

Ministério do Meio Ambiente

Izabella Mônica Vieira Teixeira

Ministra

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Vicente Andreu – Diretor-Presidente

Dalvino Troccoli Franca

João Gilberto Lotufo Conejo

Paulo Lopes Varella Neto

Paulo Rodrigues Vieira

Superintendência de Implementação e Programas e Projetos (Coordenação)

Ricardo Medeiros de Andrade

Humberto Cardoso Gonçalves

Superintendência de Outorga e Fiscalização

Francisco Lopes Viana

Flávia Gomes de Barros

Gerência de Águas Subterrâneas

Fernando Roberto de Oliveira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Flávio Soares do Nascimento

Marco Vinicius Castro Gonçalves

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização

Carlos Alberto Martins (SEMARH/RN)

Elmo Marinho de Figueiredo (SEMARH/RN)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (ANA)

Fernando Roberto de Oliveira (ANA)

Flávio Soares do Nascimento (ANA)

Hilda Renck Teixeira (ANA)

João Lucio Faria de Oliveira (COGERH/CE)

Liduína de Carvalho Costa (SRH/CE)

Luiz Amisterdan Alves de Oliveira (SRH/CE)

Marcelo Augusto de Queiróz (CAERN/RN)

Napoleão Quesado Jr.(COGERH/CE)

Nelson César Fernandes Santos (IGARN/RN)

Nelson Paiva Raulino de Souza (FUNCEME/CE)

Paula Stein (SEMARH/RN)

Paulo Miranda Pereira (COGERH/CE)

Vera Maria Lucas Ribeiro (SEMARH/RN)

Victor Ygor Bonfim de Melo (SRH/CE)

Zulene Almada Teixeira (COGERH/CE)

Consórcio PROJETEC/TECHNE (Coordenação Geral)

João Guimarães Recena

Luiz Alberto Teixeira

Antonio Carlos de Almeida Vidon

Gerência do Contrato

Marcelo Casiuch

Membros da Equipe Técnica Executora

João Manoel Filho (Coordenador)

Admilson da Penha Pachêco

Benjamim Bley de Brito Neves

Carla Maria Salgado Vidal

Cristiana Coutinho Duarte

Edilton Carneiro Feitosa

Joaquim Mota

José do Patrocínio Tomáz Albuquerque

José Geilson Alves Demetrio

Maria Marlúcia Freitas Santiago

Marivaldo Gonçalves da Silva

Nelson da Franca Ribeiro dos Anjos

Nivaneide Alves de Melo

Paulo de Melo da Cunha Pedrosa

Roberto Kirchheim

Tiago Siqueira de Miranda

Carlos Danilo Câmara de Oliveira

Diogo Feitosa Setubal

Francisco Edjânio Rodrigues Ferreira

Pedro Vinícius de Souza

Rodrigo Holanda Ribeiro

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA

PROGRAMA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Acordo de Empréstimo N° 7420-BR

Banco Mundial

**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**

Novembro 2010

Agência Nacional de Águas – ANA
Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco B, L e M
CEP: 70610-200 , Brasília – DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Equipe:
Agência Nacional de Águas – ANA
Superintendência de Implementação de Programas e Projetos – SIP (Coordenação)
Superintendência de Outorga e Fiscalização - SOF

Elaboração e execução:
Consórcio PROJETEC-TECHNE

Todos os direitos reservados
É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

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.

Vol. IV – Hidrogeoquímica, Vulnerabilidade dos Aquíferos e Riscos de
Contaminação.

Brasília: ANA, SIP, 2010.

1. Recursos hídricos
2. Chapada do Apodi
 - I. Projeto Proágua Nacional
 - II. Agência Nacional de Águas
 - III. Consórcio PROJETEC-TECHNE.

SUMÁRIO

Apresentação	16
5 – CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS.....	18
5.1 - Introdução	19
5.2 – Metodologia.....	20
5.2.1 – Métodos de Coleta:.....	24
5.2.2 – Métodos de Análise:	25
5.2.3 - Método GOD.....	29
5.2.4 - Cálculo do Índice de Saturação	33
5.2.5 - Dureza	34
5.3 – Águas Subterrâneas do Aquífero Jandaíra.....	35
5.3.1 - Condutividade elétrica	36
5.3.2 - Zoneamento dos parâmetros químicos no aquífero Jandaíra	42
5.3.2.1 – Mapas de Condutividade elétrica.....	42
5.3.2.2 – Mapas de Cálcio	42
5.3.2.3 – Mapas de Magnésio	47
5.3.2.4 –Mapas de Sódio.....	50
5.3.2.5 – Mapas de Cloreto	50
5.3.2.6 – Mapas de Bicarbonato	55
5.3.3 - Concentração de cátions no aquífero Jandaíra	58
5.3.4 - Concentração de ânions no aquífero Jandaíra	58
5.3.5 – Dureza no aquífero Jandaíra	60
5.3.5.1 – Mapas de Dureza no aquífero Jandaíra	63
5.3.5.2 - Índices de Saturação da água em Calcita (ISC) e Dolomita (ISD).....	68
5.3.6 - Razões iônicas no aquífero Jandaíra	68
5.3.6.1 – Mapas de Razões Iônicas no aquífero Jandaíra	69
5.3.7 – Compostos nitrogenados – aquífero Jandaíra	76
5.3.8 – Tipos de água - aquífero Jandaíra	83
5.3.9 – Águas do Jandaíra para Irrigação	85
5.3.9.1 – Mapas de Classes de Água para Irrigação – aquífero Jandaíra	89
5.3.10 – Potabilidade das águas do Jandaíra.....	92
5.3.10.1 – STD, Cor e Turbidez.....	92
5.3.10.2 - Ferro, pH e Eh.....	99

5.4 – Águas Subterrâneas do Aquífero Açú e das Aluviões	104
5.4.1 - Condutividade elétrica no aquífero Açú	104
5.4.2 – Dureza no aquífero Açú	105
5.4.3 –Índices de saturação no aquífero Açú.....	106
5.4.4 -Concentração de Cátions no Aquífero Açú.....	108
5.4.5 -Concentração de Ânions no Aquífero Açú.....	108
5.4.6 - Razões iônicas do Açú	111
5.4.7 - Compostos Nitrogenados no Açú	114
5.4.8 – Tipos de água no Açú	116
5.4.9 – Águas do Açú para irrigação.....	118
5.4.10 – Potabilidade das águas do Açú.....	119
5.4.10.1 – STD, Cor e Turbidez.....	119
5.4.10.2 - Ferro, pH e Eh.....	120
5.5 - Isótopos ambientais	123
5.6 - Metais pesados	127
5.7 - Agrotóxicos	130
5.8 – BTEX e fenóis	132
5.9 - Análises bacteriológicas	137
5.10 - Classes de águas.....	137
5.11 – Vulnerabilidade dos aquíferos	143
5.12 – Mapa de risco de contaminação do aquífero Jandaíra	144
5.13 –Recomendações.....	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 -. Distribuição global das amostras coletadas por aquífero, município e por tipo de análise (set/09).....	22
Tabela 5.2 -. Distribuição global das amostras coletadas por aquífero, por município e por tipo de análise (jan/10).....	23
Tabela 5.3 - Limites de quantificação das análises no Laboratório de Hidroquímica e Bacteriologia do Departamento de Física da UFC:	26
Tabela 5.4 - Valores máximos permitidos de metais pela Resolução 396 (CONAMA, 2008).	26
Tabela 5.5 .- Valores máximos permitidos para nitrito, nitrato e cloreto pela Resolução 396 (CONAMA, 2008).	27
Tabela 5.6 - Valores Máximos Permitidos para Cor, pH, Turbidez e Coliformes pela Portaria 518 do Ministério da Saúde (MS, 2004).....	27
Tabela 5.7 - Valor máximo permitido de BTEX em águas	28
Tabela 5.8 – Pesos dos parâmetros GOD, índice e classe de vulnerabilidade na área do Projeto Apodi.....	30
Tabela 5.9 – Classificação águas segundo a sua faixa de valor de dureza (FNS 1999).....	34
Tabela 5.10 - Estatística de parâmetros analisados em águas do aquífero Jandaíra.	35
Tabela 5.11 – Distribuição probabilidade lognormal da CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ do aquífero Jandaíra em set/09 e jan/10.	41
Tabela 5.12 - Valores Máximos Permitidos de Cl^- acordo com a resolução 396 do CONAMA (2008).	59
Tabela 5.13 – Distribuição de probabilidade lognormal da dureza mg/L (CaCO_3) das águas do aquífero Jandaíra em set/09 e jan/10.	60
Tabela 5.14 – Frequência dos valores de dureza do aquífero Jandaíra em set/09.	62
Tabela 5.15 – Frequência dos valores de dureza do aquífero Jandaíra em jan/10.	62
Tabela 5.16 - Estatística das razões iônicas nas amostras das águas do aquífero Jandaíra.	68
Tabela 5.17 - Restrições quanto às concentrações de nitrito e nitrato (CONAMA, 2008).	77

Tabela 5.18 – Frequência dos teores de compostos nitrogenados no aquífero Jandaíra	80
Tabela 5.19 – Frequência dos tipos de água no aquífero Jandaíra	84
Tabela 5.20 – Frequência das classes de água para irrigação no aquífero Jandaíra	87
Tabela 5.21 - Classificação das águas de acordo com STD.....	92
Tabela 5.22 – Frequência de STD no aquífero Jandaíra segundo faixas de água doce, salobra e salgada.	92
Tabela 5.23 - Incerteza associada a cada faixa de leitura de cor. (APHA, 1998).	96
Tabela 5.24 – Frequência da cor das águas do aquífero Jandaíra	96
Tabela 5.25 - Incerteza associada a cada faixa de leitura de turbidez (APHA,1998).	98
Tabela 5.26 – Frequência de turbidez das águas do aquífero Jandaíra	98
Tabela 5.27 – Frequência de ferro nas amostras de água do aquífero Jandaíra	101
Tabela 5.28 - Estatística de parâmetros analisados em águas do aquífero Açú.	104
Tabela 5.29 – Razões iônicas de águas do aquífero Açú.....	111
Tabela 5.30 - Metais pesados em 45 amostras do aquífero Jandaíra 07 do aquífero Açú.....	129
Tabela 5.31 – Amostras com resíduo de agrotóxico. * (EPA/USA, 2010).....	130
Tabela 5.32 – Frequência do índice de fenóis nos aquíferos Jandaíra e Açú	133
Tabela 5.33 – Resultados de análises bacteriológicas	137
Tabela 5.34 – Valor numérico do índice de risco com base na vulnerabilidade natural e no número de fontes potenciais de poluição cadastradas em 2009.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1 - Pluviometria do ano de 2008 nos municípios Baraúna, Mossoró, Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte.	19
Figura 5.2 - Mapa de localização de pontos de coleta de águas subterrâneas para análise hidroquímica.	21

Figura 5.3 - Diagrama para avaliação do índice GOD de vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster <i>et al.</i> 2006).....	31
Figura 5.4 - Planos de informação do mapa de vulnerabilidade natural elaborado em plataforma SIG usando dados obtidos pelo método GOD (Foster <i>et al.</i> 2006).	32
Figura 5.5 - Condutividade elétrica em amostras do aquífero Jandaíra nos municípios de Baraúna e Mossoró, coleta 1 (set/09) e coleta 2 (jan/10).....	37
Figura 5.6 - Condutividade elétrica em amostras do aquífero Jandaíra nos municípios de Jaguaruana e Quixeré/Limoeiro do Norte, coleta 1 (set/09) e coleta 2 (jan/10).....	38
Figura 5.7 – Histogramas de Condutividade Elétrica do aquífero Jandaíra: a) valores até 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$; b) valores maiores do que 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$	39
Figura 5.8 – Histogramas de frequência e lei lognormal de probabilidade ajustada aos valores de CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ do aquífero Jandaíra em set/09.....	40
Figura 5.9 – Histogramas de frequência e lei lognormal de probabilidade ajustada aos valores de CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ do aquífero Jandaíra em jan/10.....	40
Figura 5.10 - Mapa de zoneamento da condutividade elétrica das águas do aquífero Jandaíra (set/09).	43
Figura 5.11 - Mapa de zoneamento da condutividade elétrica das águas do aquífero Jandaíra (jan/10).	44
Figura 5.12 - Mapa de zoneamento de cálcio no aquífero Jandaíra –(set/09). 45	
Figura 5.13 - Mapa de zoneamento de cálcio no aquífero Jandaíra (jan/10). . 46	
Figura 5.14 - Mapa de zoneamento de magnésio no aquífero Jandaíra (set/09).	48
Figura 5.15 - Mapa de zoneamento de magnésio no aquífero Jandaíra (jan/10).	49
Figura 5.16 - Mapa de zoneamento de sódio no aquífero Jandaíra (set/09). .. 51	
Figura 5.17 - Mapa de zoneamento de sódio no aquífero Jandaíra (jan/10). .. 52	
Figura 5.18 - Mapa de zoneamento de cloreto no aquífero Jandaíra (set/09). 53	
Figura 5.19 - Mapa de zoneamento de cloreto no aquífero Jandaíra (jan/10). 54	
Figura 5.20 - Mapa de zoneamento de bicarbonato no aquífero Jandaíra (set/09).....	56
Figura 5.21 - Mapa de zoneamento de bicarbonato no aquífero Jandaíra (jan/10).....	57

Figura 5.22 - Histograma de frequência e lei lognormal de distribuição de probabilidade da dureza das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra em set/09.	60
Figura 5.23 - Histograma de frequência e lei lognormal de distribuição de probabilidade da dureza das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra em jan/10.	61
Figura 5.24 - Histogramas de frequência dos índices de saturação das águas do aquífero Jandaíra em set/09 e jan/10: a) em relação à calcita; b) em relação à dolomita.....	63
Figura 5.25 - Mapa de zoneamento de dureza das águas no aquífero Jandaíra (set/09).	64
Figura 5.26 - Mapas de zoneamento de dureza das águas no aquífero Jandaíra (jan/10).	65
Figura 5.27 - Distribuição espacial da dureza no aquífero Jandaíra segundo as categorias de águas moles a muito duras (set/09).....	66
Figura 5.28 - Distribuição espacial da dureza no aquífero Jandaíra segundo as categorias de águas moles a muito duras (jan/10).....	67
Figura 5.29 - Mapa de zoneamento da razão iônica rMg^{2+}/rCa^{2+} nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).	70
Figura 5.30 - Mapa de zoneamento da razão iônica rMg^{2+}/rCa^{2+} nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).	71
Figura 5.31 - Mapa de zoneamento da razão iônica rNa^+/rCl^- nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).	72
Figura 5.32 - Mapa de zoneamento da razão iônica rNa^+/rCl^- nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).	73
Figura 5.33 - Mapa de zoneamento da razão iônica $rCl^-/rHCO_3^-$ nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).	74
Figura 5.34 - Mapa de zoneamento da razão iônica $rCl^-/rHCO_3^-$ nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).	75
Figura 5.35 - Compostos nitrogenados; (a) amônia, (b) nitrito (c) nitrato em águas do aquífero Jandaíra.....	78
Figura 5.36 - Mapa de zoneamento do nitrato nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).....	81
Figura 5.37 - Mapa de zoneamento do nitrato nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).....	82

Figura 5.38 - Diagrama de Piper com as amostras do aquífero Jandaíra coletadas em set/10 e jan/10.....	83
Figura 5.39 - Diagrama de Razão de Adsorção de Sódio – Aquífero Jandaíra.	85
Figura 5.40 - Diagrama de Razão de Adsorção de Sódio – Aquífero Jandaíra contaminado pela língua salgada do vale do Apodi.	86
Figura 5.41 - Histograma de classes de água para irrigação do aquífero Jandaíra conforme diagrama RAS vs CE.....	88
Figura 5.42 - Histograma com a classificação das águas do aquífero Jandaíra para uso na agricultura.....	89
Figura 5.43 - Mapa de zoneamento da qualidade das águas do aquífero Jandaíra para irrigação (set09).	90
Figura 5.44 - Mapa de zoneamento da qualidade das águas do aquífero Jandaíra para irrigação (jan10).	91
Figura 5.45 – Mapa de classe de STD indicando a distribuição espacial das águas doces, salobras e salgadas no aquífero Jandaíra em set/09.....	93
Figura 5.46 – Mapa de classe de STD indicando a distribuição espacial das águas doces, salobras e salgadas no aquífero Jandaíra em jan/10.....	94
Figura 5.47 – Histograma de frequência de Sólidos Totais Dissolvidos no aquífero Jandaíra.	95
Figura 5.48 – Histograma de frequência de cor das águas do aquífero Jandaíra.	97
Figura 5.49 - Histograma de turbidez das águas do aquífero Jandaíra.....	99
Figura 5.50 – Histograma de frequência de Fe nas águas do aquífero Jandaíra.	101
Figura 5.51 - Histograma de frequência de pH nas águas do aquífero Jandaíra.	102
Figura 5.52 - Histograma de Eh das águas do aquífero Jandaíra.	103
Figura 5.53 - Histogramas de Condutividade Elétrica de águas do aquífero Açú em set/09 e jan/10.....	105
Figura 5.54 – Histograma de dureza das águas do aquífero Açú em jan/10.	105
Figura 5.55 - ISC vs dureza e ISD vs dureza em jan/10 - aquífero Açú.	106
Figura 5.56 - ISC vs CE e ISD vs CE em jan/10 - aquífero Açú.	107
Figura 5.57 - ISC e ISD em cada poço do aquífero Açú em jan/10.	108

Figura 5.58 – Histogramas de frequência dos valores das concentrações de cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} Na^+ e K^+ em amostras do aquífero Açú em jan/10.....	109
Figura 5.59 – Histogramas de frequência da concentração de ânions no aquífero Açú em jan/10.	110
Figura 5.60 - Histogramas de frequência de razões iônicas nas águas do aquífero Açú (set/09).....	112
Figura 5.61 - Histogramas de frequência de Razões iônicas no aquífero Açú em jan/10.....	113
Figura 5.62 - Compostos nitrogenados aquífero Açú, em jan/10.....	114
Figura 5.63 - Compostos nitrogenados; (a) amônia, (b) nitrito (c) nitrato em águas do aquífero Açú.	115
Figura 5.64 - Diagrama de Piper, poços no Açú, coleta 1 (set/09) e coleta 2 (jan/10).....	116
Figura 5.65 - Tipos de água do aquífero Açú.	117
Figura 5.66 - Diagrama de Razão de Adsorção de Sódio – Aquífero Açú, set/09 e jan/10 e do aquífero Quebradas (jan/10).....	118
Figura 5.67 - STD em amostras do aquífero Açú (jan/10).....	119
Figura 5.68 – Histograma de Cor da água em amostras do aquífero Açú (jan/10).....	120
Figura 5.69 - Turbidez em amostras do aquífero Açú (jan/10).	121
Figura 5.70 - Histogramas de pH das águas do aquífero Açú em set/09 e jan/10.	121
Figura 5.71 – Histograma de valores de Eh em amostras de água do aquífero Açú em set/09 e (jan/10).	122
Figura 5.72 - $\delta^{18}\text{O}$ vs δD com amostras do aquífero Jandaíra nas duas coletas, set/09 e jan/10.....	124
Figura 5.73 - $\delta^{18}\text{O}$ vs δD com amostras do aquífero Açú confinado, fontes e aquífero Quebradas.....	124
Figura 5.74 – Condutividade elétrica vs δD com amostras do aquífero Jandaíra nas duas coletas, set/09 e jan/10.	125
Figura 5.75 - Mapa de localização de pontos de coleta de águas subterrânea para análise isotópica.....	126
Figura 5.76 - Número de amostras de água com ocorrência de metais pesados no aquífero Jandaíra.	127

Figura 5.77 - Número de amostras de água com ocorrência de metais pesados no aquífero Açú.....	128
Figura 5.78 – Mapa de localização dos pontos de coleta para análise de metais pesados.....	131
Figura 5.79 - Mapa de localização dos pontos de coleta para análise de agrotóxicos.....	134
Figura 5.80 - Mapa de localização dos pontos de coleta para análise de BTEX e fenóis.....	135
Figura 5.81 - Índice de fenóis em águas dos aquíferos Jandaíra e Açú.....	136
Figura 5.82 - Número de amostras por classe nas águas do Jandaíra em set/09 e jan/10, considerando íons maiores, ferro, STD, dureza, cor e turbidez.	138
Figura 5.83 - Número de amostras por classe nas águas das duas coletas no Jandaíra considerando as análises físico-químicas e também considerando as análises de metais pesados, agrotóxicos, índice de fenóis e bactérias.	139
Figura 5.84 - Número de amostras por classe nas águas do aquífero Açú considerando as análises físico-químicas e também considerando as análises de metais pesados, agrotóxicos, índice de fenóis e bactérias.	139
Figura 5.85 - Mapa de classes de água para o aquífero Jandaíra na coleta de set/09.	140
Figura 5.86 - Mapa de classes de água para o aquífero Jandaíra na coleta de jan/10.	141
Figura 5.87 - Mapa de classes de água para o aquífero Açú.	142
Figura 5.88 - Número de amostras por profundidade do nível de água	143
Figura 5.89 - Histogramas de Índice de Vulnerabilidade em set/09 e jan/10 (> 0,7 vulnerabilidade extrema, > 0,5 a 0,7 vulnerabilidade alta e > 0,3 a 0,5 vulnerabilidade média)	144
Figura 5.90 - Mapa de vulnerabilidade natural do aquífero Jandaíra à contaminação em 2009.	145
Figura 5.91 - Mapa do risco de contaminação no aquífero Jandaíra em 2009.	145

Apresentação

Neste volume IV do Relatório Final são descritos os serviços correspondentes à caracterização hidrogeoquímica e da vulnerabilidade e risco de contaminação dos Aquíferos, cujo objetivo é o reconhecimento das principais características qualitativas dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Apodi, como base para o adequado planejamento do uso desses recursos. Os referidos serviços incluem:

- ✓ **Seleção de pontos de amostragem:** a seleção de uma rede de 100 pontos de amostragem de variáveis ligadas à química das águas foi feita pela CTAF em conjunto com a CONSULTORA dentro da rede de pontos cadastrados.
- ✓ **Campanhas de amostragem de água:** A primeira campanha aconteceu no período de 15 de julho a 15 de outubro, durante a fase em que ainda estavam sendo instalados os tubos guia para acesso dos medidores. A segunda campanha foi desenvolvida no período de 15 de janeiro a 30 de janeiro de 2010.
- ✓ **Coleta de amostras e realização de análises:** descreve o número de coletas, os tipos de amostragem e as quantidades de amostras de águas subterrâneas coletadas nos aquíferos, Jandaíra, Açu e Aluvionar.
- ✓ **Interpretação dos resultados analíticos:** os resultados expressos nos boletins de análises físico-químicas básicas e de análises específicas das amostras de água coletadas, são interpretados de conformidade com o previsto nos termos de referência.
- ✓ **Elaboração de mapas de zoneamento hidrogeoquímico:** são apresentados e descritos os mapas de distribuição espacial dos parâmetros hidrogeoquímicos analisados.
- ✓ **Elaboração de mapas de risco à contaminação e de vulnerabilidade:** apresenta e descreve esses mapas conforme previsto nos TDRs.

5 – CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS

5.1 - Introdução

Este capítulo trata da caracterização da qualidade das águas subterrâneas armazenadas nos aquíferos Jandaíra e Açú, (na Bacia Potiguar: Chapada do Apodi e vizinhança).

Como já explicado no **item 9.8.3**, os períodos em que foram realizadas as amostragens de água não foram os mais adequados para caracterizar os efeitos da sazonalidade. De fato, as condições climáticas anuais na região são irregulares e se caracterizam, **em média**, pela ocorrência de dois períodos: **um chuvoso** com máximos em **março-abril** e um período de **estiagem** com mínimos em **outubro-novembro**. Para o ano de 2008 (**figura 5.1**), o período chuvoso foi de 6 (seis) meses (janeiro a junho) e o período de estiagem também de 6 (seis) meses (julho a dezembro), situação que praticamente se repetiu em 2009. O mês de janeiro de 2010 apresentou baixa precipitação e mal chegou a caracterizar o início do período chuvoso. Assim, os mapas de zoneamento de parâmetros químicos nas duas campanhas de amostragem de água (set/09 e jan/10) permitiram identificar apenas parcialmente, em setores dos aquíferos livres (Jandaíra e aluvião), diferenças significativas de qualidade das águas subterrâneas passíveis de serem atribuídas à sazonalidade, ao mesmo tempo em que evidenciaram a heterogeneidade do meio aquífero livre.

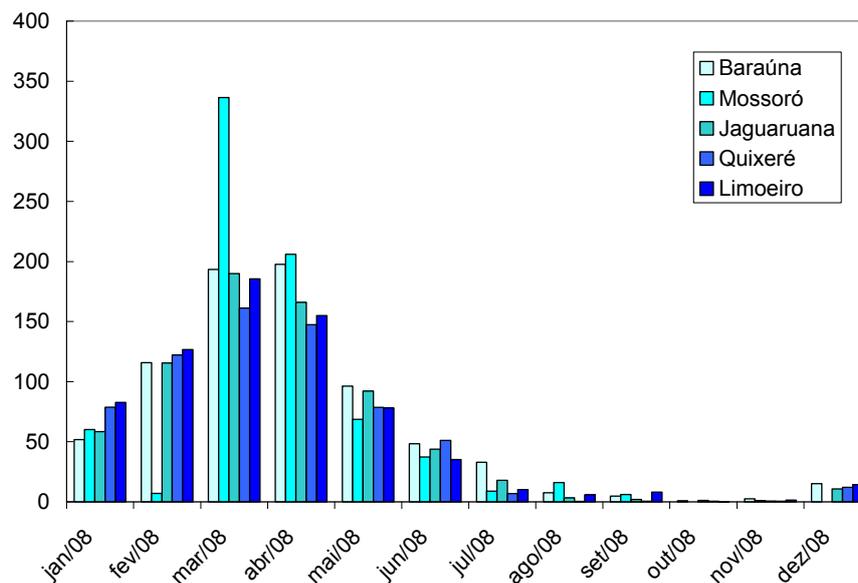


Figura 5.1 - Pluviometria do ano de 2008 nos municípios Baraúna, Mossoró, Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte.

As medidas de isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério das águas subterrâneas, mostraram que em condições naturais de circulação as águas do Jandaíra e do Açú são isotopicamente diferentes, posto que as águas do Açú são paleoáguas e não recebem recarga do ciclo hidrológico atual, como acontece com o aquífero Jandaíra. As águas recentes no Açú indicadas pelos dados isotópicos são

atribuídas a filtrações verticais condicionadas pela dinâmica dos processos de fluxo e de transporte entre esses aquíferos, governada “*in loco*” pelos **rebaixamentos produzidos em poços de abastecimento público que se acham em bombeamento**.

Existem evidências de fortes contribuições através de filtrações verticais para as águas bombeadas do aquífero Açu em Mossoró, deduzidas da análise dos volumes de água bombeados desse aquífero entre 1967 e 1997 e ainda da presença de carbonatos nas águas captadas a grandes profundidades. Teoricamente, apenas 20% da água bombeada em 30 anos seriam provenientes do armazenamento do aquífero confinado. Os 80% restantes seriam oriundos de filtrações verticais das camadas superiores, incluindo as camadas arenosas do aquífero Açu superior e o próprio calcário Jandaíra, por vias ainda não conhecidas. Os carbonatos ocorrem em alguns poços e “contaminam” a qualidade da água aquífero Açu, além de obstruir tubulações.

Essas evidências, contudo, permanecem ainda sem explicação convincente, e dificilmente poderão ser esclarecidas com base no conhecimento adquirido no âmbito do projeto Apodi. Há necessidade de investigações específicas através de piezômetros multinível para amostragens de água e medições de fluxo a diferentes profundidades, incluindo análises isotópicas, datações e uso de traçadores.

Isto é o que se deduz de estudos recentes realizados nos Estados Unidos (Landon *et al.* 2010) em baterias de poços profundos de abastecimento público de água os quais tratam do mesmo assunto e reforçam a convicção de que contribuições significativas por fluxos verticais em pelo menos alguns poços do aquífero Açu em Mossoró estejam ocorrendo. Em um dos casos estudados, na área de Modesto (Califórnia), 75% do fluxo bombeado era proveniente das partes superiores e médias dos poços, ou seja, era fluxo vertical.

Finalmente, Landon *et al.* (2010) concluem que os dados de química e de fluxo levantados a diferentes profundidades em piezômetros multinível construídos na **zona de contribuição** (ZOC) do poço bombeado, foram essenciais para o entendimento da existência de **caminhos preferenciais de fluxo (“short-circuit pathways”)** de contaminantes para os poços em 3 (três) diferentes áreas investigadas. Afirmam ainda que esse conhecimento é básico para a definição de estratégias de monitoramento e proteção das águas subterrâneas.

5.2 – Metodologia

A rede de amostragem qualitativa, constituída de 100 pontos de coleta de água é ilustrada no mapa da **figura 5.2**. Na primeira campanha (set/09) foram coletadas 168 amostras de água subterrânea, sendo 161 no aquífero Jandaíra, 1 (uma) no aquífero Açu e 6 (seis) em Aluviões (**tabela 5.1**). Na segunda campanha (jan/10), o total de amostras chegou a 219, das quais 175 no aquífero Jandaíra (167 em poços e 8 em fontes), 39 no aquífero Açu e 5 (cinco) em Aluviões (**tabela 5.2**). De um total previsto de 360 análises, acabaram sendo realizadas 387.

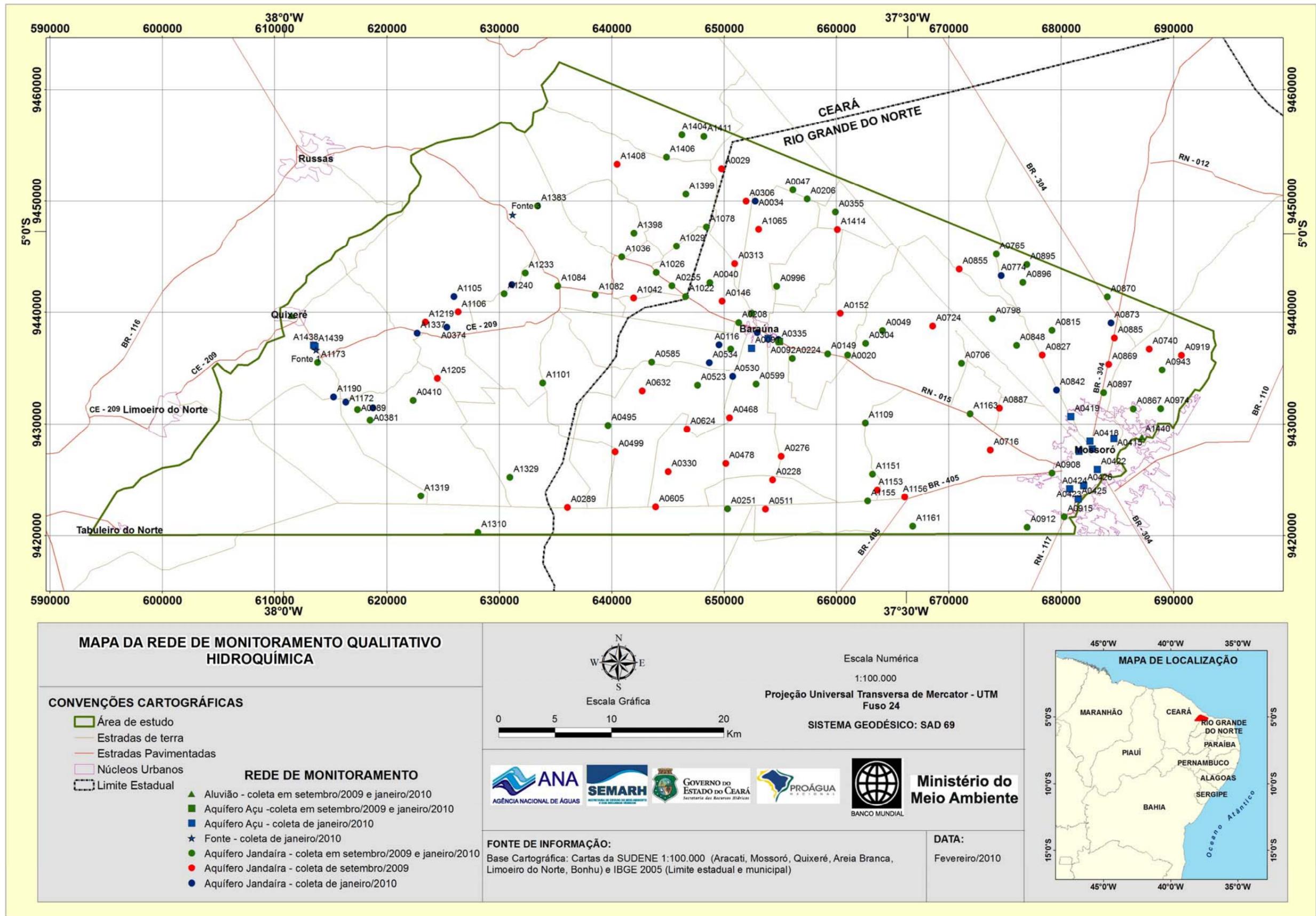


Figura 5.2 - Mapa de localização de pontos de coleta de águas subterrâneas para análise hidroquímica.

Tabela 5.1 - Distribuição global das amostras coletadas por aquífero, município e por tipo de análise (set/09).

Município	Aquífero			Total
	Jandaíra	Açu confinado	Aluvionar	
Baraúna	42 Hidroquímica 06 Metais 04 Agrotóxicos 06 BTEX 05 Isótopos	01 Hidroquímica		43 Hidroquímica 06 Metais 04 Agrotóxicos 06 BTEX 05 Isótopos
Mossoró	30 Hidroquímica 04 Metais 01 Agrotóxico 04 BTEX 05 Isótopos		01 Hidroquímica 01 Metal 01 BTEX	31 Hidroquímica 05 Metais 01 Agrotóxico 05 BTEX 05 Isótopos
Jaguaruana	09 Hidroquímica 03 Isótopos			09 Hidroquímica 03 Isótopos
Quixeré	14 Hidroquímica 05 Metais 04 Agrotóxicos 06 BTEX 05 Isótopos		01 Hidroquímica 01 Metal 01 Agrotóxico 01 BTEX	15 Hidroquímica 06 Metais 05 Agrotóxicos 06 BTEX 05 Isótopos
Limoeiro	02 Hidroquímica 02 Metais 02 BTEX 02 Isótopos			02 Hidroquímica 02 Metais 02 BTEX 02 Isótopos
Total	97 Hidroquímica 17 Metais 09 Agrotóxicos 18 BTEX 20 Isótopos	01 Hidroquímica	02 Hidroquímica 02 Metais 01 Agrotóxicos 01 BTEX	100 Hidroquímica 19 Metais 10 Agrotóxicos 19 BTEX 20 Isótopos

Em janeiro de 2010, outro conjunto de 99 amostras de água subterrânea da bacia Potiguar foi coletado nos mesmos municípios da coleta de set/09, sendo 83 do aquífero Jandaíra, sendo 80 de poços e 03 de fontes (**tabela A5.2b**); 13 do aquífero Açu confinado e 01 do Aquitarde Quebradas (**tabela A5.2c**), 02 de aluvião (**tabela A5.2d**).

O número de pontos amostrados e o tipo de análise das amostras de cada município são apresentados na **tabela 5.2**. Quando foi possível, os locais da coleta de jan/10 foram os mesmos da coleta set/09.

Tabela 5.2 - Distribuição global das amostras coletadas por aquífero, por município e por tipo de análise (jan/10).

Município	Aquífero				Fonte
	Jandaira	Açu confinado	Aquitarde Quebradas	Aluvionar	
Baraúna	29 Hidroquímica 09 Metais 10 Agrotóxicos 09 BTEX 02 Isótopos 04 Bactérias	03 Hidroquímica 02 Metais 02 Agrotóxicos 03 BTEX 02 Isótopos			
Mossoró	23 Hidroquímica 05 Metais 03 Agrotóxicos 07 BTEX 05 Isótopos 04 Bactérias	10 Hidroquímica 05 Metais 04 Agrotóxicos 05 BTEX 03 Isótopos		01 Hidroquímica 01 Metal 01 BTEX	
Jaguaruana	08 Hidroquímica 03 Agrotóxicos 01 Isótopo 01 Bactéria				
Quixeré	16 Hidroquímica 05 Metais 03 Agrotóxicos 05 BTEX 04 Isótopos 01 Bactéria		01 Hidroquímica 01 Metal 01 Agrotóxico 01 BTEX 01 Isótopo	01 Hidroquímica 01 Metal 01 Agrotóxico 01 BTEX 01 Bactéria	01 Hidroquímica 01 Isótopo
Limoeiro	04 Hidroquímica 02 Metais 02 BTEX 02 Isótopos				
Russas					01 Hidroquímica 01 Metal 01 Agrotóxico 01 Isótopo
Tabuleiro					01 Hidroquímica 01 Isótopo
Total	80 Hidroquímica 21 Metais 19 Agrotóxicos 23 BTEX 14 Isótopos 10 Bactérias	13 Hidroquímica 07 Metais 06 Agrotóxicos 08 BTEX 05 Isótopos	01 Hidroquímica 01 Metal 01 Agrotóxico 01 BTEX 01 Isótopo	02 Hidroquímica 02 Metais 01 Agrotóxico 02 BTEX 01 Bactéria	03 Hidroquímica 01 Metal 01 Agrotóxico 03 Isótopos

5.2.1 – Métodos de Coleta:

Hidroquímica

Para análise dos íons maiores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3 e HCO_3^- , dos compostos nitrogenados NH_4^+ , NO_2^- e NO_3^- , da dureza, dos sólidos totais dissolvidos (STD) e do ferro total e dos parâmetros físico-químicos pH, Eh, condutividade elétrica (CE), turbidez e cor, as águas foram coletadas em garrafas de 2L, lavadas com a água do próprio poço e armazenadas sob refrigeração. A coleta da água foi feita nos poços após bombeamento mínimo de cinco minutos.

Para a análise dos íons maiores não é necessário utilizar preservante, mas elas devem ser analisadas dentro do prazo de validade correspondente a cada parâmetro; 07 dias para cloreto, dureza total, cálcio e magnésio, 14 dias para alcalinidade e 28 dias para sulfato. Os compostos nitrogenados devem ser analisados em 48 h, o pH e a condutividade elétrica em 24 horas (APHA, 2005).

Metais pesados

A coleta foi feita em recipientes apropriados fornecidos pelo Laboratório de Análise, e as amostras acondicionadas em caixas de isopor, conservadas em gelo e enviadas em 24 horas ao Laboratório. Para preservação da amostra, HNO_3 (pH <2) deve ser adicionado (APHA, 2005).

Agrotóxicos

As amostras foram armazenadas em garrafas de vidro escuro de 4 L fornecidas pelo Laboratório de Análise. Foram conservadas no gelo em caixas de isopor e enviadas em 24 horas para o laboratório.

BTEX e Fenóis

A coleta foi feita em recipientes apropriados fornecidos pelo Laboratório de Análise. As amostras foram acondicionadas em caixas de isopor, conservadas no gelo e enviadas em 24 horas ao laboratório.

Isótopos Ambientais

Para a análise de oxigênio-18 e deutério foram coletados 30 mL em recipientes que impedem evaporação.

Bactérias

Para a análise bacteriológica, as amostras foram armazenadas em recipientes especiais esterilizados de 100 mL. Como as medidas devem ser feitas no mesmo dia, todos os equipamentos necessários para análise foram levados à área de estudo, onde um laboratório provisório foi montado.

5.2.2 – Métodos de Análise:

Hidroquímica

As análises dos parâmetros Ca^{2+} , dureza total (consequentemente Mg^{2+}), HCO_3^- , CO_3^{2-} e Cl^- que são titulométricas e a turbidez, cor, pH, Eh, condutividade elétrica e NO_3^- foram determinadas no mesmo dia da coleta em laboratório improvisado na sede em Mossoró. As outras medidas foram realizadas no Laboratório de Hidroquímica do Departamento de Física da UFC, no intervalo máximo de 7 dias entre coleta e análise. Os métodos utilizados para efetuar as análises foram (APHA, 1992):

- ✓ Ca^{2+} - Determinação complexiométrica.
- ✓ Dureza total – Determinação complexiométrica.
- ✓ Mg^{2+} - Determinação indireta através da dureza.
- ✓ Na^+ - Leitura direta usando fotometria de chama.
- ✓ K^+ - Leitura direta usando fotometria de chama.
- ✓ HCO_3^- - Determinação por acidimetria.
- ✓ CO_3^{2-} - Determinação por acidimetria.
- ✓ Cl^- - Determinação volumétrica com AgNO_3 .
- ✓ NO_3^- - Determinação pelo método espectrofotométrico do NITRAVER em $\lambda = 500 \text{ nm}$.
- ✓ NH_3^+ - Determinação pelo método espectrofotométrico em $\lambda = 415 \text{ nm}$.
- ✓ NO_2^- - Determinação pelo método espectrofotométrico em $\lambda = 520 \text{ nm}$.
- ✓ Fe - Determinação pelo método espectrofotométrico em $\lambda = 510 \text{ nm}$.
- ✓ Cor - Determinação pelo método espectrofotométrico em $\lambda = 410 \text{ nm}$.
- ✓ SO_4^{2-} - Determinação por turbidimetria e leitura em $\lambda = 420 \text{ nm}$.
- ✓ pH – Medida feita no campo com ph-metro portátil.
- ✓ Eh - Medida feita no campo com ph-metro portátil.
- ✓ CE – condutividade elétrica – medida feita no campo com condutímetro portátil.
- ✓ Turbidez – medida feita com turbidímetro.

Curvas de calibração

Foram elaboradas para os diferentes tipos de determinação, tanto fotométricas como espectrofotométricas, mostraram coeficientes de correlação da ordem de 0,99, enquanto as análises titulométricas foram realizadas sempre em duplicata, com diferença de valores na faixa de 0-5%.

Erro e Limite de Detecção: (tabela 5.3).

Os resultados das análises tiveram erros de balanço iônico abaixo daqueles admissíveis pela literatura, estando de acordo com o perfil de qualidade exigida pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 1998). O balanço iônico foi feito através da equação (Logan, 1965):

$$\text{Erro } 1 = 100 \times \frac{[\sum(\text{cátions}) - \sum(\text{ânions})]}{[\sum(\text{cátions}) + \sum(\text{ânions})]}$$

Tabela 5.3 - Limites de quantificação das análises no Laboratório de Hidroquímica e Bacteriologia do Departamento de Física da UFC.

	LD (mg/L)		LQ (mg/L)
Ca ²⁺	0,8	Fe	0,01
Dureza	2,0	NH ₄ ⁺	0,20
HCO ₃ ⁻	2,4	NO ₂ ⁻	0,02
Cl ⁻	1,0	NO ₃ ⁻	0,05
Na ⁺	0,5	SO ₄ ²⁻	1,00
K ⁺	1,0		

Em 17 amostras da primeira coleta (8 com ≈ 5%) e 30 amostras na segunda coleta (8 com ≈ 5%) o erro está acima de 5%. De acordo com o Standard Methods (APHA, 2005) quando isso acontece, as amostras devem ser reanalisadas e se a relação entre cátions e ânions for mantida deve existir na amostra a presença de cátions e/ou ânions que não foram analisados.

Os resultados dos balanços iônicos das análises hidroquímicas estão apresentados na **tabela A5.13**.

Enquadramento das águas subterrâneas

Foi feito com base na Resolução N^o 396 do CONAMA (2008) que utiliza para classificar as águas, como um dos conceitos, o Valor Máximo Permitido (VMP) apresentado nas **tabelas 5.4** e **5.5**. Para os parâmetros não citados nesta Resolução, foi utilizada a Portaria 518 do Ministério da Saúde (MS, 2004) com valores mostrados na **tabela 5.6**.

Tabela 5.4 - Valores máximos permitidos de metais pela Resolução 396 (CONAMA, 2008).

Parâmetro	VMP (mg/L)		Parâmetro	VMP (mg/L)	
	Consumo humano	Irrigação		Consumo humano	Irrigação
Bário	0,7	-	N - Nitrato	10	-
Cádmio	0,005	0,01	Nitrato	45	-
Chumbo	0,01	5,0	N- Nitrito	1,0	1,0
Cloreto	250	100-700	Nitrito	3,3	3,3
Cobre	2,0	0,2	Sódio	200	-
Cromo	0,05	0,1	STD	1.000	-
Coliformes	ausência		Sulfato	250	-
Ferro	0,3	5,0	Zinco	5,0	24

Tabela 5.5 - Valores máximos permitidos para nitrito, nitrato e cloreto pela Resolução 396 (CONAMA, 2008).

Uso	VMP em mg/L		
	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
Consumo Humano	3,3	45	250
Dessedentação de animais	33	405	-
Irrigação	3,3	-	100 – 700
Recreação	3,3	45	400

Tabela 5.6 - Valores Máximos Permitidos para Cor, pH, Turbidez e Coliformes pela Portaria 518 do Ministério da Saúde (MS, 2004).

Parâmetro	VMP	Parâmetro	VMP
Cor	15 uH	pH	6,0 a 9,5
E. Coli*	Ausente	Turbidez	5,0 uT

Metais pesados

As análises dos metais pesados foram feitas no Laboratório da Bioagri Ambiental, em Piracicaba. As amostras foram analisadas para identificar a presença dos metais pesados alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), boro (B), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), níquel (Ni) zinco (Zn) e índice de fenóis utilizando a metodologia do APHA (1998).

Os metais foram analisados pela metodologia de análise de cátions inorgânicos para ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Methodology Mass Spectrometry) da USEPA 6020 (U.S. Environmental Protection Agency). O índice de fenol foi analisado pela metodologia USEPA SW846-9065.

Agrotóxicos

As medidas de agrotóxicos foram realizadas no ITEP (Instituto de Tecnologia de Pernambuco), no Laboratório de Análises de Resíduos de Agrotóxicos. A metodologia utilizada é a do APHA (1992) e são analisados 197 compostos:

Acefato, aldrin, aletrina, azinfós etílico, azinofós metílico, azoxistrobina, aldicarbe (sulfona e sulfóxido), aldicarbe, acetamipride, aldicarbe, ametrina, bifentrina, bioaletrina (1 e 2), bitertanol, boscalide, bromopropilato, bromuconazol, buprofezina, captana, carbaril, carbenzadina, carbofenotona, carbofurano, carbosulfano, ciflutrina, cimoxanil, cipermetrina, ciproconazol, ciromazina, clordano, clorfenvinfós, clorfenapir, clofentazina, clorotalonil, clorpirifós, clorpirifós metílico, cresoxim metílico, clofentezina, ciprodinil, DDT total, deltametrina, desmetil, diazinona, diclovós, dicofol, dieldrin, difenoconazol, dimetoato, dimetomorfe, dissulfotm, diclofluanida, diniconazol, diurom, dodemorfe, dazomete, endosulfam, endrim,

esfenvarelato, espinosade (A e D), etiona, etoprofós, etefom, etrinfós, epoxiconazol, espiroxamina, etiofencarbe (sulfona e sulfóxido), etofenproxi, fenamifós, fenitrotiona, fenpropatina, fentiona, fentoato, fenvarelato, fipronil, fluasifope-p-butílico, flutriafol, folpete, forato, furatiocarbe, famoxadona, fenpiroximato, fosalona, fosmete, fenazaquina, fenhexamide, flusilazone, fostiazato, HCB, HCH, 3-hidroxi-carbofurano, heptacloro, heptacloro hepóxido, imazalil, imidacloprido, iporovalicarbe, hexaconazol, iprodiona, lambdacialotrina, lindano, linurom, malaoxana, malationa, metamidofós, metidationa, mevinfós, miclobutanil, mirex, monocrotofós, metalaxil, metconazol, metiocarbe (sulfona e sulfóxido), nuarimol, l-naftol, ometoato, oxifluorfem, oxadixil, paraoxona metílica, parationa etílica, parationa metílica, paraoxona etílica, permetrina (cis e trans), pirazofós, pirimofós etílico, pirimofós metílico, metomil, penconazol, piraclostrobina, piridabem, procimidona, procioraz, profenofós, propargito, propiconazol (I e II), paciobutrazol, pencicuirom, pirimicarbe, pirimicarbe, piridafentiona, pirifenox, pirimetanil, piriproxifem, propoxur, quinalfós, quintozeno, tebuconazol, terbufós, tetradifona, tiabendazol, tiametoxam, tiodicarbe, triazofós, triclorfom, trifluralina, triadimefom, triadimenol, triflumizol total, tetraconazol, tiaclopride, tiobencarbe, tebufenpirade, tridemorfe, trifloxistrobina, vamidotiona (sulfona e sulfóxido), vinclozolina.

BTEX

Os BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil-Benzeno, Xileno), junto com os metais, também foram analisados no Laboratório da Bioagri Ambiental, em Piracicaba.

Esses contaminantes têm limites permitidos em águas, muito restritivos e severos, estabelecidos pelos órgãos governamentais americanos (EPA) e no Brasil, através de Portaria do Ministério da Saúde (MS, 2004) e de Resolução do CONAMA (2008), conforme **tabela 5.7**.

Tabela 5.7 - Valor máximo permitido de BTEX em águas.

Hidrocarboneto	CONAMA (2008)	Brasil (MS-518/2004)
Benzeno	0,005	0,005
Tolueno	1,0	0,170
Etil-Benzeno	0,7	0,200
Xilenos	10,0	0,300

Isótopos

As medidas de oxigênio-18 e deutério foram feitas no Laboratório de Geoquímica Isotópica do Departamento de Geoquímica e Recursos Naturais, UnB, Brasília com erro das medidas de $\pm 1\%$ para o hidrogênio e de $\pm 0,1\%$ para o oxigênio.

Bactérias

Seguiu-se o procedimento padrão do método calorimétrico.

As amostras coletadas em recipientes assépticos de 100 mL são manuseadas na presença de fogo de um bico de Bunsen até que seja selado. Adiciona-se o reagente (Colilert) ao frasco com água que é agitado até a completa dissolução dos grânulos.

A solução é colocada em uma cartela composta de quarenta e nove cúpulas maiores e quarenta e oito cúpulas menores; a cartela é colocada em uma seladora e a solução é distribuída igualmente e incubada a 35°C em estufa por 24 horas.

O resultado é positivo para coliformes totais quando aparece coloração amarela na cartela; para coliformes termotolerantes (fecais) o resultado é positivo quando a coloração amarela na cartela se apresenta fluorescente na presença de lâmpada ultravioleta. Os resultados são expressos em NMP (número mais provável em 100 mL de água).



Adição de colilert à amostra



Cartela



Seladora da cartela.

5.2.3 - Método GOD

O acrônimo GOD derivado de **G**roundwater **O**ccurrence and **D**epth (Foster & Hirata 1988), é um método qualitativo de avaliação do **grau de vulnerabilidade à contaminação** (*insignificante, baixo, médio, alto, extremo*) através de um *índice de vulnerabilidade* estimado com base no diagrama da **figura 5.3** e usando o conhecimento adquirido na área de estudo sobre os 3 (três) parâmetros de ENTRADA seguintes:

- **Parâmetro G:** O tipo de **ocorrência da água subterrânea**, classificado segundo índices variáveis de 0 a 1. Caracteriza a *facilidade de acesso* do contaminante à zona saturada, no sentido hidráulico.
- **Parâmetro O:** **Litologia e grau de consolidação do meio poroso**, classificado segundo índices compreendidos entre 0,3 e 1. Caracteriza a *capacidade de depuração* das camadas na zona não saturada, estimada pelo teor de argilas.
- **Parâmetro D:** **Distância à água**, determinada pela profundidade do nível freático do aquífero livre ou profundidade do teto do aquífero confinado, e classificada segundo índices variáveis de 0,3 a 0,9.

Como parâmetro de SAÍDA, dado pelo produto dos parâmetros de ENTRADA obtém-se o **índice de vulnerabilidade do aquífero (Iv)**

Forma, pesos e classificação

Na avaliação do índice de vulnerabilidade natural (Iv) foram incluídas apenas as formações geológicas aflorantes: Açú, Jandaíra e cobertura de Barreiras. A forma, pesos e classificação são mostradas na **tabela 5.8**.

Tabela 5.8 – Pesos dos parâmetros GOD, índice e classe de vulnerabilidade na área do Projeto Apodi.

Plano	Parâmetro	Açú Aflorante no setor A1 Bacia do Jaguaribe	Jandaíra cárstico no Setor A2 Bacia do Mata Fresca	Jandaíra com cobertura de Barreiras no Setor A3 Bacia do Apodi
1	G	0,6	0,9	0,6
2	O	0,5	0,9	0,75
3	D	0,8	0,9	0,8
4	Iv	0,24	0,73	0,36
5	Classe	Baixa	Extrema	Média

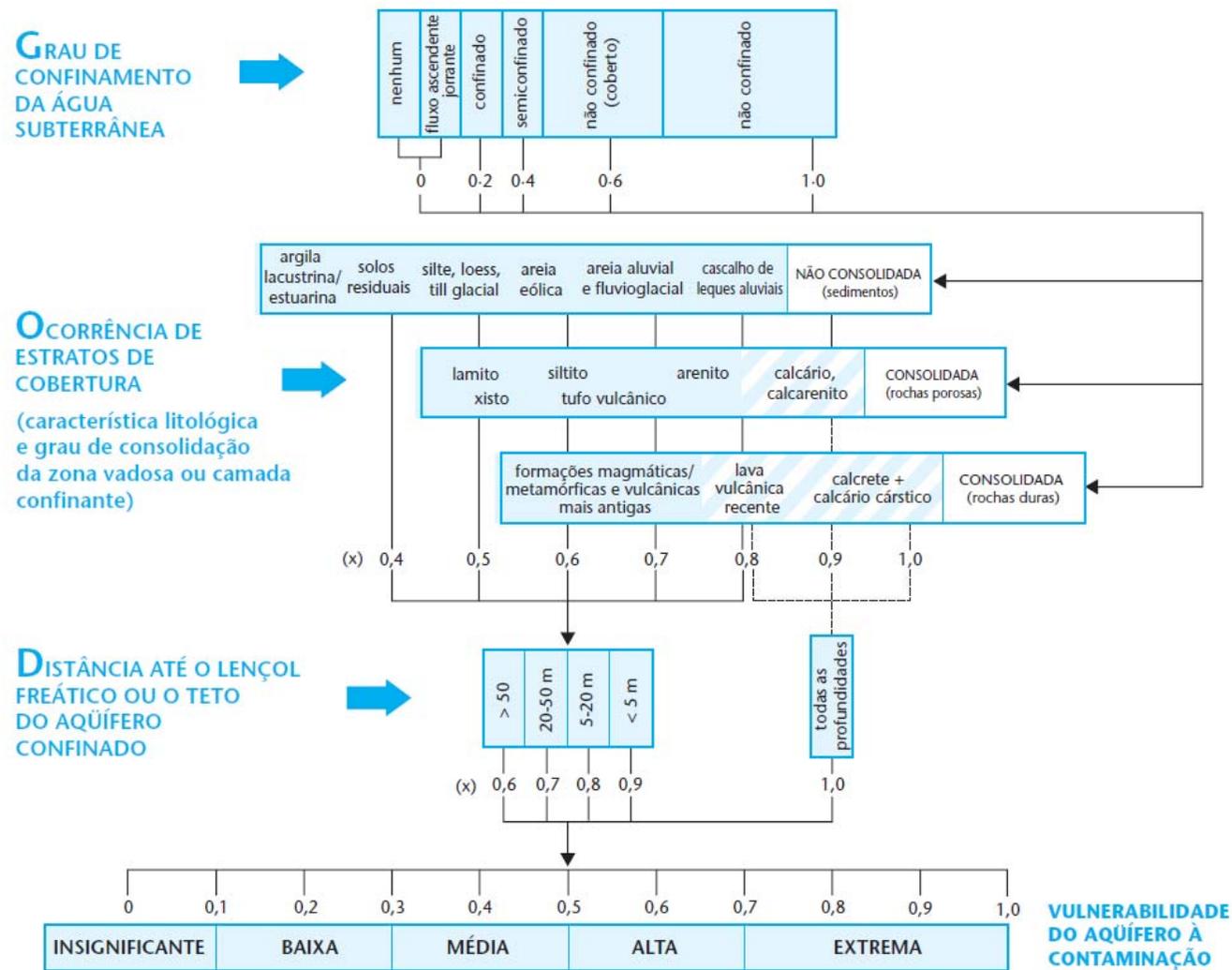


Figura 5.3 – Diagrama para avaliação do índice GOD de vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster *et al.* 2006).

Para fins de gestão da água subterrânea, principalmente no que se refere à garantia de sua qualidade para os diversos usos, além da **vulnerabilidade natural** do aquífero é preciso conhecer o **risco** ou **perigo** de contaminação. Para tanto foi realizado na área de estudo um **cadastro de fontes de contaminação** e feitas amostragens de **cargas contaminantes** (tabelas 5.1 e 5.2).

Nesse cadastro foram levantadas, as **causas** ou atividades causadoras da contaminação (Ex: urbanização, mineração, agricultura, indústria, etc); **os tipos** de fontes de contaminação (lixões, aterros sanitários, esgotos, extração mineral, defensivos agrícolas, fertilizantes, estações de serviço, efluentes industriais, etc).

Produção do mapa de vulnerabilidade usando o GOD

Em plataforma SIG o mapa de vulnerabilidade é produzido conforme ilustra a **figura 5.4**.

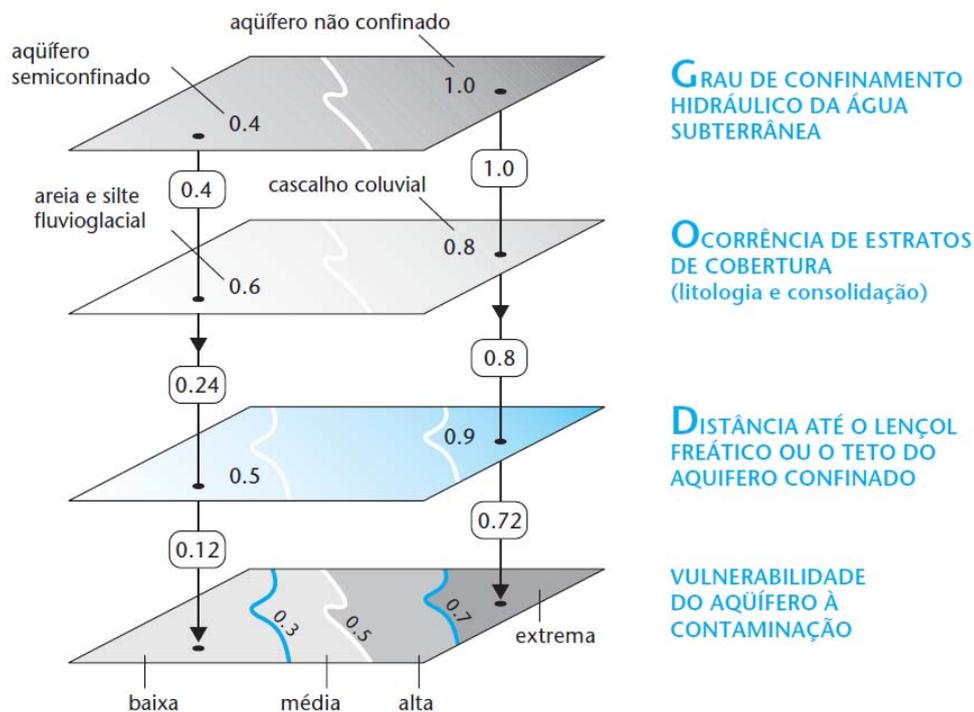


Figura 5.4 – Planos de informação do mapa de vulnerabilidade natural elaborado em plataforma SIG usando dados obtidos pelo método GOD (Foster *et al.* 2006).

No caso em estudo o *mapa de vulnerabilidade natural* foi elaborado no ArcGis com os dados da **tabela 5.8** e da **tabela A5.12**. Os resultados são discutidos e apresentados no **item 5.11**.

5.2.4 - Cálculo do Índice de Saturação

O índice de saturação, IS é definido através da seguinte equação (Appelo & Postma, 1999):

$$IS = \log (Q/K_{ps})$$

Sendo K_{ps} , o produto de solubilidade do sólido $A_n B_{-n}$ definido como:

$$K_{ps} = [A^{+}]^n [B^{-n}]$$

E Q, o produto de atividade dos íons A^{+} e B^{-} dissolvidos definido como:

$$Q = a_{(A)n} \cdot a_{(B)-n}$$

Onde:

$$a_i = \gamma_i [A]$$

$$\text{Log } \gamma_i = 0,5091 Z_i^2 \sqrt{I}$$

$$I = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 m_i$$

Sendo:

a_i : atividade

[A]: concentração

γ_i : fator de proporcionalidade.

I: atividade iônica

Z_i : valência

m_i : concentração

Para a calcita, o índice de saturação é dado por:

$$ISC = - 1,98 + \text{pH}_{\text{med}} + a_{\text{Ca}} + a_{\text{HCO}_3^-}$$

E para a dolomita, o índice de saturação é dado por:

$$ISD = 0,37 + \text{pH}_{\text{med}} + a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}} + a_{\text{HCO}_3^-}$$

Em termos mais simples ($IS = \text{pH}_{\text{med}} - \text{pH}_{\text{teo}}$). Ou seja, o índice de saturação de uma água (por exemplo, do aquífero Jandaíra) é dado pela diferença entre o pH medido e o pH teórico que a água teria se estivesse em equilíbrio com a calcita (o carbonato de cálcio $\text{CaCO}_{3(s)}$).

Quando

$IS = 0$ a água está em equilíbrio com o $\text{CaCO}_{3(s)}$ (calcário ou calcita);

$IS < 0$ a água está subsaturada de $\text{CaCO}_{3(s)}$ e tende a dissolver o calcário $\text{CaCO}_{3(s)}$ (fase sólida existente);

IS > 0 a água está supersaturada de $\text{CaCO}_{3(s)}$ e tende a precipitar $\text{CaCO}_{3(s)}$ para atingir a igualdade, mas a velocidade pode ser tão pequena que a solução pode se manter supersaturada

5.2.5 - Dureza

A dureza da água mede o grau de impedimento da ação do sabão e pode ser expressa como dureza temporária, dureza permanente e dureza total. A dureza temporária ou dureza de carbonatos é causada pelos íons de cálcio e de magnésio que se combinam com o bicarbonato e o carbonato, podendo ser eliminada com a ebulição da água.

A dureza permanente ou dureza não carbonatada é a dureza que persiste após a fervura da água; é produzida pelos íons de cálcio e de magnésio, que se combinam com os íons de sulfato, cloreto, nitrato e outros. A dureza total é a soma da dureza temporária com a dureza permanente e é usualmente expressa em mgCaCO_3/L e dada pela equação:

$$\text{Dureza total} = 2,5(\text{Ca}^{2+}) + 4,1(\text{Mg}^{2+})$$

A **tabela 5.9** apresenta a classificação de uma água de acordo com a sua faixa de valor de dureza.

Tabela 5.9 – Classificação águas segundo a sua faixa de valor de dureza (FNS, 1999).

Faixa de dureza mgCaCO_3/L	0-70	70-150	150-300	>300
Tipo de água	Mole	Moderadamente dura	Dura	Muito dura

5.3– Águas Subterrâneas do Aquífero Jandaíra

A **tabela 5.10** mostra a estatística dos parâmetros analisados nas águas do aquífero Jandaíra. Os resultados para esses constituintes estão apresentados na **tabela A5.2a** (1ª campanha) e **tabela A5.2b** (2ª campanha).

Tabela 5.10 - Estatística de parâmetros analisados em águas do aquífero Jandaíra.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
CE < 4500 µS/cm					
CE (µS/cm)	1677	782	177	4300	1450
Dureza (mg/L)	497,3	156,1	30	960	470
Ca ²⁺ (mg/L)	135,4	62,1	4,0	472	132
Mg ²⁺ (mg/L)	55,0	59,0	2,4	529,4	37,7
Na ⁺ (mg/L)	137,1	133,1	6,6	927,5	86,3
K ⁺ (mg/L)	8,9	7,2	2,9	61,3	6,8
Cl ⁻ (mg/L)	338,7	408,9	24,1	2584,2	212,1
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	66,2	77,6	1,0	710,2	41,5
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	385,7	187,7	14,3	758,1	437,4
Fe (mg/L)	0,43	1,2	0	8,8	
Turbidez (uT)	1,9	2,0	0,4	9,5	1,0
Cor (uH)	21,4	32,5	0	211,4	9,0
pH	6,8	0,4	5	9,9	6,8
CE > 4500 µS/cm					
CE (µS/cm)	6932	2020	4590	13120	6870
Dureza (mg/L)	1600,4	458,1	1080	2620	1420
Ca ²⁺ (mg/L)	241,5	124,5	64,0	456,0	208,0
Mg ²⁺ (mg/L)	171,0	115,1	19,4	432,5	140,9
Na ⁺ (mg/L)	549,7	103,3	58,8	1726,9	380,3
K ⁺ (mg/L)	27,1	30,5	3,5	135,0	13,2
Cl ⁻ (mg/L)	1497,9	1110,1	135,0	3895,5	1263,2
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	95,8	64,0	20,5	300,1	81,5
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	262,1	210,4	14,3	685,2	247,9
Fe (mg/L)	0,05	0,06	0,0	0,21	0,03
Turbidez (uT)	2,42	2,29	0,46	8,7	1,6
Cor (uH)	14,6	17,0	1,8	68,0	9,0
pH					

Especificamente para os parâmetros turbidez, cor, CE, pH e Eh, os resultados estão na **tabela A5.3a** (1ª campanha) e na **tabela A5.3b** (2ª campanha).

5.3.1 - Condutividade elétrica

A condutividade elétrica expressa quantitativamente a capacidade da água conduzir corrente elétrica; depende da concentração total das substâncias dissolvidas ionizadas e de sua mobilidade que, por sua vez, depende da temperatura na qual a medida é realizada. Para o consumo humano, é importante que a água tenha uma condutividade entre 50 e 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Ela é considerada como um bom critério na avaliação do grau de mineralização da água, contribuindo para o estudo do efeito de diversos íons sobre o equilíbrio químico, sobre o sistema fisiológico das plantas e animais e sobre a taxa de corrosão.

Sua determinação dá uma estimativa do conteúdo de sólidos totais dissolvidos em uma amostra. Pode-se estimar os sólidos totais dissolvidos (STD) em mg/L , utilizando a equação (Metcalf & Eddy, 1991):

$$\text{STD} = 0,64 \text{ CE}$$

As **figuras 5.5** e **5.6** mostram os histogramas de frequência dos valores de condutividade elétrica no aquífero Jandaíra medidos nas duas campanhas de amostragem, nos municípios de Baraúna, Mossoró, Jaguaruana e Quixeré. Na segunda campanha, os valores para os municípios de Quixeré e Limoeiro do Norte foram englobados em um único histograma. No aquífero Jandaíra, os valores medidos em poços em set/09, se encontram na **tabela A5.3a**; os valores medidos em poços e fontes em jan/10 estão na **tabela A5.3b**; para o aquífero Quebradas e aquífero Açú na **tabela A5.3c** e para o aquífero aluvial na **tabela A5.3d**. O agrupamento dos poços nos municípios de Quixeré e Limoeiro do Norte foi feito porque com duas amostras de Limoeiro do Norte não é possível fazer distribuição estatística; além disso, estas duas amostras estão dentro da faixa de distribuição dos parâmetros medidos nas amostras de Quixeré. No histograma do município de Mossoró foi retirada a amostra do poço A0019 que tem $\text{CE} = 29.100 \mu\text{S}/\text{cm}$ e localiza-se próximo a uma salina. Das 30 amostras de água subterrânea em Mossoró, 23 tinham valores de até $5.000 \mu\text{S}/\text{cm}$. 06 amostras tinham valores na faixa de 5.000 a $10.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ e em uma $29.100 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Considerando somente os valores abaixo de $5.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ observa-se que predominam águas com CE entre 1.000 e $2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Considerando os pontos amostrados, Mossoró apresenta as águas mais salinas, seguido por Baraúna e Jaguaruana; nos municípios do Ceará estão as águas menos salinas. Destaca-se uma amostra em Quixeré (RG1551) com $\text{CE} = 177 \mu\text{S}/\text{cm}$ e $\text{pH} = 5,0$.

A **figura 5.7** mostra o histograma de frequência da condutividade elétrica no aquífero Açú. Os valores de CE (**tabela A5.3c**), situam-se na faixa de 460 a $660 \mu\text{S}/\text{cm}$, portanto, bem mais baixos do que nas amostras do Jandaíra.

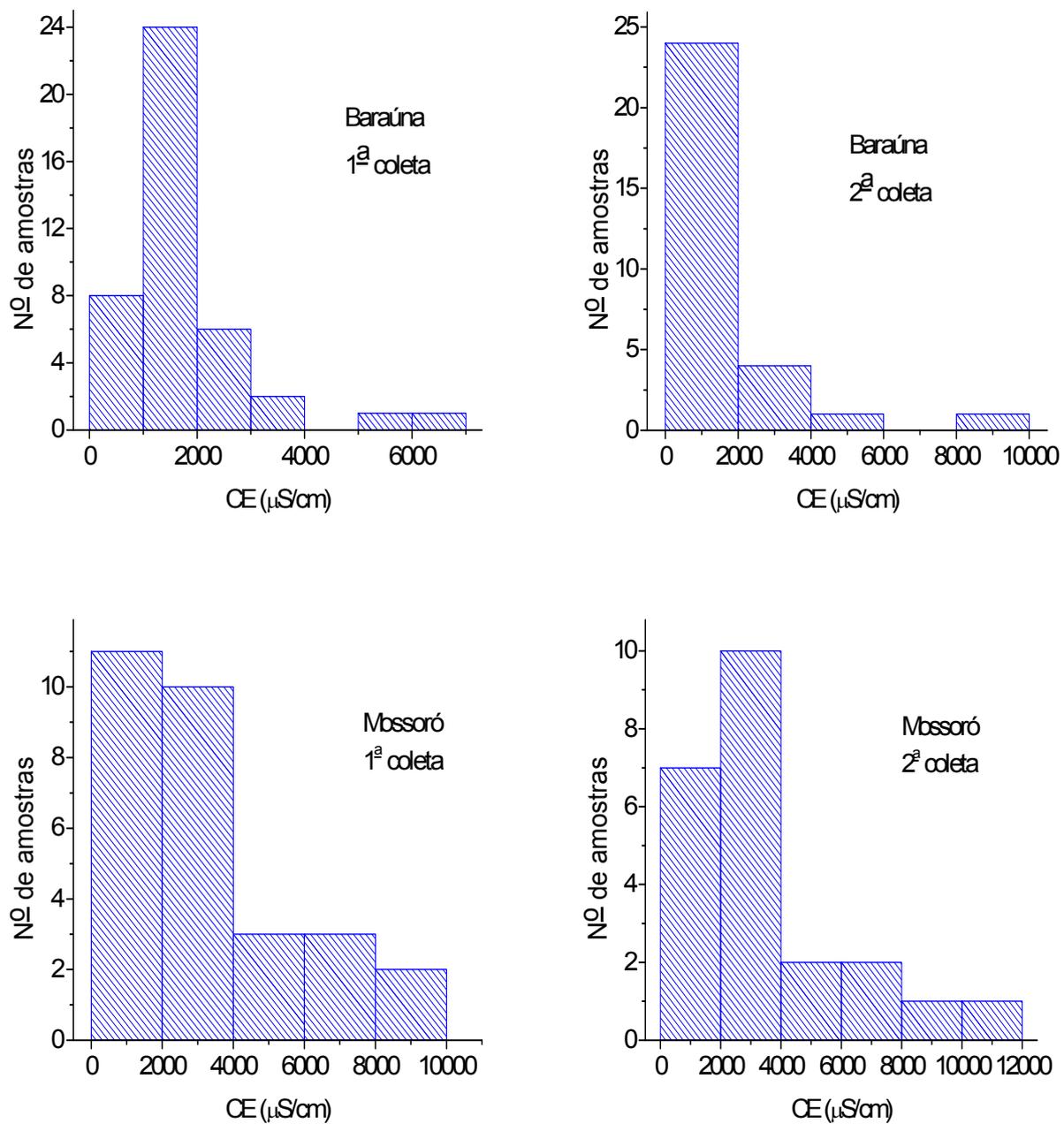


Figura 5.5 - Condutividade elétrica em amostras do aquífero Jandaíra nos municípios de Baraúna e Mossoró, coleta 1 (set/09) e coleta 2 (jan/10).

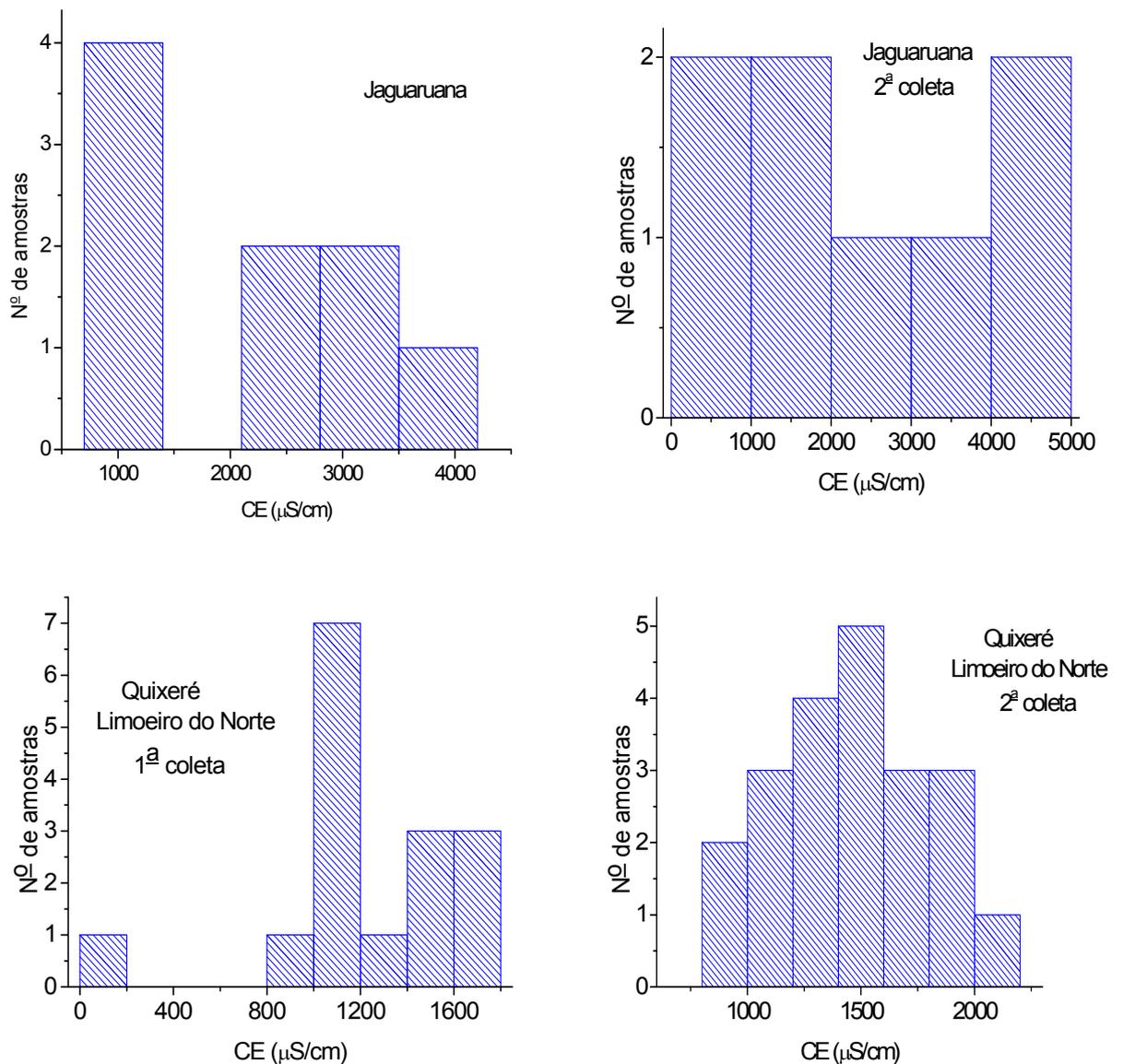


Figura 5.6 - Condutividade elétrica em amostras do aquífero Jandaíra nos municípios de Jaguaruana e Quixeré/Limoeiro do Norte, coleta 1 (set/09) e coleta 2 (jan/10).

A **condutividade elétrica (CE $\mu\text{S/cm}$)** é proporcional à salinidade das águas e consequentemente, define a adequação da água aos diferentes usos. Foi observado que as amostras de água do aquífero Jandaíra com mais elevados valores de CE são 15 de Mossoró, 03 de Baraúna e 02 de Jaguaruana.

Apenas no município de Mossoró e locais próximos, foram encontrados valores bastante elevados de CE. Em ordem decrescente os valores mais altos são dos locais: A0919 (29.100 $\mu\text{S/cm}$), A0974 (13.120 e 10.490 $\mu\text{S/cm}$), A0943 (9.670

$\mu\text{S/cm}$), A0867 (9490 e 8530 $\mu\text{S/cm}$). Os dois valores entre parênteses se referem às duas coletas. Essas amostras foram inicialmente interpretadas como águas fora do padrão do aquífero Jandaíra, ou seja, como provavelmente misturadas com água de outra origem (marinha) ou ação antrópica (salinas de Mossoró), como de fato acontece.

Daí a razão da separação do conjunto amostral em dois subconjuntos: um primeiro com 158 valores de $\text{CE} < 4.500 \mu\text{S/cm}$ e um segundo contendo 19 amostras com $\text{CE} > 4.500 \mu\text{S/cm}$. Ademais, a amostra coletada no aquífero Jandaíra com $\text{CE} = 29100 \mu\text{S/cm}$, do poço A0919, localizado em uma salina em Mossoró, foi julgada anômala e descartada para reduzir a dispersão dos valores.

O resultado dessa estatística truncada das medidas de condutividade elétrica das amostras do aquífero Jandaíra é ilustrado nos histogramas na **figura 5.7**. Mesmo assim, nota-se que o histograma do primeiro subconjunto (**figura 5.7a**) sugere uma distribuição lognormal típica para os valores de $\text{CE} < 4.500 \mu\text{S/cm}$.

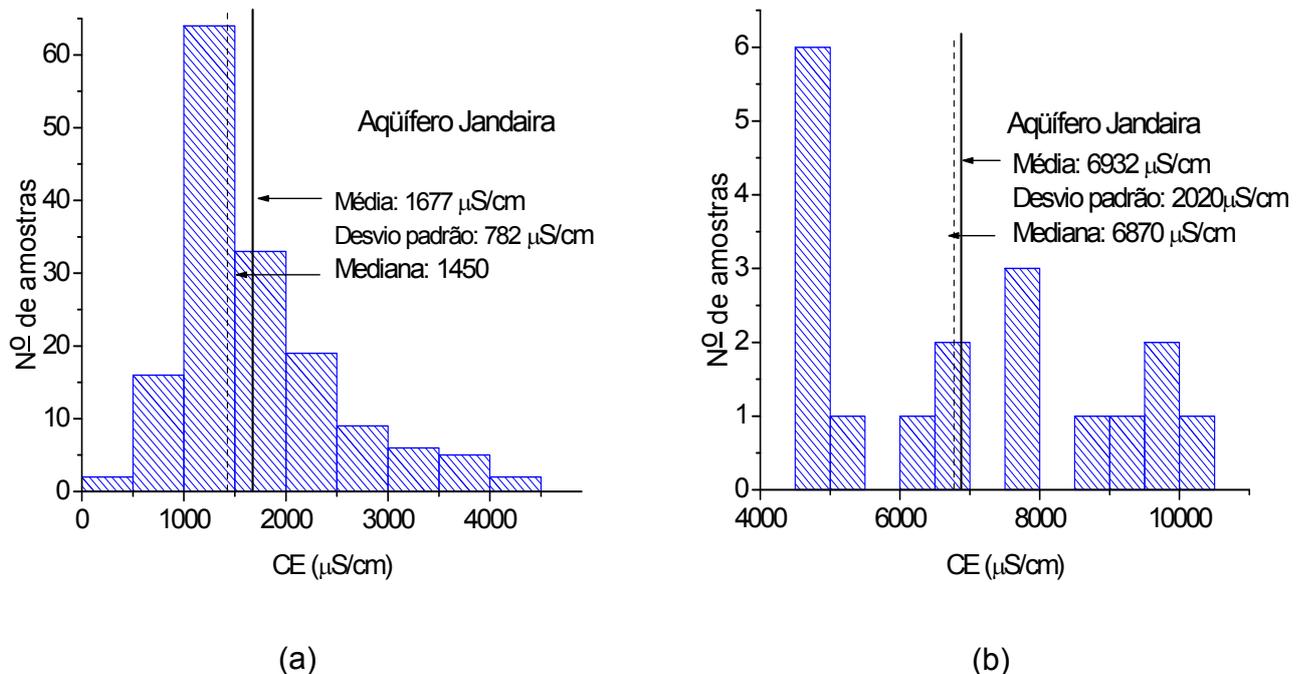


Figura 5.7 – Histogramas de Condutividade Elétrica do aquífero Jandaíra: a) valores até 4500 $\mu\text{S/cm}$; b) valores maiores do que 4500 $\mu\text{S/cm}$.

Uma visão geral dos dados é proporcionada pelos histogramas de frequência do conjunto amostral completo e suas respectivas leis ajustadas de probabilidade lognormal, conforme mostrado na **figura 5.8**, para os valores de set/09 e na **figura 5.9** para os valores de jan/10.

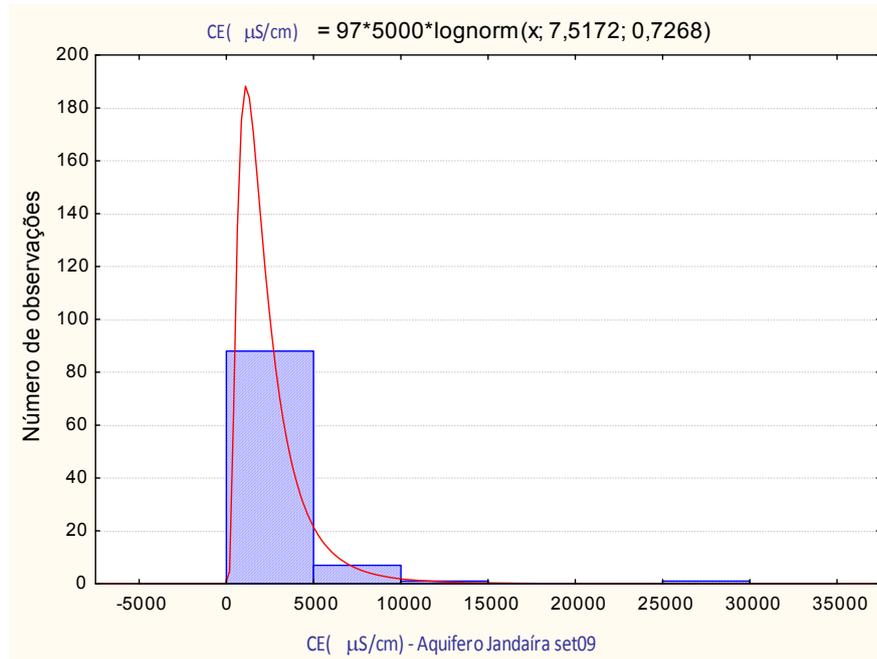


Figura 5.8 – Histogramas de frequência e lei lognormal de probabilidade ajustada aos valores de CE µS/cm do aquífero Jandaíra em set/09.

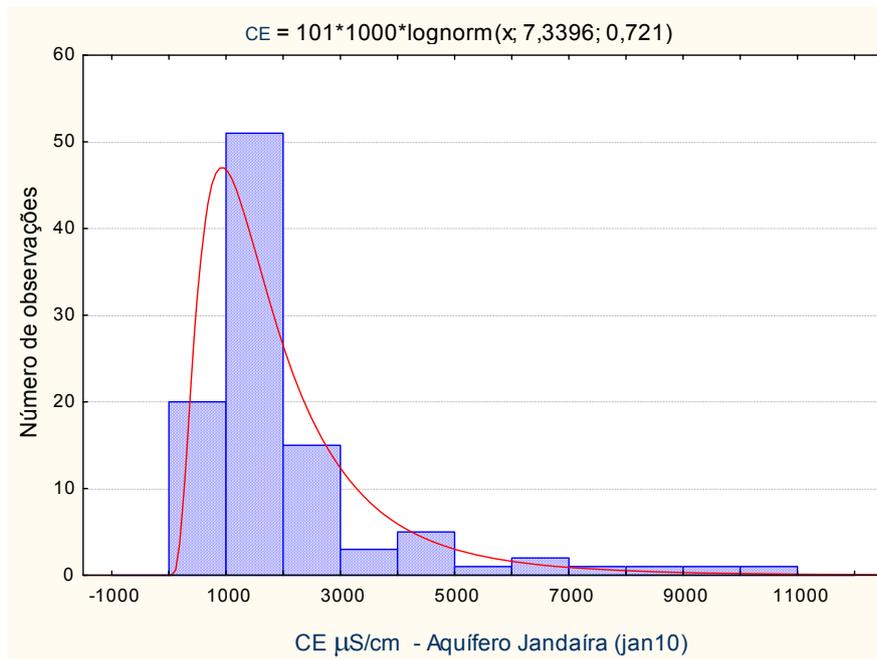


Figura 5.9 – Histogramas de frequência e lei lognormal de probabilidade ajustada aos valores de CE µS/cm do aquífero Jandaíra em jan/10.

Nota-se realmente nas **figuras 5.8 e 5.9** uma fortíssima dispersão dos valores de condutividade elétrica acima de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ou seja, no subconjunto que contém os valores maiores do que 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A lei lognormal de distribuição de probabilidade revela (**tabela 5.11**) que não existem diferenças significativas de magnitude nos valores de CE obtidos em set/09 e jan/10. Isto porque nos dois períodos (para diferentes probabilidades) os valores de CE são da mesma ordem de grandeza e muito próximos, com mediana da ordem de 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O valor mais baixo da mediana em jan/10 pode refletir o efeito de recarga em alguns locais.

Tabela 5.11 – Distribuição probabilidade lognormal da CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ do aquífero Jandaíra em set/09 e jan/10.

Prob($x \geq a$)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Set/09	1839	997	724	556	413	339
Jan/10	1774	1040	798	636	493	414

Além da influência dos aerossóis marinhos que afetam a região, estudos anteriores realizados na Bacia Potiguar (Manoel Filho, 1971), dão conta de que as marés influenciam fortemente na salinidade das águas subterrâneas ao penetrarem vários quilômetros pelos vales dos principais rios constituindo uma **“língua salgada”** que avança sob a película de água doce fluvial e invade lateralmente os aquíferos freáticos. A extensão do avanço dessa “língua salgada” para o interior ao longo dos vales aluviais é condicionada pelas descargas fluviais de água doce que fluem para o oceano.

No vale do Apodi a extensão do efeito das marés sobre as águas subterrâneas freáticas é revelada na base hidroquímica do mapa hidrogeológico na escala 1:500.000 (Manoel Filho, 1971) pela isolinha de STD = 4.000 mg/L, equivalente a CE = 6.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e que avança até a altura da cidade de Mossoró.

No âmbito do presente projeto alguns dos mapas de zoneamento hidrogeoquímico (particularmente de CE e íons Cl^- e Na^+) exibem **gradientes de concentração** (Freeze & Cherry 1979), indicativos da existência de um processo de **difusão molecular** ou **difusão iônica**, que avança lateralmente de leste para oeste a partir do vale do Apodi.

Embora o processo de difusão seja muito lento, principalmente nos meios porosos pouco permeáveis, é perfeitamente possível concluir que em um meio cárstico fissural como o aquífero Jandaíra, em escala de período de tempo geológico esse processo tenha condições de exercer uma forte influência da distribuição espacial dos constituintes químicos dissolvidos na água subterrânea, como se observa na área.

As águas coletadas em 03 fontes do aquífero Jandaíra em jan/10 apresentaram um valor médio de condutividade elétrica de 1338 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5.3.2 - Zoneamento dos parâmetros químicos no aquífero Jandaíra

No texto que segue são descritos os mapas de distribuição espacial dos seguintes constituintes químicos maiores das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra:

- Condutividade elétrica
- Cálcio
- Magnésio
- Sódio
- Cloreto
- Bicarbonato
- Sólidos Totais Dissolvidos

5.3.2.1 – Mapas de Condutividade elétrica

Os mapas de zoneamento da **condutividade elétrica** das águas do aquífero Jandaíra em set/09 (**figura 5.10**) e jan/10 (**figura 5.11**), em linhas gerais apresentam a mesma distribuição espacial embora com um aumento na magnitude das concentrações no setor oeste no mês de jan/10. Ou seja, eles revelam a ocorrência de recarga do aquífero no setor oeste, gerando dissolução do calcário e aumentando a concentração de íons na água. Nota-se, com efeito, que a área ocupada por águas de CE mais baixa em set/09 é menor em jan/10. No setor leste, a redução da área da zona de $CE > 9000 \mu\text{S/cm}$ configura provavelmente um retraimento da *língua salgada* do vale do Apodi, como será visto nos mapas de sódio e de cloretos mostrados adiante.

5.3.2.2 – Mapas de Cálcio

As **concentrações de cálcio** (**figuras 5.12 e 5.13**) predominam na faixa de 101 a 150 mg/L nas duas coletas, refletindo a média de 135,4 mg/L apresentada na **tabela 5.4**. Duas áreas que exibiam concentrações de cálcio inferiores a 100 mg/L em set/09 (**figura 5.12**) praticamente desaparecem em jan/10, envolvidas por águas de concentração mais altas do íon cálcio. A primeira coincide com a área de drenagem subterrânea das fontes do Vieira (no noroeste da área) e a segunda com a área de drenagem das fontes de Vertentes Santa Cruz, a sudeste de Quixeré. O fato sugere que nestes setores houve recarga no período, mas também pode ter havido um aumento da concentração de cálcio associado com o processo de depleção das referidas fontes. Isto porque, quando as águas de infiltração (recarga) encontram 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).

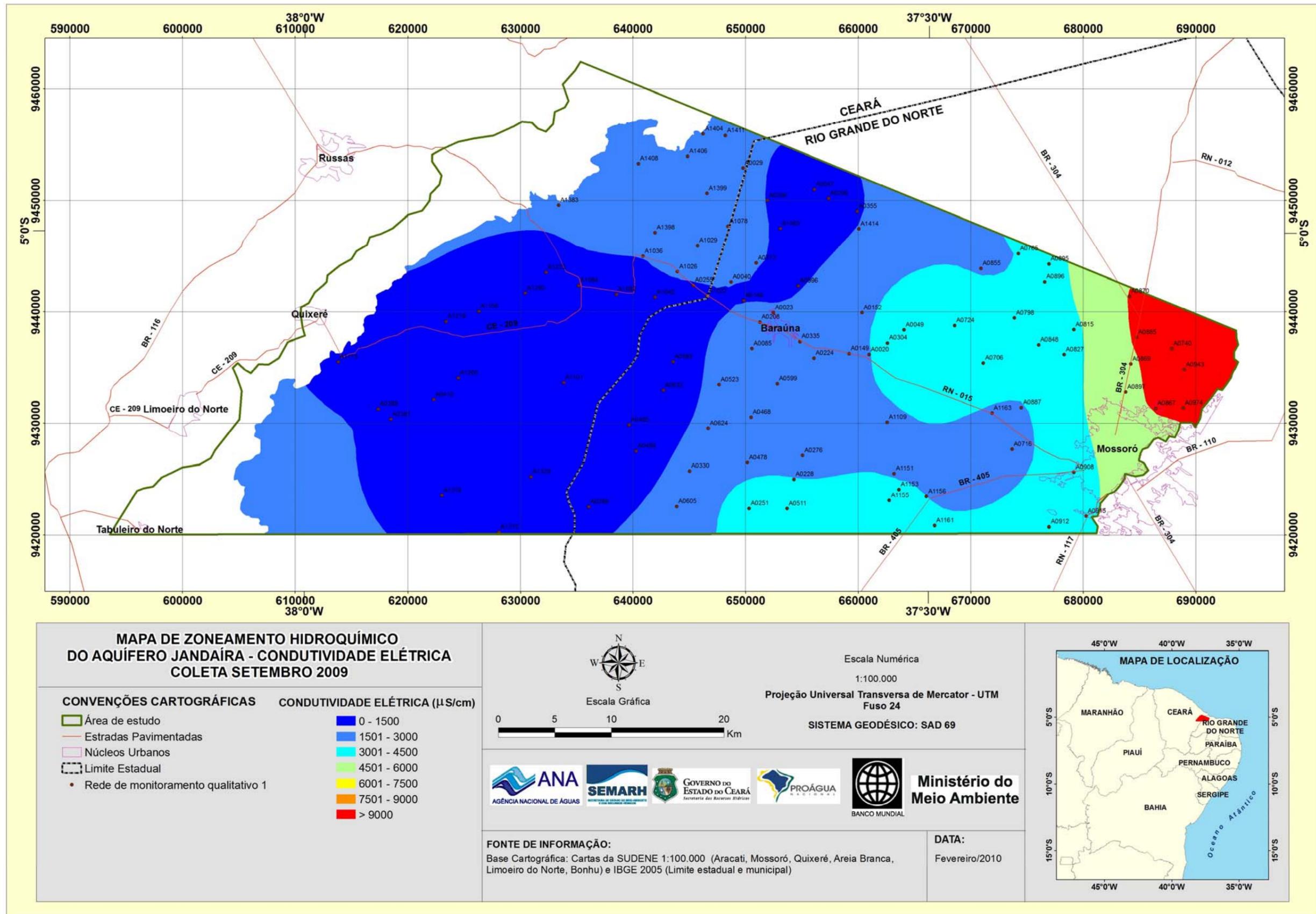


Figura 5.10 - Mapa de zoneamento da condutividade elétrica das águas do aquífero Jandaíra (set/09).

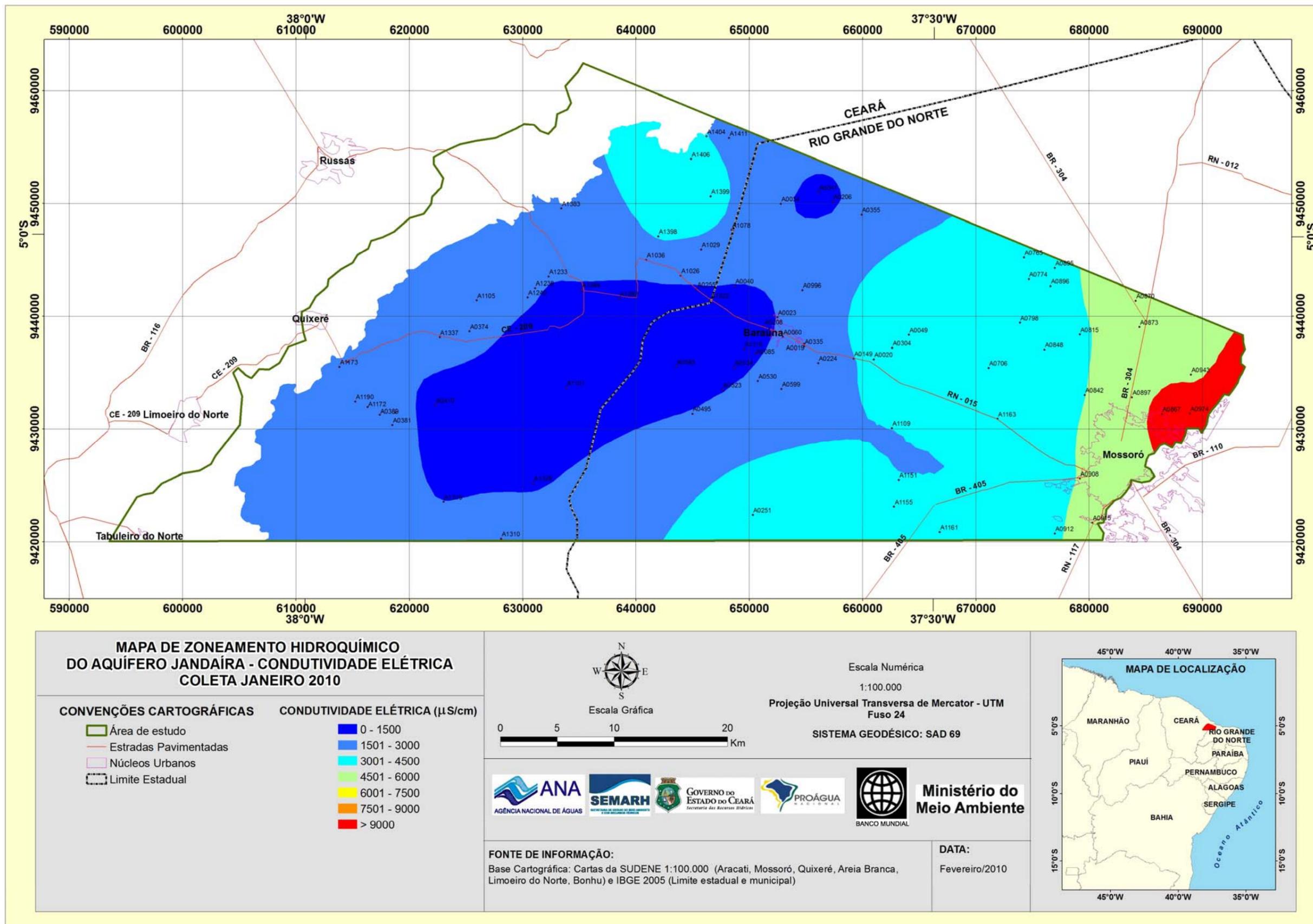


Figura 5.11 - Mapa de zoneamento da condutividade elétrica das águas do aquífero Jandaíra (jan/10).

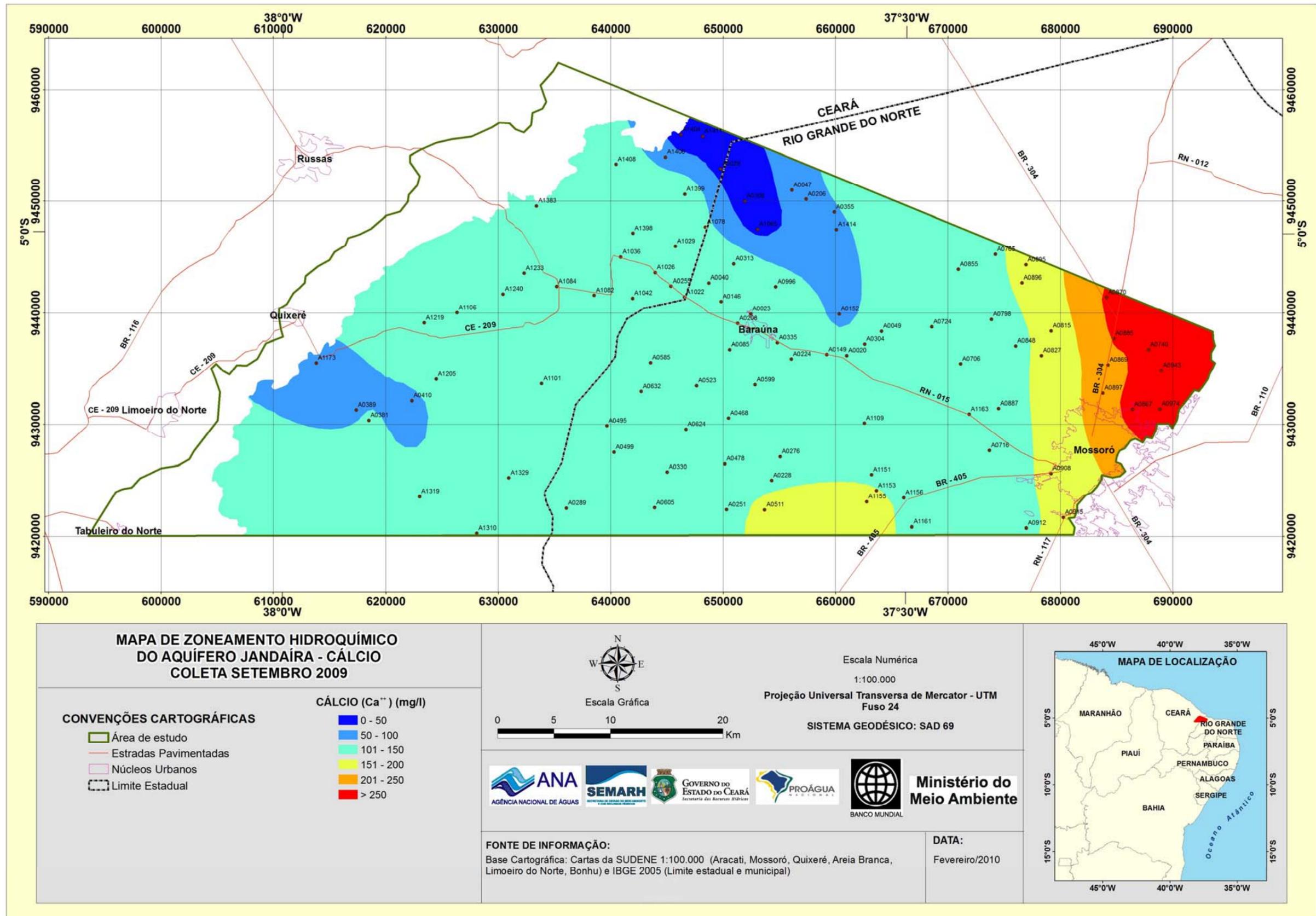


Figura 5.12 - Mapa de zoneamento de cálcio no aquífero Jandaíra (set/09).

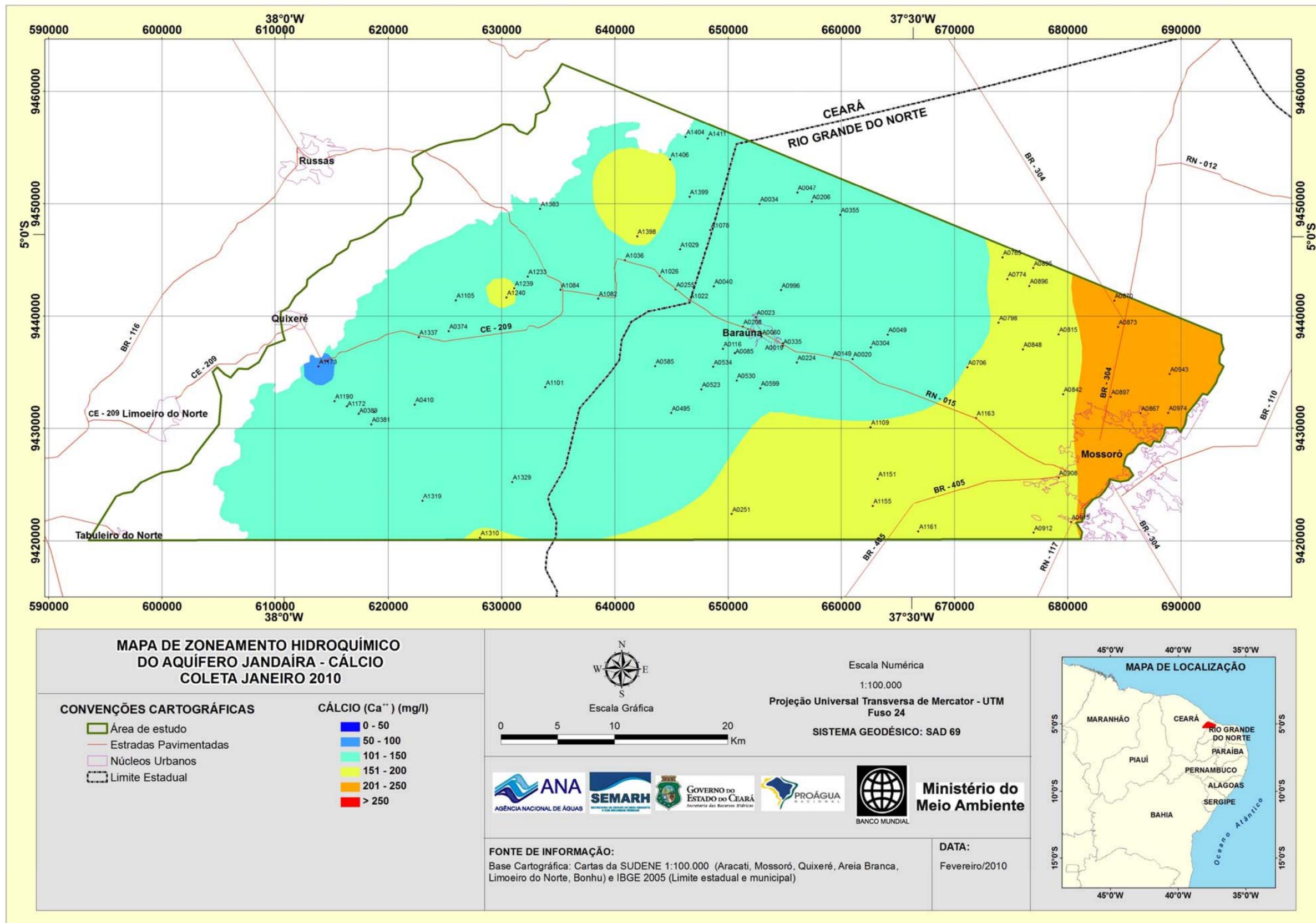


Figura 5.13 - Mapa de zoneamento de cálcio no aquífero Jandaíra (jan/10).

5.3.2.3 – Mapas de Magnésio

A concentração de magnésio (**figuras 5.14 e 5.15**) também aumentou na área das fontes do Vieira e ainda em dois outros setores ao longo da linha divisória de águas superficiais e subterrâneas entre as bacias hidrográficas Mata Fresca e Apodi indicando dissolução de dolomita. Nas demais áreas a concentração diminuiu em jan/10 pelo processo de diluição através da recarga.

O setor em que a evidência de recarga no período set09/jan10 melhor se apresenta é a bacia do Mata Fresca, onde a mancha representativa da faixa de concentrações de magnésio até 25 mg/L ampliou-se de forma bastante significativa. Isto combina com o fato de ser esta área, graças às suas feições cársticas, uma das que mais apresentam condições de transformar rapidamente as chuvas em recarga canalizada.

Este resultado, nos setores em que ocorre e aponta a recarga como responsável pelo processo de diluição, indica provável *dissolução incongruente* no sistema calcita-dolomita, ou seja, dissolução independente desses minerais um do outro já que essas zonas não são observadas no mapa de distribuição espacial do íon cálcio.

Ocorre aumento de concentração de magnésio, simultaneamente com aumento da concentração de cálcio (*dissolução congruente*), em três áreas indicando dissolução congruente de dolomita e calcita, como também mostra o zoneamento do íon cálcio.

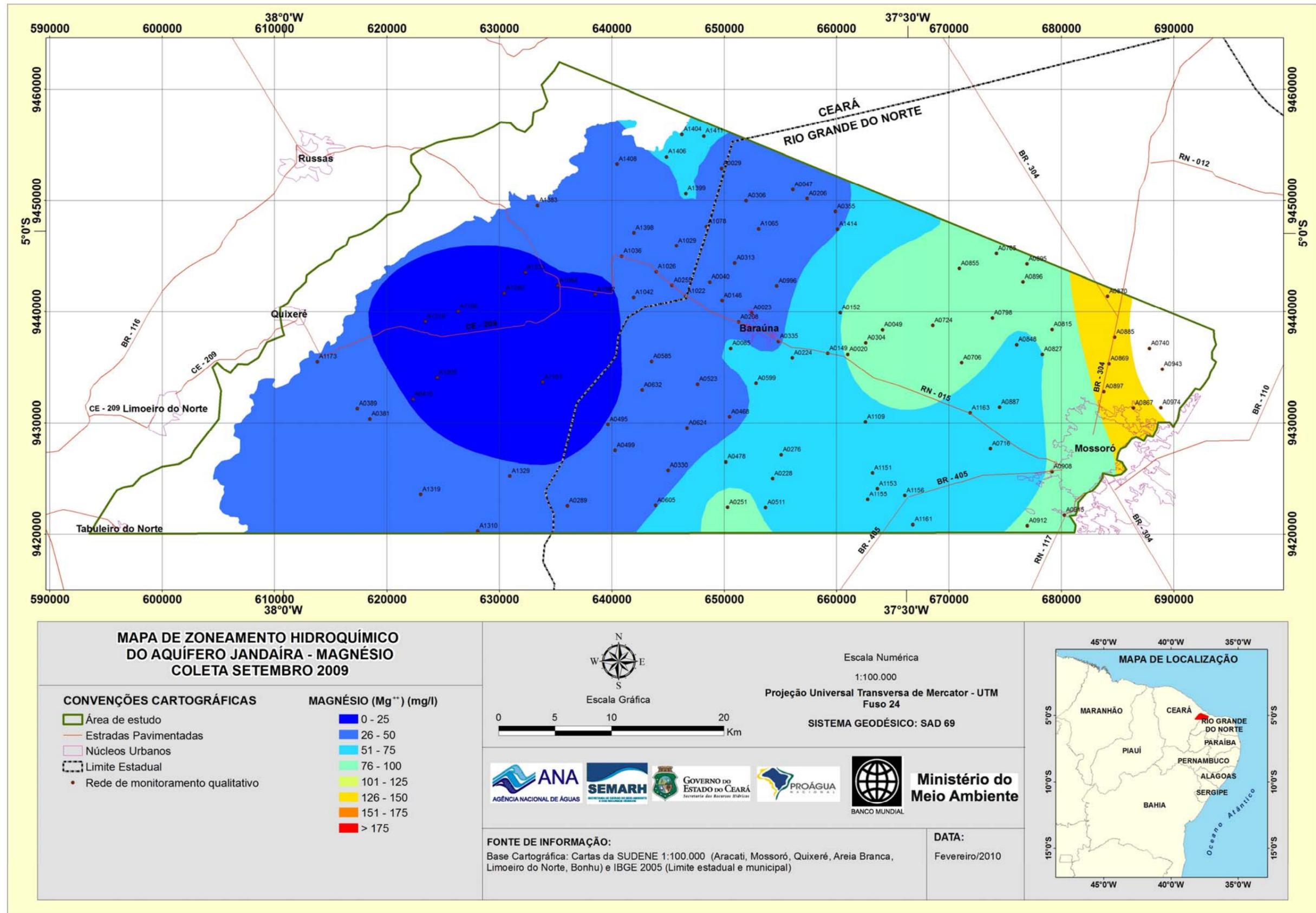


Figura 5.14 - Mapa de zoneamento de magnésio no aquífero Jandaíra (set/09).

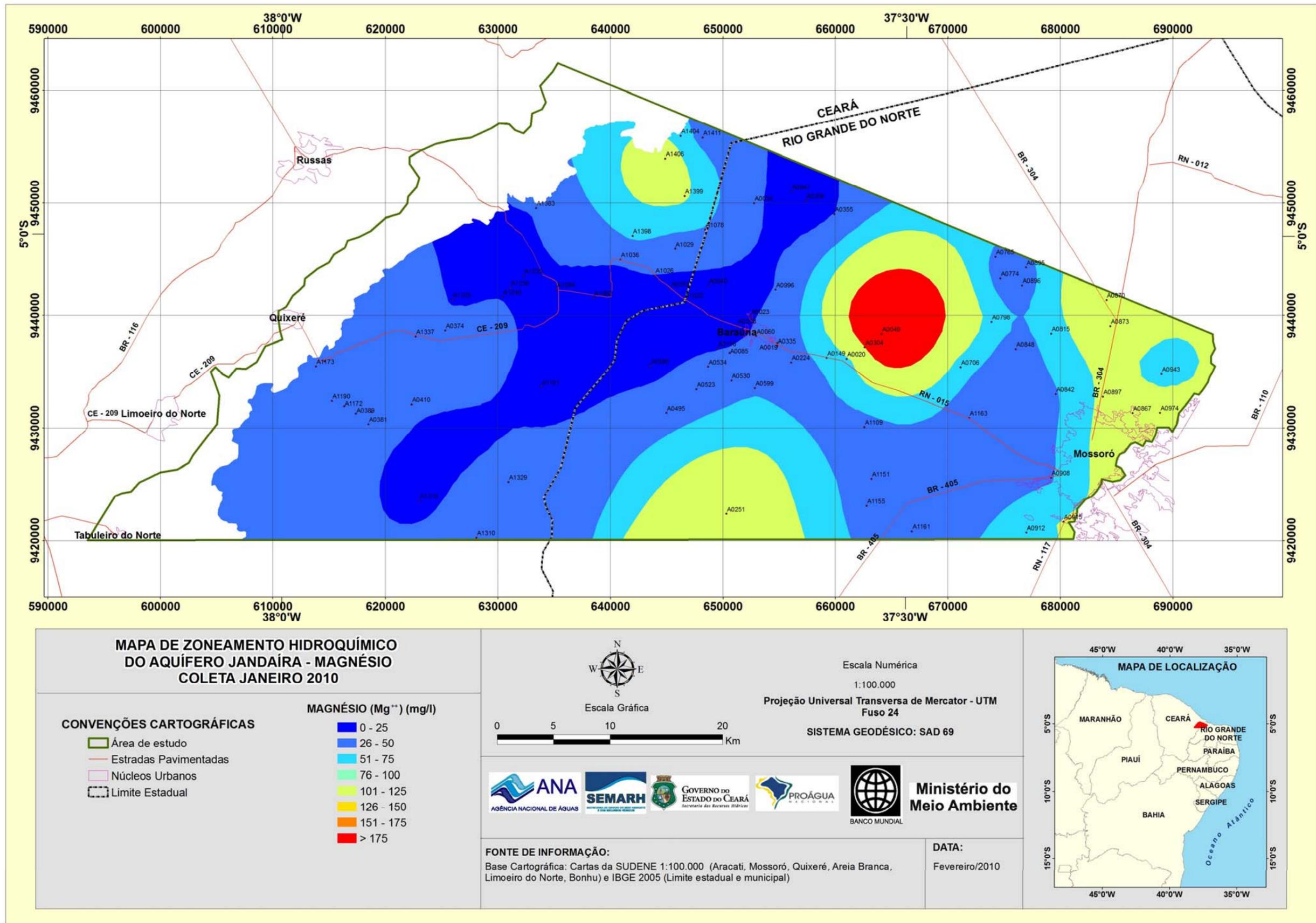


Figura 5.15 - Mapa de zoneamento de magnésio no aquífero Jandaíra (jan/10).

5.3.2.4 – Mapas de Sódio

Globalmente na área de estudo, o mapa de **zoneamento do sódio** em set/09 (**figura 5.16**) não apresenta diferença significativa em relação ao mapa de jan/10 (**figura 5.17**). Em ambos predominam concentrações de sódio de até 100 mg/L, valor abaixo do máximo permitido para águas potáveis que é de 200 mg/L.

Não obstante uma mudança é observada no gradiente de concentração de sódio em direção ao rio Apodi, no setor leste. Nota-se claramente que em jan/10 a distribuição espacial da faixa de concentrações de sódio superiores a 700 mg/L foi significativamente reduzida. Admite-se que este fato deve estar ligado à mobilidade da *língua salgada* do vale do Apodi, cuja posição, como já foi mencionado, é governada pelas descargas fluviais e pela influência das marés nas águas subterrâneas freáticas das aluviões e (por extensão lateral) do aquífero Jandaíra neste setor.

5.3.2.5 – Mapas de Cloreto

Em concordância com o mapa de zoneamento do sódio, o mapa de **distribuição espacial dos teores de cloreto** em set/09 (**figura 5.18**), nas zonas de baixos teores, mantém o mesmo padrão observado no mapa de jan/10 (**figura 5.19**). Os cloretos predominam em concentrações de até 250 mg/L, que é o valor máximo para águas potáveis, nos dois períodos.

Também no que se refere à distribuição espacial dos altos teores, a concordância entre os dois mapas (de cloreto e de sódio) é perfeita. Ainda assim, são merecedoras de destaque as mudanças do gradiente de concentração de cloretos no setor leste, entre set/09 e jan/10, por revelarem de forma ainda mais notável do que o gradiente de concentração do sódio, a mobilidade da *língua salgada* nas águas subterrâneas do calcário Jandaíra.

De fato, a redução espacial do domínio ocupado pela faixa de teores de cloretos superiores a 1700 mg/L não deixa dúvidas sobre a mobilidade da *língua salgada* do vale do Apodi, cujo comportamento é rigorosamente análogo ao das zonas de transição ou zonas de mistura das interfaces marinhas.

Do ponto de vista da gestão, o risco de contaminação de poços que bombeiam águas do aquífero Jandaíra nessa área deve ser levado em consideração.

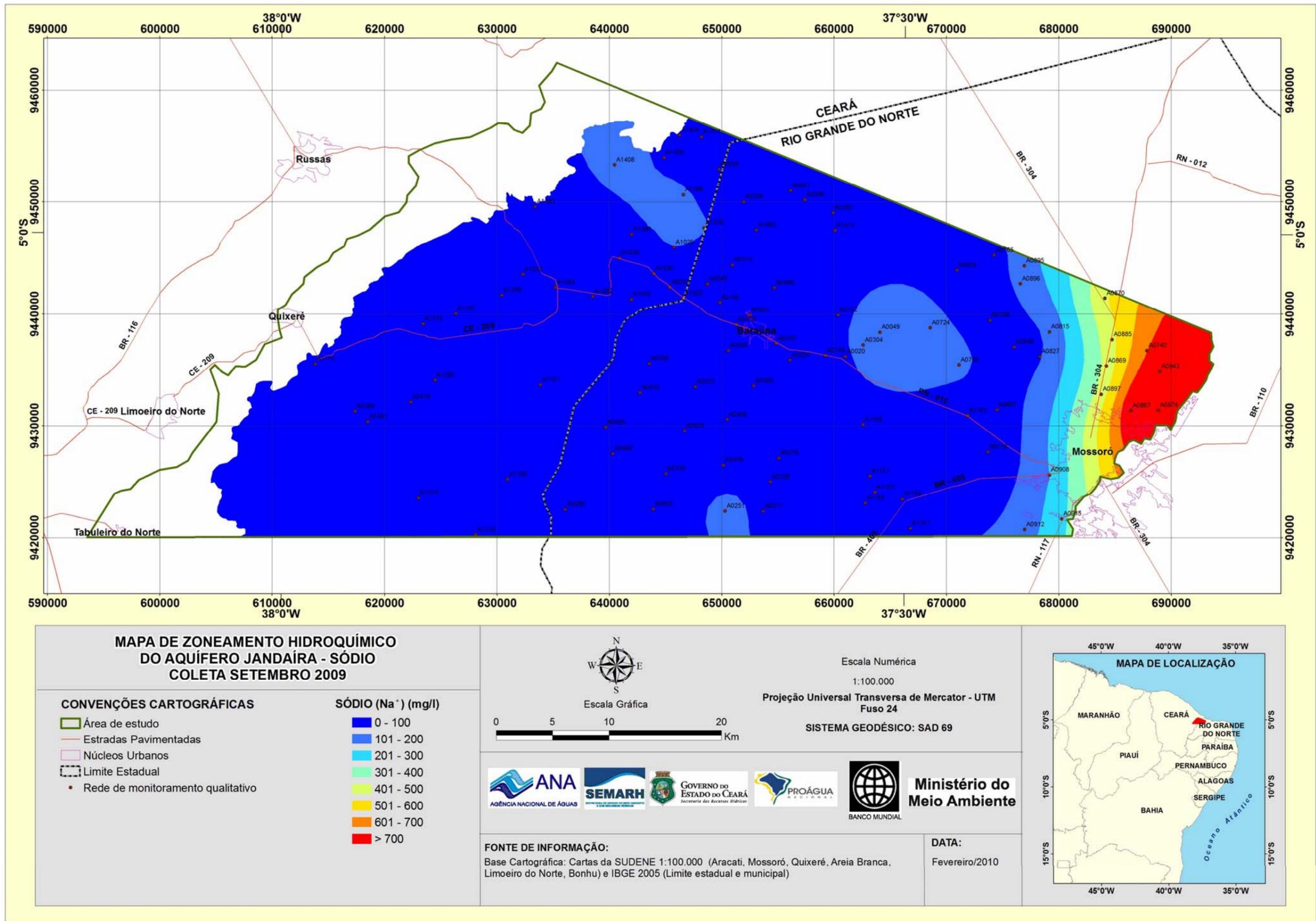


Figura 5.16 - Mapa de zoneamento de sódio no aquífero Jandaíra (set/09).

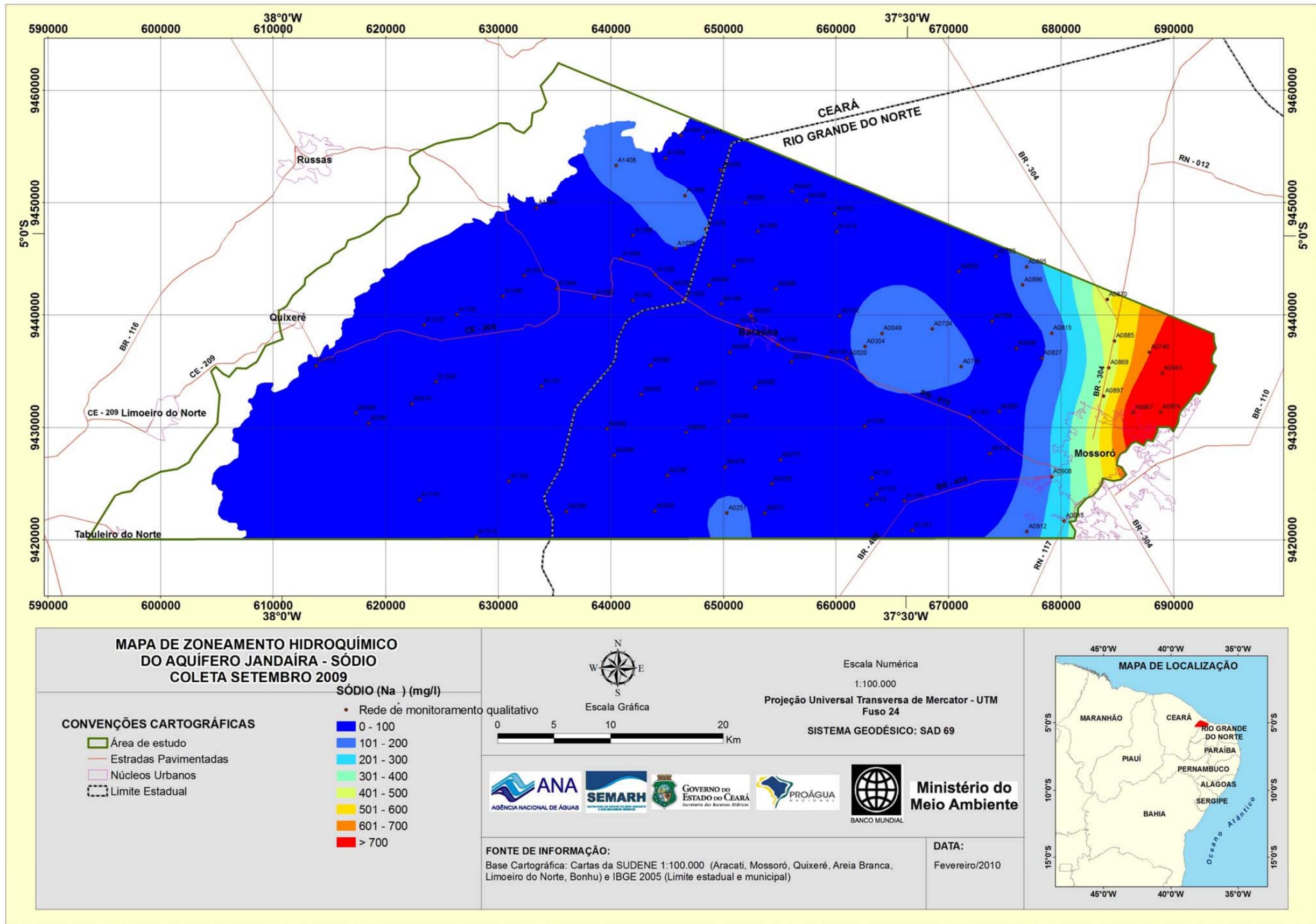


Figura 5.17 - Mapa de zoneamento de sódio no aquífero Jandaíra (jan/10).

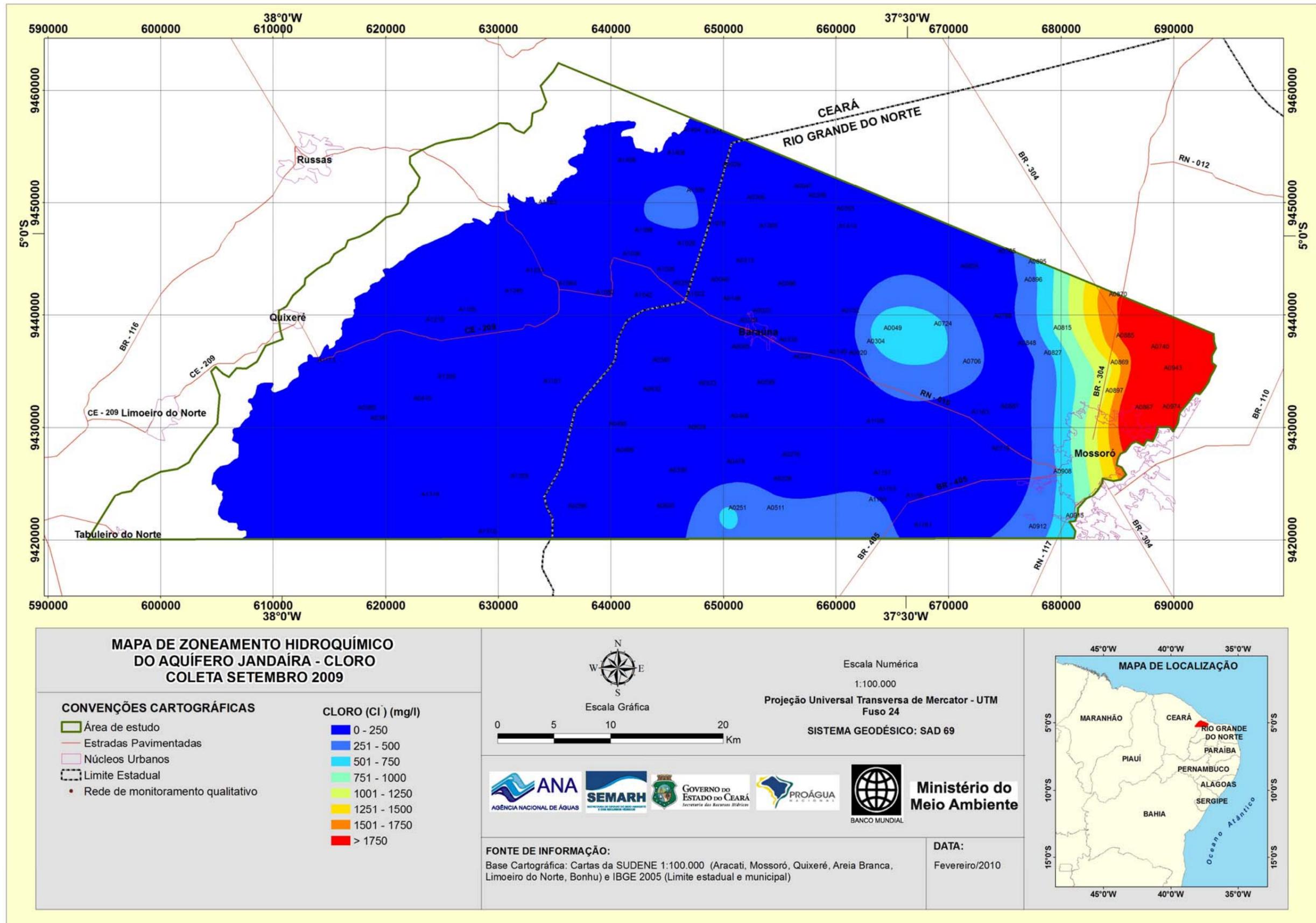


Figura 5.18 - Mapa de zoneamento de cloreto no aquífero Jandaíra (set/09).

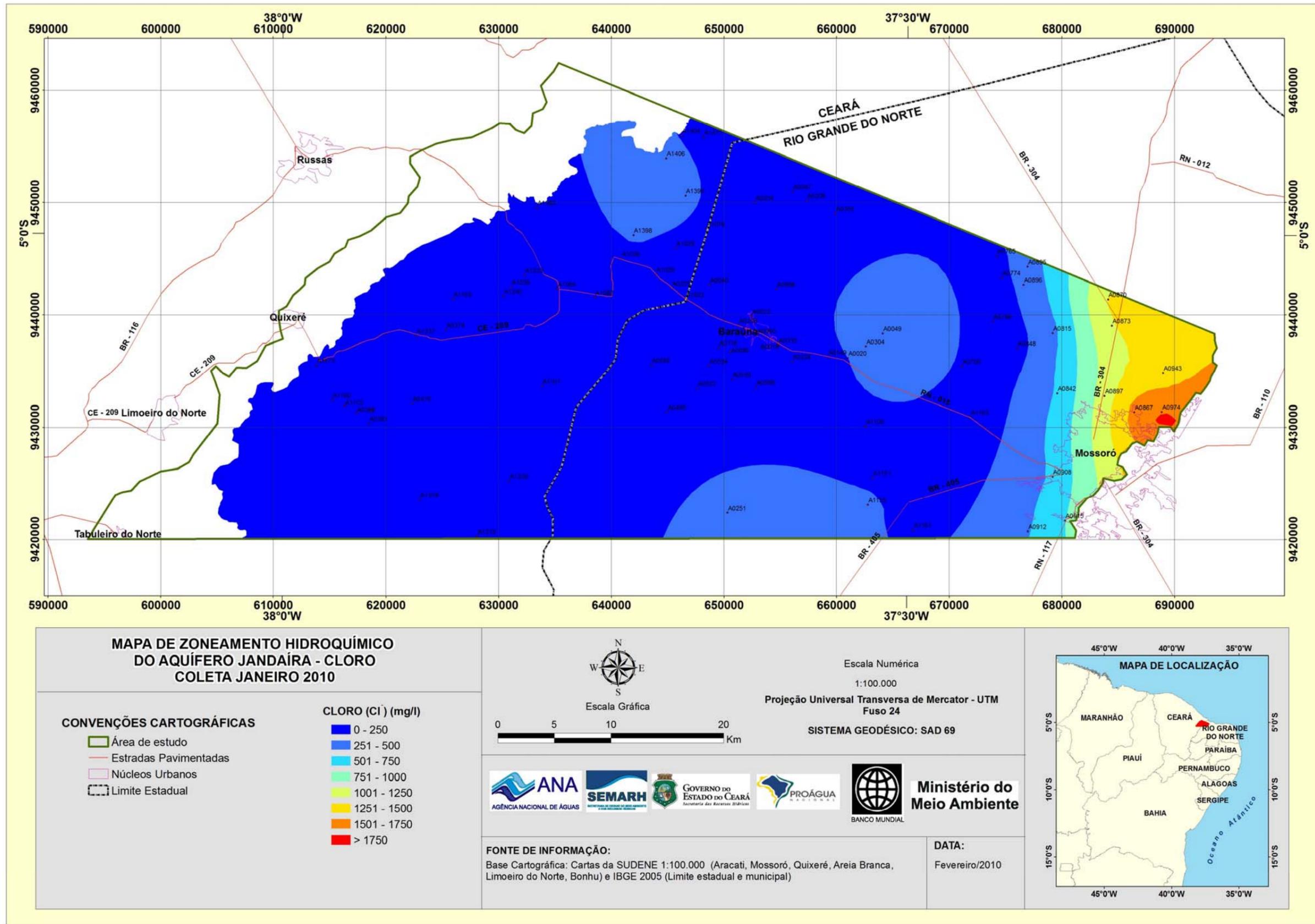
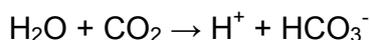


Figura 5.19 - Mapa de zoneamento de cloreto no aquífero Jandaíra (jan/10).

5.3.2.6 – Mapas de Bicarbonato

O **zoneamento do íon bicarbonato** em set/09 (**figura 5.20**) é marcado pela ocorrência de uma zona central com teores acima de 450 mg/L que atravessa toda a área na direção NNE. O eixo central dessa área coincide aproximadamente com o divisor de águas superficiais e subterrâneas entre as bacias hidrográficas do rio Apodi e do Riacho Mata Fresca, onde existe importante zona de recarga evidenciada nos mapas potenciométricos. A partir desse eixo NNE observa-se um gradiente de concentração de bicarbonato decrescente na direção NE no rumo do vale do Apodi e de direção NW em direção ao vale do Jaguaribe. Em jan/10 (**figura 5.21**) a zona de altos teores (superiores a 450 mg/L) se reduz à metade sul da faixa que ocupava em set/09. Com a recarga, ocorre entrada de bicarbonato através do processo:



A dissolução de carbonatos também adiciona bicarbonato em um processo do tipo:



Considerando estes processos, fica confirmada a ocorrência de recarga sugerida pelos mapas de zoneamento do magnésio na parte oeste da área na Bacia do Mata Fresca, onde predomina o carst, pois a concentração de bicarbonato aumentou de set/09 para jan/10. As águas de chuva são bicarbonatadas pela presença de CO_2 dissolvido aumentando intensamente a concentração de bicarbonatos na água subterrânea na área de sumidouros. O efeito desse processo pode ser evidenciado comparando os mapas de **zoneamento de bicarbonatos** no aquífero Jandaíra para as duas coletas.

Em grande parte da área, todavia, houve uma redução significativa da superfície ocupada em set/09 pelos teores máximos de bicarbonato, como já foi dito. Daí porque, neste caso, a evolução espacial do bicarbonato nas águas subterrâneas, provavelmente pode ser interpretada como resultante de dissolução em *sistema-fechado*, no qual o carbono inorgânico dissolvido não provém da atmosfera, como acontece no *sistema aberto* acima considerado, mas deriva do CO_2 dissolvido quando se inicia a dissolução da calcita e/ou dolomita. Essa hipótese também se justifica porque comprova não ter havido recarga extensiva a toda a área do projeto no período investigado.

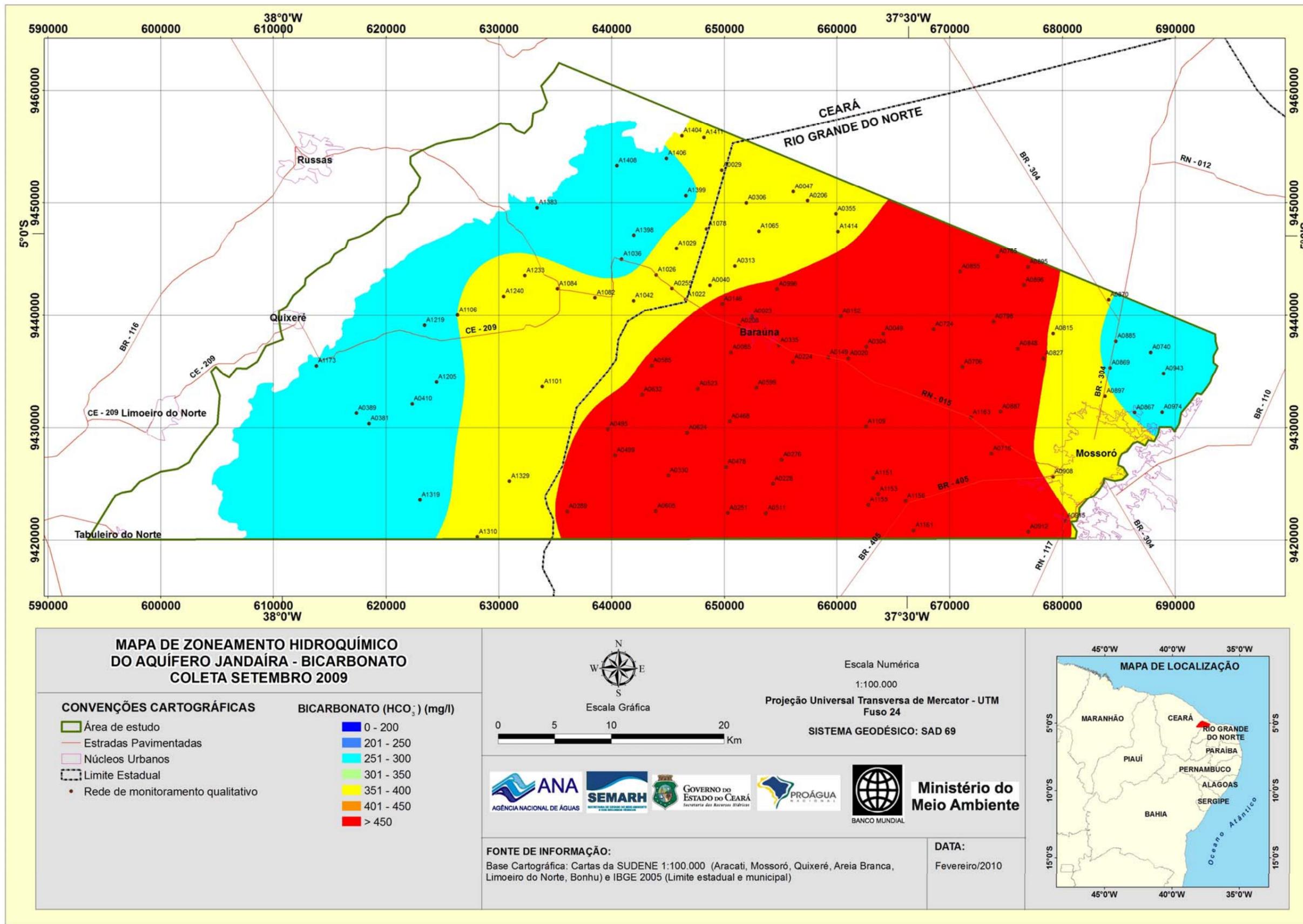


Figura 5.20 - Mapa de zoneamento de bicarbonato no aquífero Jandaíra (set/09).

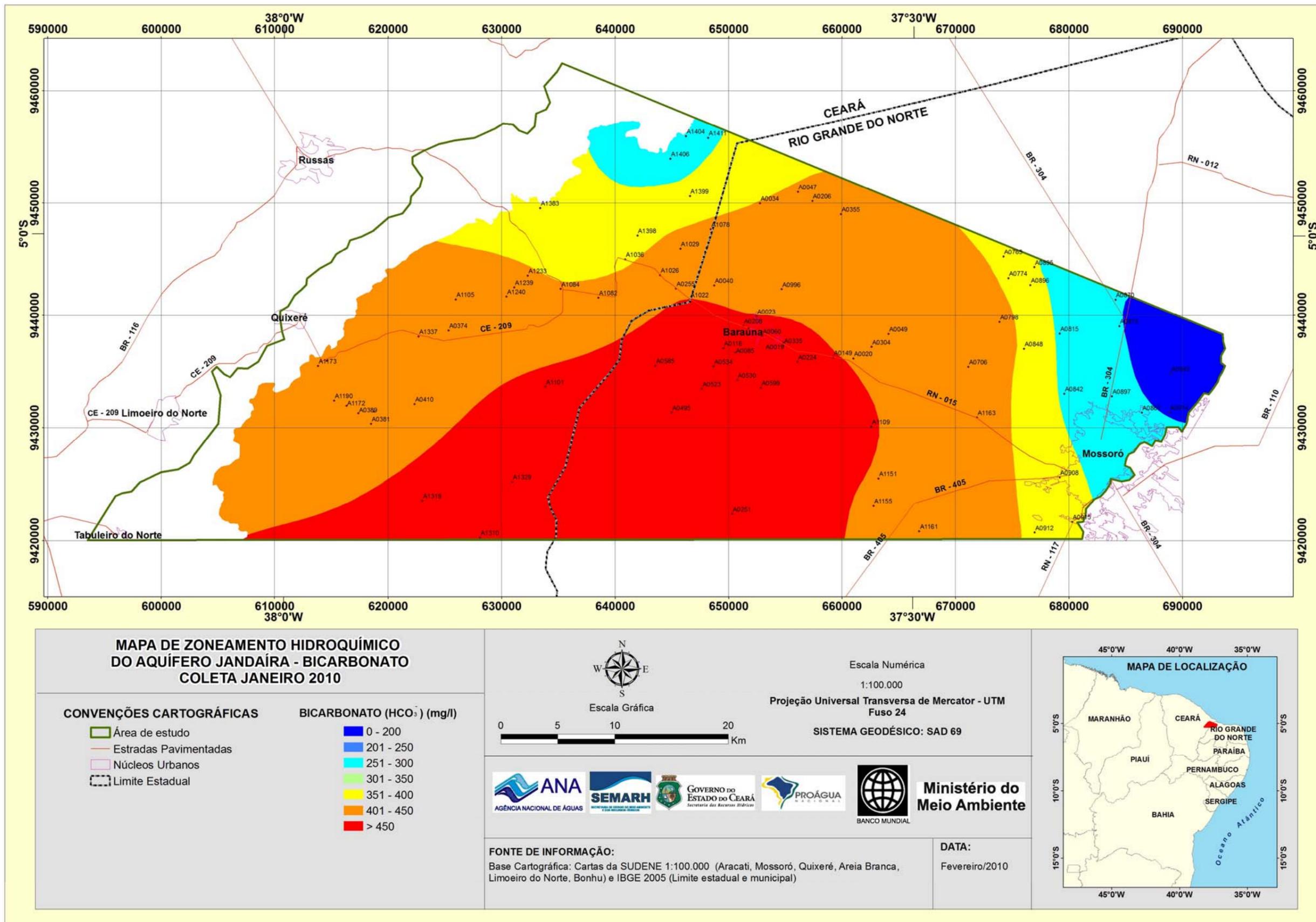


Figura 5.21 - Mapa de zoneamento de bicarbonato no aquífero Jandaíra (jan/10).

5.3.3 - Concentração de cátions no aquífero Jandaíra

Os íons de cálcio (Ca^{2+}) em águas subterrâneas, em contato com rochas sedimentares de origem marinha são provenientes da dissolução da calcita, dolomita e gipsita. Eles são desde moderadamente solúveis a muito solúveis e são muito fáceis de precipitar como carbonato de cálcio.

Em águas doces as concentrações de cálcio iônico (Ca^{2+}) variam de 10 a 250 mg/L. Elevadas concentrações de cálcio podem provocar formação de pedras nos rins, hipercalcemia. No uso industrial, nos sistemas de refrigeração, podem produzir entupimento através da produção de incrustações. O cálcio contribui para o aumento da dureza na água.

O íon magnésio (Mg^{2+}) tem propriedades similares às do íon cálcio, porém ele é mais solúvel e difícil de precipitar. Devido sua solubilidade, o magnésio é geralmente encontrado em águas naturais, mas em concentrações menores do que o cálcio, de 1 a 40 mg/L. Águas armazenadas em rochas ricas em magnésio têm concentrações que podem atingir até 100 mg/L; concentrações maiores que 100 mg/L são raramente encontradas, exceto em águas do mar e salmouras.

O excesso de magnésio reduz a frequência cardíaca em pessoas com problemas do coração; no entanto, em dosagens adequadas, trata tensão pré-menstrual e hipertensão, previne cálculos renais e biliares e ajuda os músculos a trabalhar. O magnésio também contribui para a dureza da água.

O íon sódio (Na^+) apresenta solubilidade muito elevada e é muito difícil de precipitar. Em água doce, a concentração de sódio varia de 1 a 150 mg/L; nas salmouras naturais pode chegar a 100.000 mg/L. Concentrações de sódio elevadas nas águas são prejudiciais às plantas por reduzir a permeabilidade do solo, principalmente se as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} forem baixas.

O íon potássio (K^+) apresenta solubilidade similar à do sódio. É facilmente afetado por troca de base e é absorvido de forma pouco reversível pelas argilas em formação para fazer parte de sua estrutura, o que o diferencia do íon sódio. Em água doce, sua concentração varia de 0,1 a 10 mg/L. Ao contrário do sódio, o potássio é um elemento vital para o crescimento das plantas e é um dos constituintes de fertilizantes agrícolas.

De acordo com a Resolução 396 do CONAMA (2008), não há restrição quanto às concentrações de cálcio, magnésio e potássio; para o sódio o VMP (Valor Máximo Permitido) é de 200 mg/L para consumo humano e 300 mg/L, para recreação.

5.3.4 - Concentração de ânions no aquífero Jandaíra

Os cloretos (Cl^-) são muito solúveis, são estáveis em solução e de difícil precipitação; não sofrem oxidação nem redução em águas naturais e estão, em geral, associados aos íons de sódio, na proporção molar 1:1, principalmente, em águas salinas.

Os padrões de potabilidade, geralmente, limitam o teor de cloreto em 250 mg/L, pois quando esse valor é ultrapassado confere um sabor salgado à água. Os

cloretos podem funcionar como indicadores de poluição por esgotos sanitários ou por intrusão salina em aquíferos costeiros. Águas com alto teor de cloreto são prejudiciais às plantas, são corrosivas e atacam estruturas e recipientes metálicos.

Os sulfatos (SO_4^{2-}) são desde moderadamente solúveis a muito solúveis, formados por oxidação de sulfitos. Os mais importantes depósitos de sulfato são encontrados em sedimentos evaporados como gipsita, anidrida e sulfato de sódio. Nas águas naturais, as concentrações de sulfato variam de 0,2 mg/L a mais de 100.000 mg/L.

As menores concentrações estão em águas de chuva, neve e águas superficiais sujeitas à redução de sulfato. As maiores concentrações estão em salmouras de sulfato de magnésio. Em águas potáveis, as concentrações de sulfato não devem exceder 250 mg/L; acima deste valor, ele confere à água um sabor amargo e pode causar efeitos laxativos.

A maioria dos íons bicarbonatos (HCO_3^-) e carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) em águas subterrâneas são derivados do dióxido de carbono na atmosfera e no solo e de dissoluções de rochas carbonatadas. Águas bicarbonatadas sódicas podem ser concentradas nos solos por evaporação, mas se muito cálcio estiver presente, o bicarbonato é retirado da água através da precipitação de carbonato de cálcio.

A concentração de bicarbonato em águas subterrâneas varia de 10 a 800 mg/L; sendo mais comuns concentrações entre 50 e 400 mg/L. Existe uma forte relação entre o pH da água e as concentrações do gás carbônico (CO_2), dos bicarbonatos (HCO_3^-) e dos carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$); estes íons definem a alcalinidade das águas.

De acordo com a Resolução 396 do CONAMA (2008) não há restrição quanto às concentrações de bicarbonato e para o cloreto os VMP são mostrados na **tabela 5.12**.

Tabela 5.12 - Valores Máximos Permitidos de Cl^- de acordo com a Resolução 396 do CONAMA (2008).

Uso	VMP de Cl^- (mg/L)
Consumo Humano	250
Dessedentação de animais	-
Irrigação	100 – 700
Recreação	400

5.3.5 – Dureza no aquífero Jandaíra

A dureza das águas do Jandaíra é decorrente de processos naturais de dissolução dos calcários, principalmente calcita ($\text{CaCO}_{3(s)}$) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_{3(s)})$). Os resultados das medidas estão apresentados nas **tabelas A5.3a** e **A5.3b**, para amostras de água do Jandaíra coletadas, respectivamente, em set/09 e jan/10.

Como mostra a **tabela 5.13**, 90% dos valores de dureza medidos em set/09 correspondem a águas muito duras com mediana de 448 mg/L, enquanto que em jan/10 esse percentual de águas muito duras chega a 98% e apresenta mediana de 542 mg/L.

Tabela 5.13 – Distribuição de probabilidade lognormal da dureza mg/L (CaCO_3) das águas do aquífero Jandaíra em set/09 e jan/10.

Prob($x \geq a$)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Set/09	448	237	170	129	95	77
Jan/10	542	340	267	218	174	150

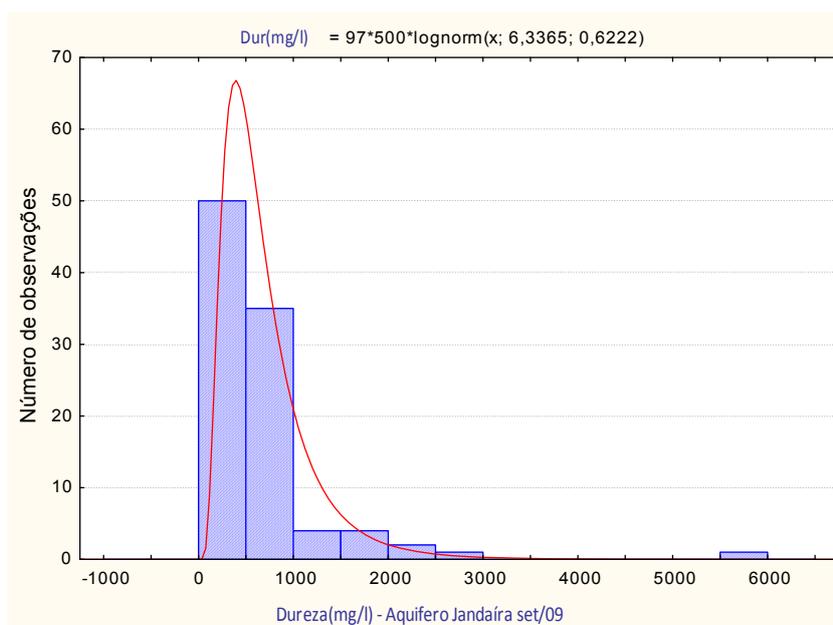


Figura 5.22 - Histograma de frequência e lei lognormal de distribuição de probabilidade da **dureza** das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra em set/09.

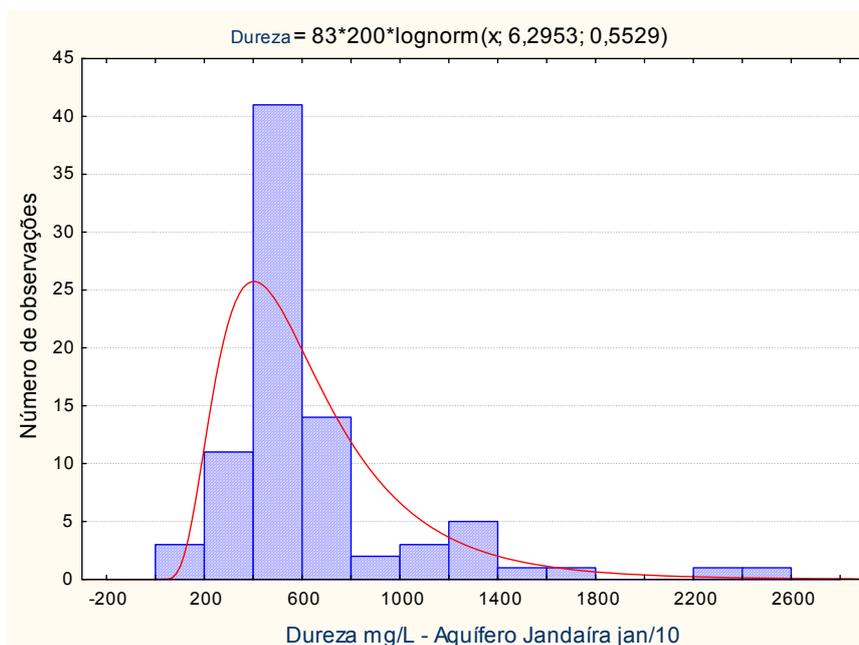


Figura 5.23 - Histograma de frequência e lei lognormal de distribuição de probabilidade da **dureza** das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra em jan/10.

Esse aumento da dureza das águas do Jandaíra no mês de jan/10 em relação a set/09, revelada para diferentes probabilidades, é consistente com a distribuição dos valores dos índices de saturação das referidas águas em relação à calcita (**figura 5.24a**) e em relação à dolomita (**figura 5.24b**).

Em relação à calcita, em set/09 os valores negativos de IS indicativos de tendência de dissolução ($IS < 0$) representam 51% e em jan/10 equivalem a 28%. Em relação à dolomita, em ambos os períodos persiste uma forte tendência de dissolução evidenciada por valores de IS negativos ($IS < 0$) em 100% das determinações em set/09 e 90% das determinações em jan/10.

A **dureza**, que é decorrente da dissolução de calcário na Formação Jandaíra, é menor a oeste da área porque o processo de diluição com a chegada da água de **recarga difusa** é menos intenso do que a diluição com a **recarga canalizada** através de sumidouros; os mapas de zoneamento da dureza indicam a influência da presença dos sumidouros.

A **tabela 5.14** e os histogramas das **figuras 5.22 e 5.23** mostram as distribuições de frequência e a lei ajustada de probabilidade lognormal da dureza das águas do Jandaíra em set/09 (**figura 5.22**) e em jan/10 (**figura 5.23**) e **tabela 5.15**. Trata-se de águas em geral *duras a muito duras*.

Tabela 5.14 – Frequência dos valores de dureza do aquífero Jandaíra em set/09.

Classe	Frequência	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
Dureza aquífero Jandaíra set/09 – (mg/L CaCO₃)				
0,0<x<=500*	53	53	0,5464	55
500<x<=1000	32	85	0,3299	88
1000<x<=1500	4	89	0,0412	92
1500<x<=2000	4	93	0,0412	96
2000<x<=2500	2	95	0,0206	98
2500<x<=3000	1	96	0,0103	99
3000<x<=3500	0	96	0,0000	99
3500<x<=4000	0	96	0,0000	99
4000<x<=4500	0	96	0,0000	99
4500<x<=5000	0	96	0,0000	99
5000<x<=5500	0	96	0,0000	99
x>5500	1	97	0,0103	100

*Valores <=VMP

Tabela 5.15 – Frequência dos valores de dureza do aquífero Jandaíra em jan/10.

Classe	Frequência	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
Dureza aquífero Jandaíra jan/10 – (mg/L CaCO₃)				
0,00<x<=500*	42	42	50,6024	51
500<x<=1000	29	71	34,9398	86
1000<x<=1500	9	80	10,8434	96
1500<x<=2000	1	81	1,2048	98
2000<x<=2500	2	83	2,4096	100

*Valores <= VMP

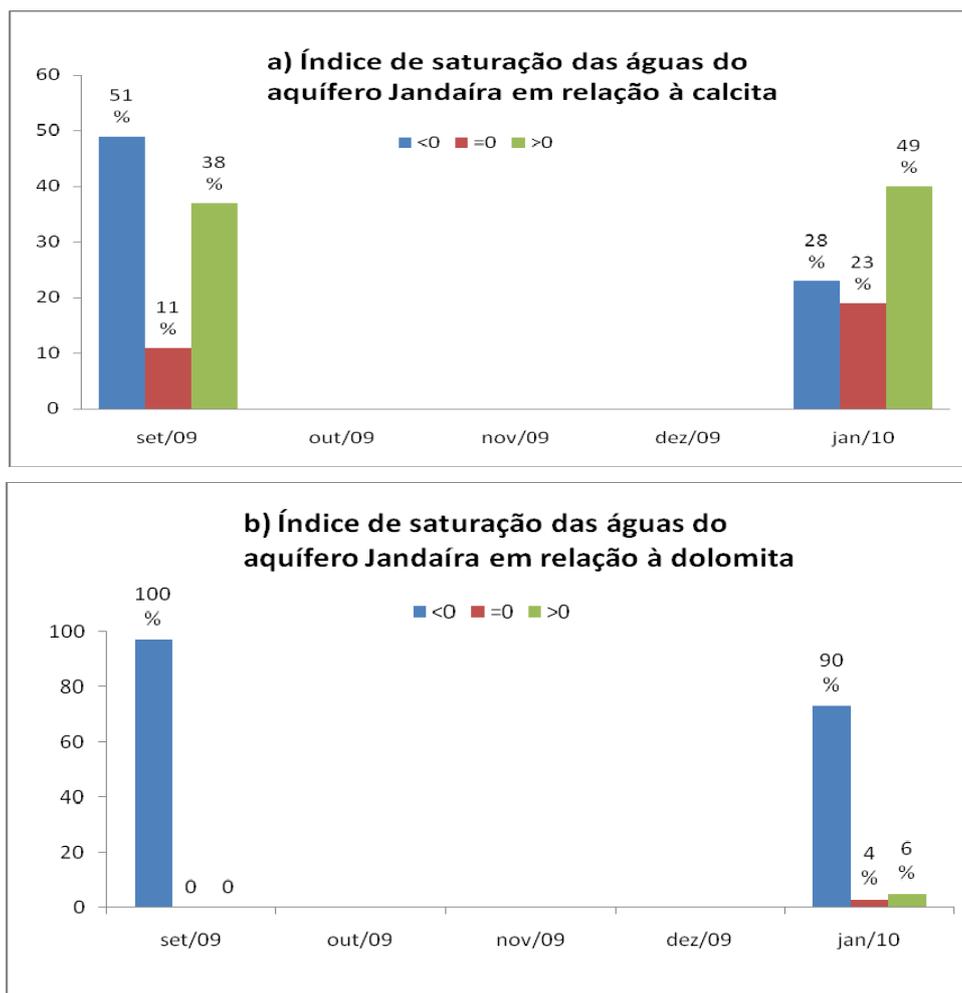


Figura 5.24 – Histogramas de frequência dos índices de saturação das águas do aquífero Jandaíra em set/09 e jan/10: a) em relação à calcita; b) em relação à dolomita.

5.3.5.1 – Mapas de Dureza no aquífero Jandaíra

Os mapas de **zoneamento da dureza** das águas do aquífero Jandaíra em set/09 (**figura 5.25**) e em jan/10 (**figura 5.26**) também confirmam a tendência de dissolução dos calcários, principalmente no setor oeste da área de estudo, possivelmente em resposta a eventos de recarga canalizada favorecida pelas grandes aberturas criadas no domínio do carst. No leste, a língua salgada do vale do Apodi, que aparece de forma bastante expressiva em set/09, surge totalmente retraída no mapa de jan/10, corroborando o comportamento já evidenciado em mapas anteriormente descritos. Os mapas de distribuição espacial da dureza segundo as categorias de águas moles, moderadamente duras e duras podem ser vistos para set/09 na **figura 5.27** e para jan/10, na **figura 5.28**.

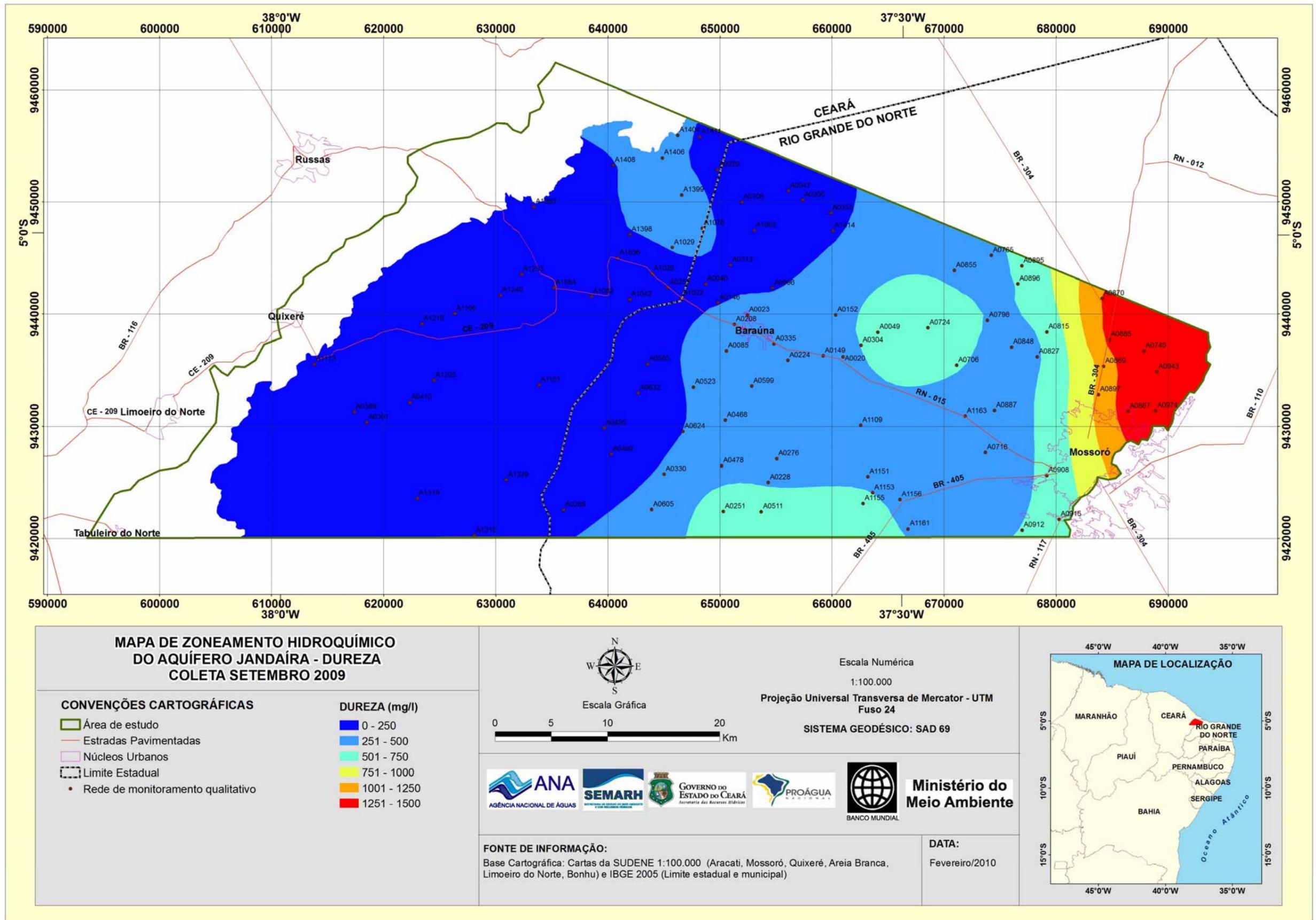


Figura 5.25 - Mapa de zoneamento de dureza das águas no aquífero Jandaíra (set/09).

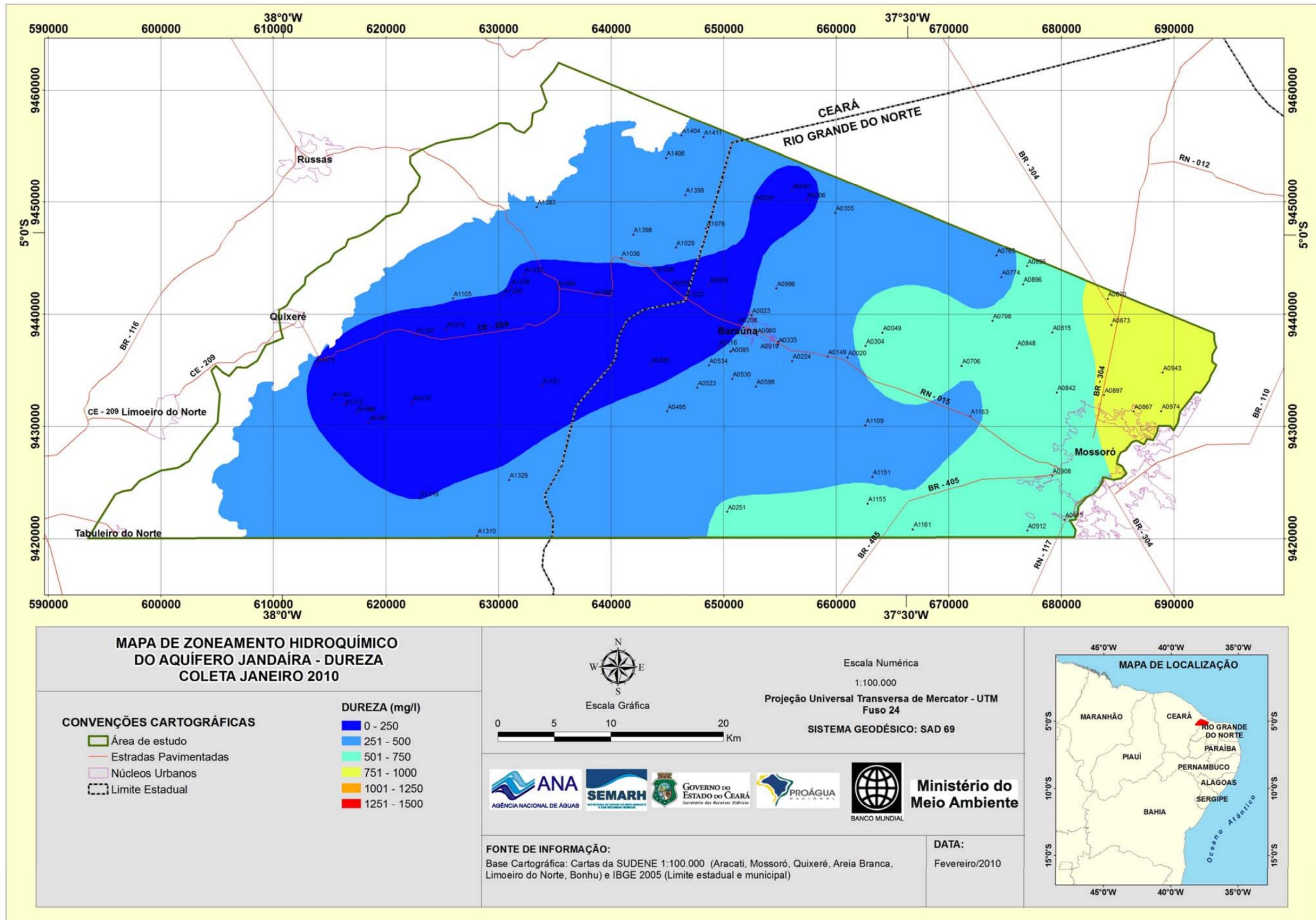


Figura 5.26 - Mapas de zoneamento de dureza das águas no aquífero Jandaíra (jan/10).

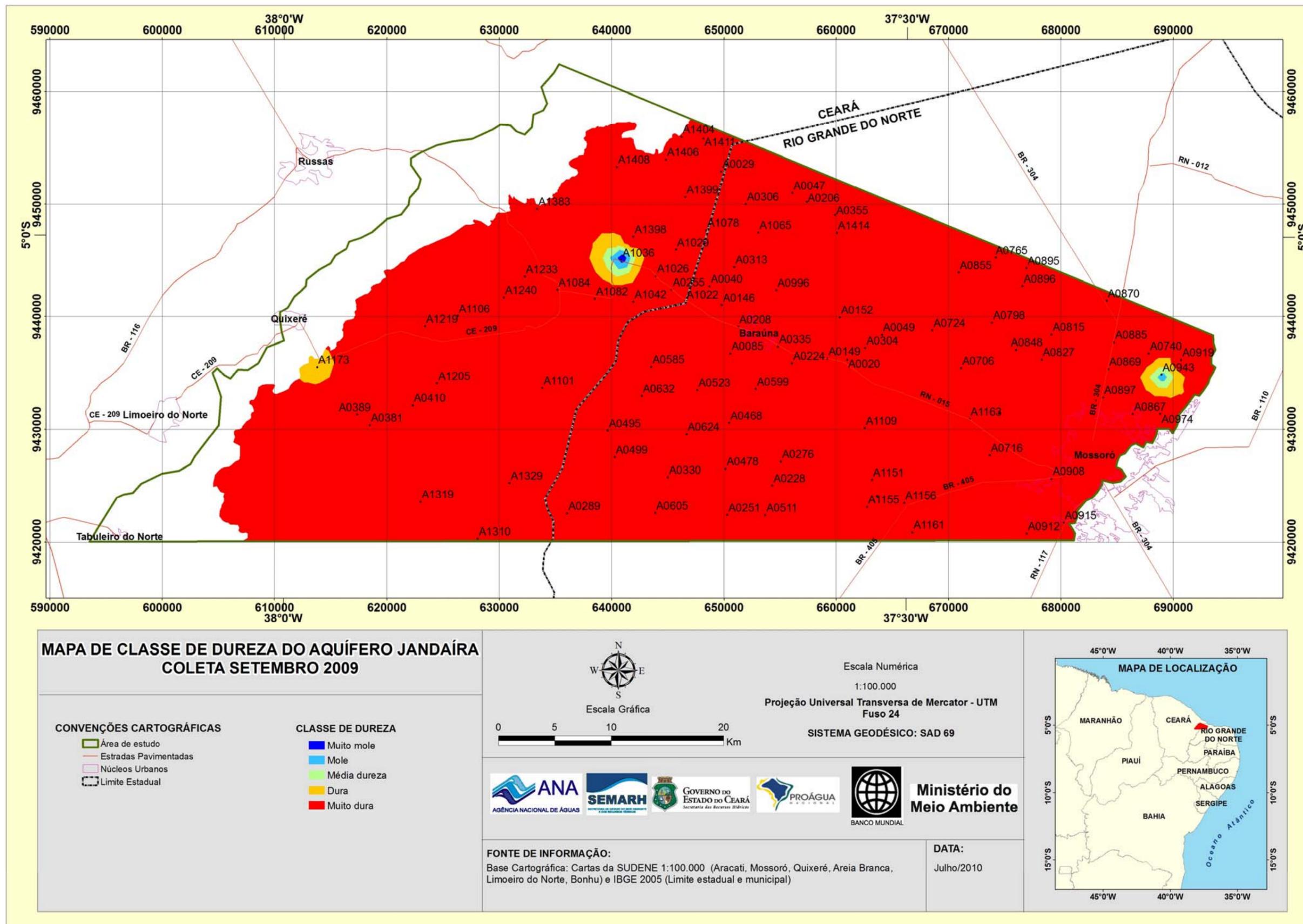


Figura 5.27 – Distribuição espacial da dureza no aquífero Jandaíra segundo as categorias de águas moles a muito duras (set/09).

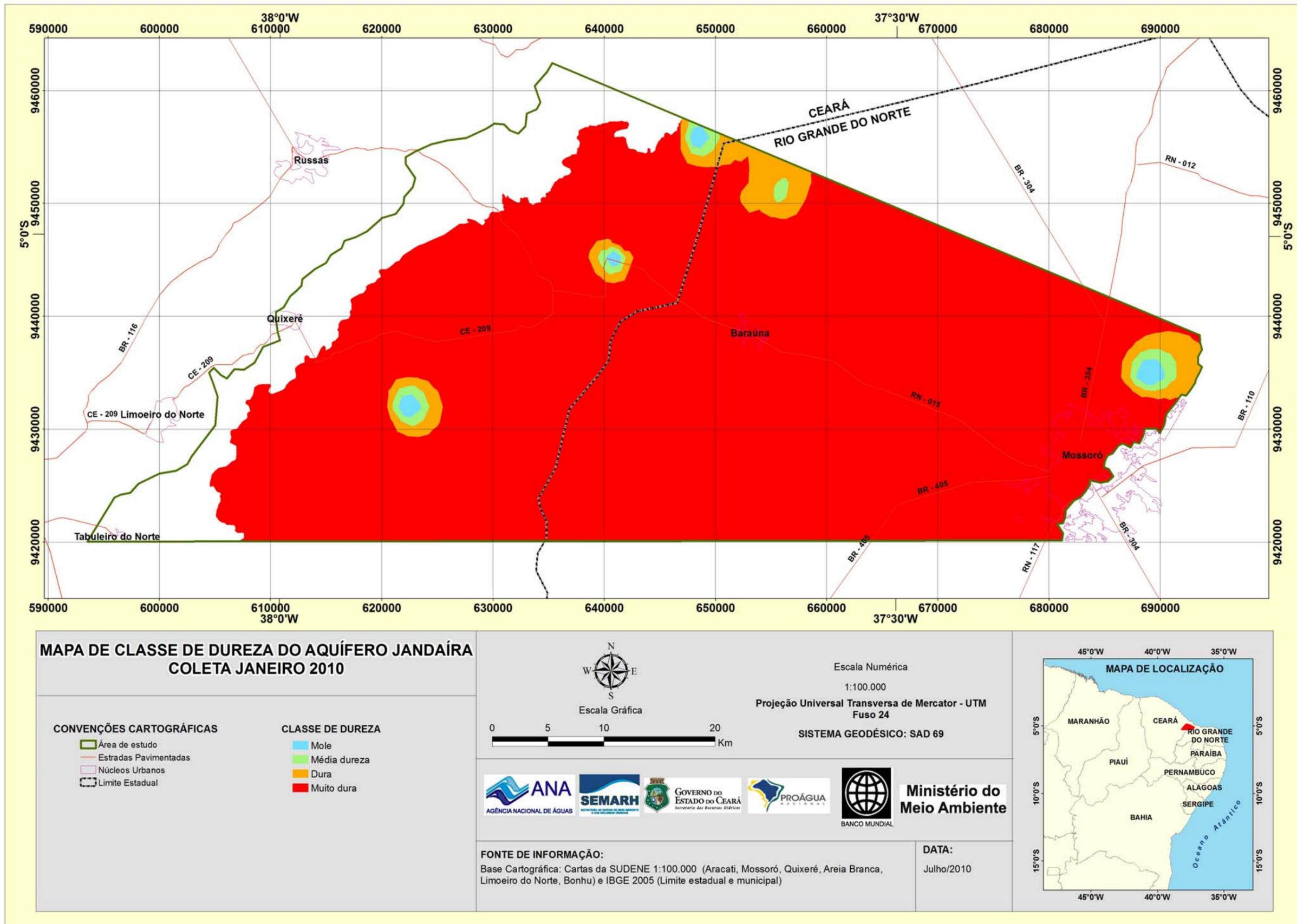


Figura 5.28 – Distribuição espacial da dureza no aquífero Jandaíra segundo as categorias de águas moles a muito duras (jan/10)

5.3.5.2 - Índices de Saturação da água em Calcita (ISC) e Dolomita (ISD)

Os Índices de Saturação de Carbonato de cálcio permitem prever a tendência de solubilização ou precipitação de CaCO_3 na água e a consequente formação de incrustações em tubulações e equipamentos. Segundo esses índices, a água pode estar em 3 condições:

IS > 0 – água supersaturada, com tendência a precipitação do CaCO_3 .

IS = 0 – água saturada, em equilíbrio.

IS < 0 – água subsaturada, com tendência a dissolução de CaCO_3 .

As **tabelas A5.4a** e **A5.4b** apresentam os índices de saturação de calcita (ISC) e de dolomita (ISD) das amostras no aquífero Jandaíra dos municípios de Baraúna, Mossoró, Jaguaruana e Quixeré e Limoeiro do Norte, respectivamente. E a **tabela A5.4c** apresenta os índices de saturação de calcita (ISC) e de dolomita (ISD) das amostras no aquífero Açú.

Na área estudada a saturação de calcita é maior do que a saturação da dolomita isso ocorre porque a calcita é mais solúvel do que a dolomita e provavelmente o mineral carbonatado predominante é a calcita.

5.3.6 - Razões iônicas no aquífero Jandaíra

Razões entre íons dissolvidos nas águas dão indícios da sua origem; a estatística das relações $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$, Na^+/Cl^- , $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$, nas águas do aquífero Jandaíra é mostrada na **tabela 5.16**.

Tabela 5.16 - Estatística das razões iônicas nas amostras das águas do aquífero Jandaíra.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
Valores mais baixos (Setores central e oeste)					
$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	0,5	0,3	0,0	1,6	0,5
Na^+/Cl^-	0,7	0,2	0,1	1,4	0,7
$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	0,9	0,7	0,2	3,8	0,7
Valores mais altos (Setor Leste)					
$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	2,4	1,7	1,6	7,3	1,8
Na^+/Cl^-	13,3	6,7	4,5	24,3	11,6

5.3.6.1 – Mapas de Razões Iônicas no aquífero Jandaíra

As **figuras 5.29 a 5.34** apresentam os mapas de zoneamento das razões iônicas rMg^{2+}/rCa^{2+} , rNa^+/rCl^- e $rCl^-/rHCO_3^-$, respectivamente, com amostras das coletas de (set/09) e de (jan/10). A dissolução de calcário ($CaCO_3$) diminui a razão rMg^{2+}/rCa^{2+} (**figuras 5.29 e 5.30**) e sua precipitação eleva a concentração de cálcio e aumenta esta razão no período seco.

Com a recarga, cloretos dos aerossóis chegam ao aquífero e a razão Na^+/Cl^- diminui na área de recarga, centro sul da área; a diminuição da razão $rCl^-/rHCO_3^-$ é também decorrente da chegada de água bicarbonatada.

As concentrações de cálcio são mais elevadas, em cerca de duas vezes, do que as concentrações de magnésio no aquífero Jandaíra; por isso, o efeito da diluição com águas de recarga é a diminuição da **razão Mg^{2+}/Ca^{2+}** a oeste da área.

A recarga com água bicarbonatada mista produz diluição diminuindo a **razão Na^+/Cl^-** em toda a área. Os mapas de zoneamento no aquífero Jandaíra desta razão nas duas coletas mostram a intensidade da mudança. Este processo também é responsável pelas mudanças na **razão Cl^-/HCO_3^-** como mostram os mapas de zoneamento diminuindo esta razão em toda a área.

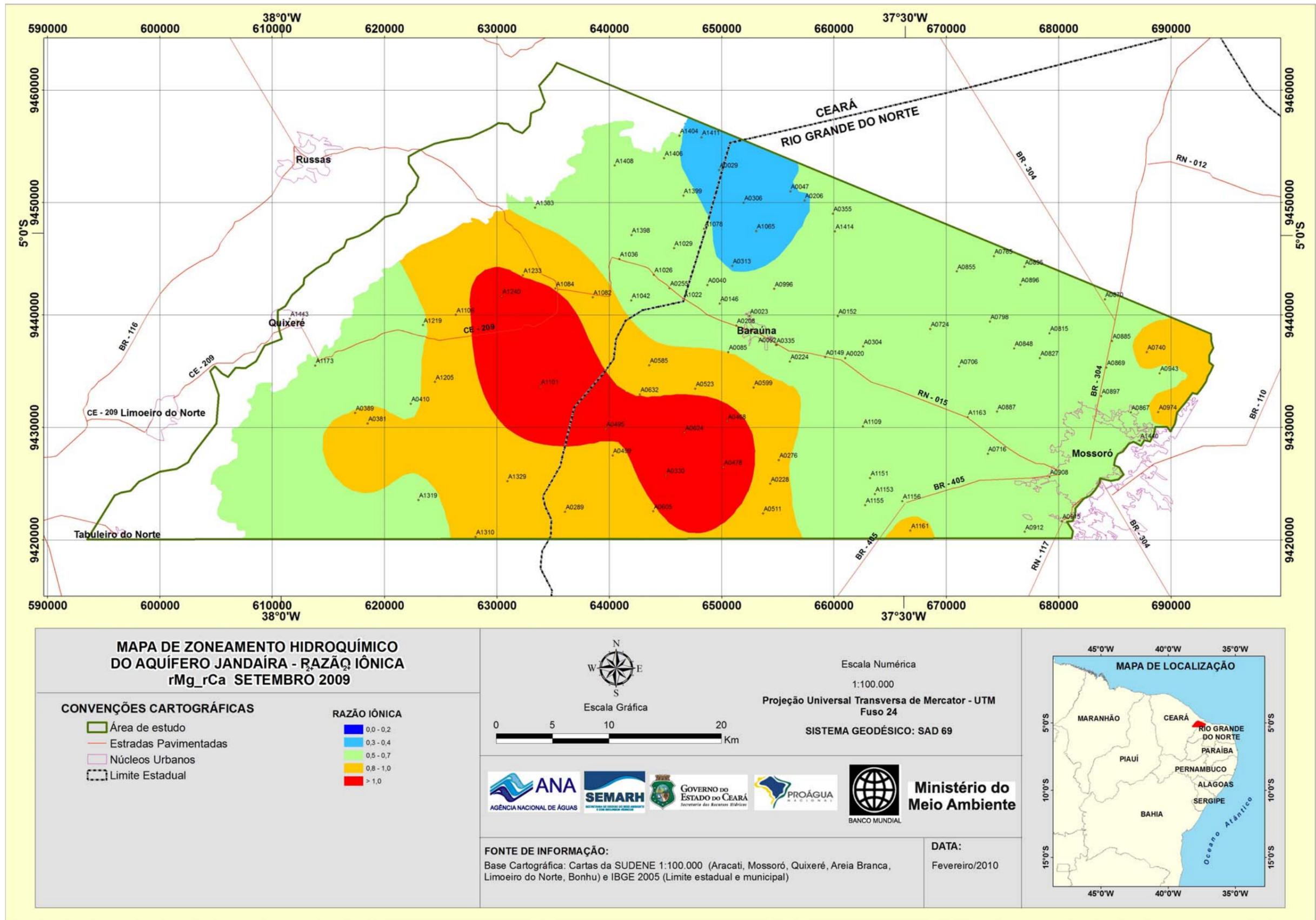


Figura 5.29 - Mapa de zoneamento da razão iônica rMg^{2+}/rCa^{2+} nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).

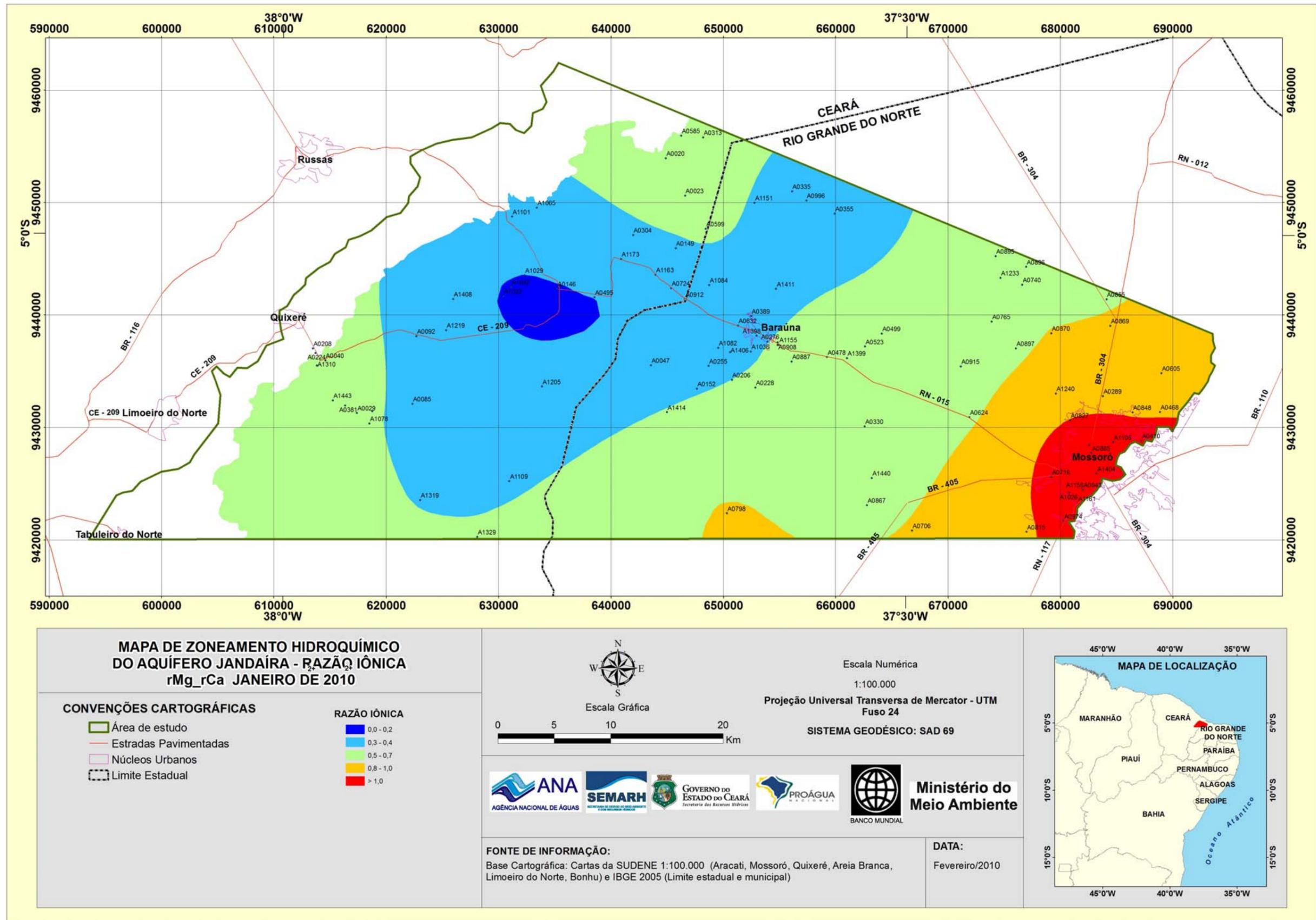


Figura 5.30 - Mapa de zoneamento da razão iônica rMg^{2+}/rCa^{2+} nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).

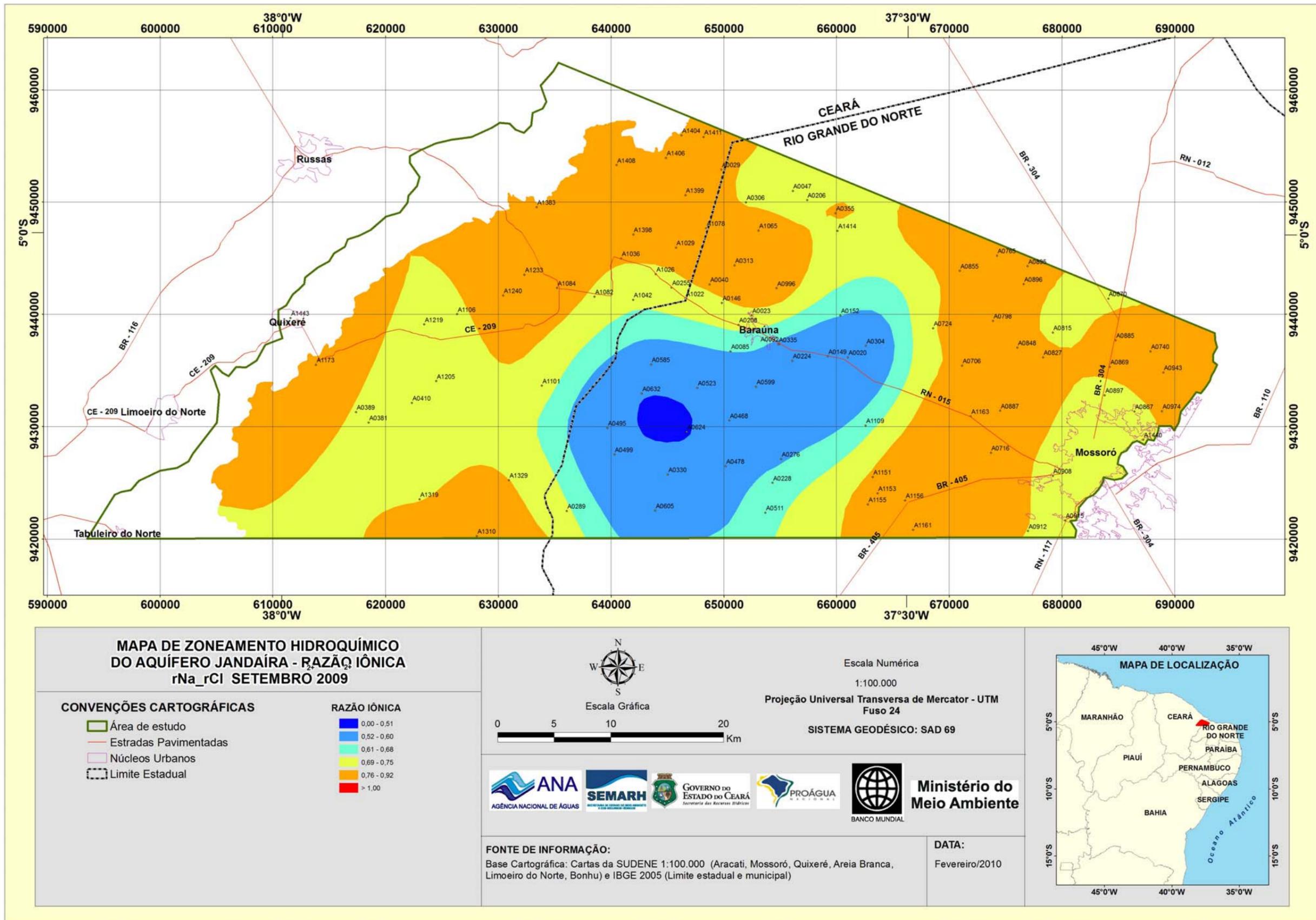


Figura 5.31 - Mapa de zoneamento da razão iônica rNa^+/rCl^- nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).

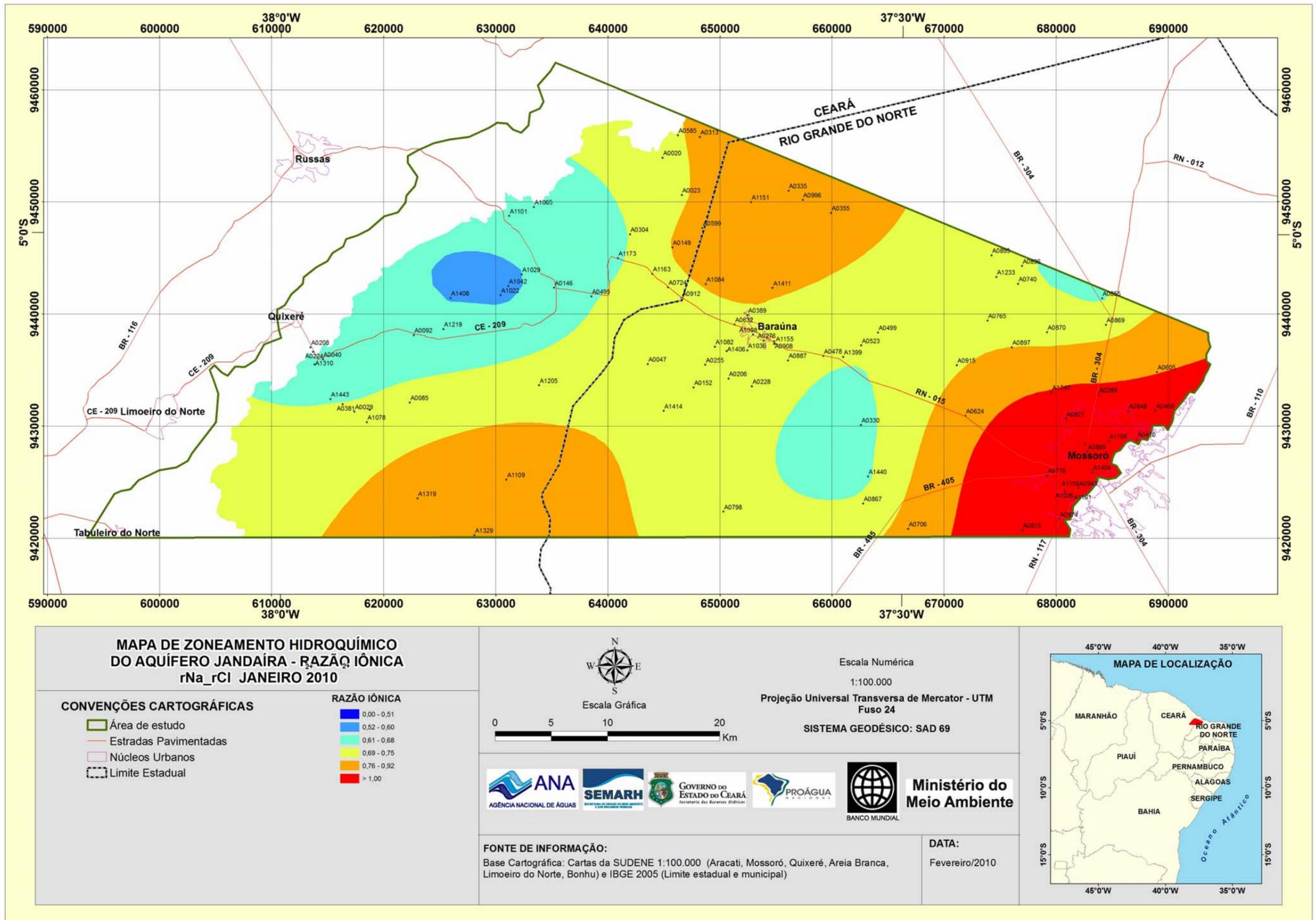


Figura 5.32 - Mapa de zoneamento da razão iônica rNa^+/rCl^- nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).

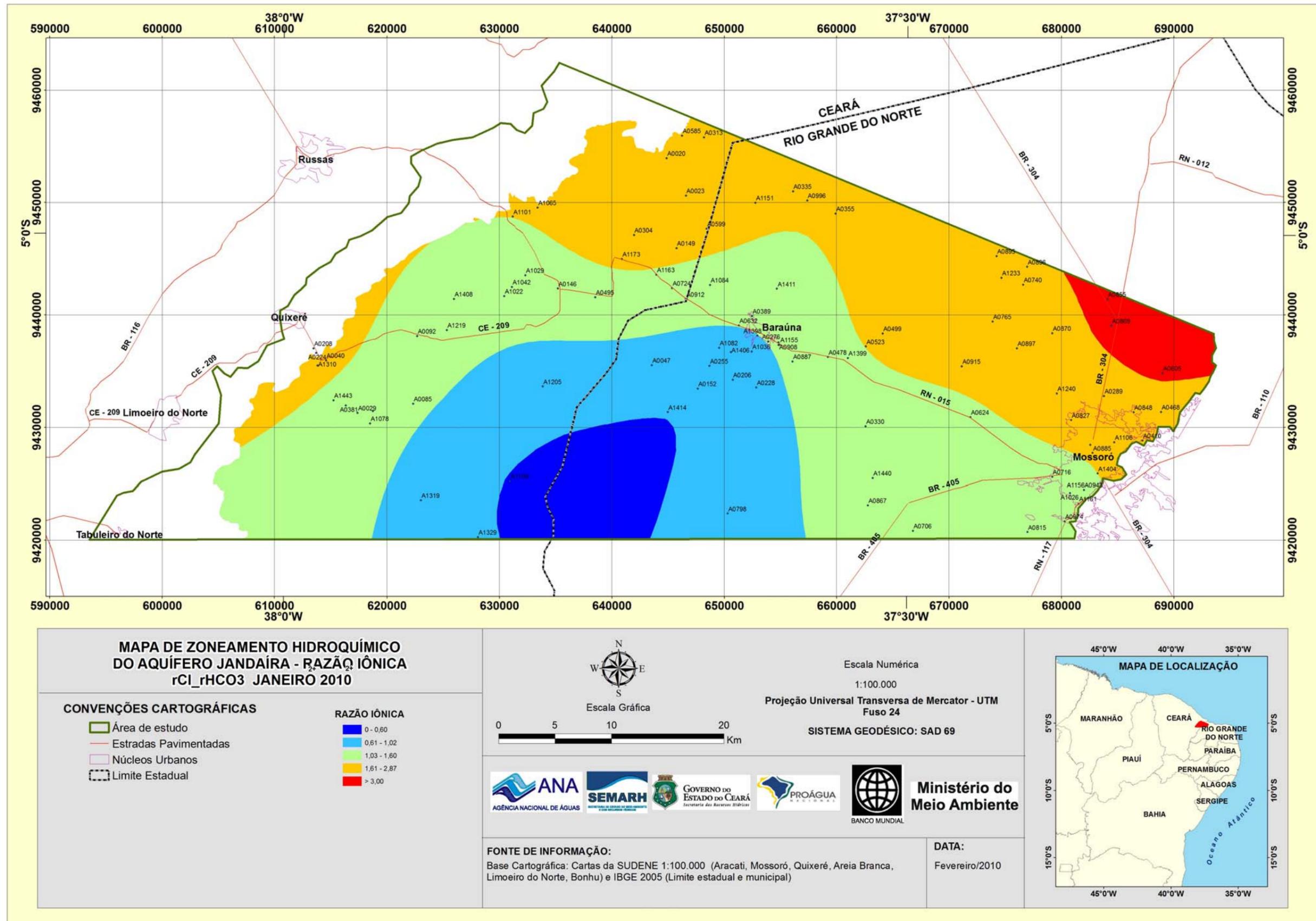


Figura 5.33 - Mapa de zoneamento da razão iônica $r_{Cl/rHCO_3}$ nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).

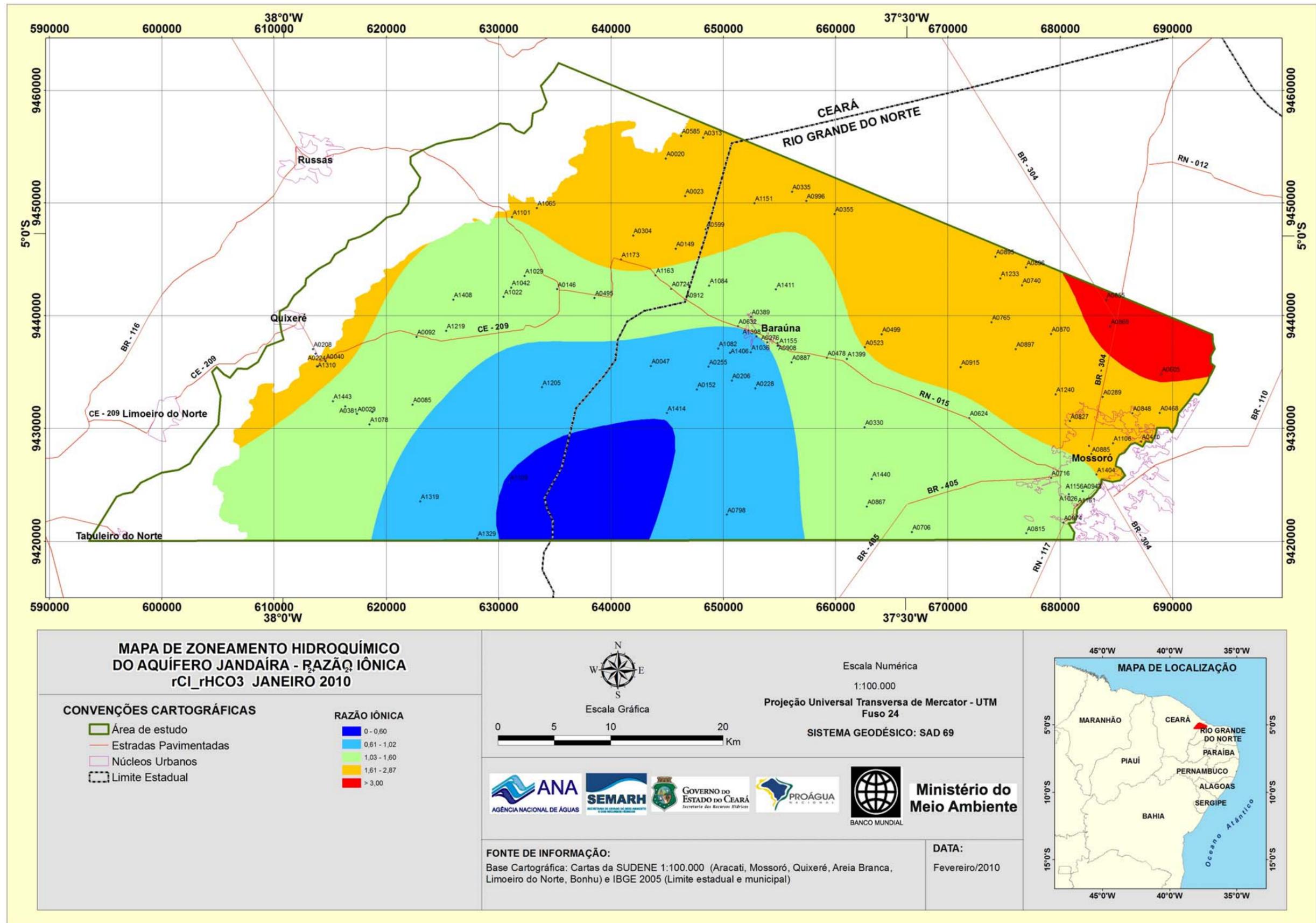


Figura 5.34 - Mapa de zoneamento da razão iônica $rCl/rHCO_3^-$ nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).

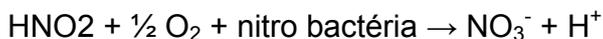
5.3.7 – Compostos nitrogenados – aquífero Jandaíra

A quantidade de nitrogênio na água pode indicar poluição recente ou remota. O nitrogênio pode estar presente sob as suas diversas formas compostas: orgânica, amoniacal, nitrito (NO_2^-) e nitratos (NO_3^-); ele segue um ciclo desde o organismo vivo até a mineralização total, onde está presente sob a forma de nitrato.

Assim, é possível avaliar o grau e a distância a uma fonte de poluição através das concentrações e das formas dos compostos nitrogenados presentes na água. Águas com predominância de nitrogênio orgânico e amoniacal são poluídas por descargas de esgotos próximos. Águas com concentrações de nitrato predominantes sobre nitrito e amônia indicam poluição remota, porque os íons nitrato são produtos finais de oxidação do nitrogênio.

Os nitratos são muito solúveis e, por isso, dificilmente precipitam; eles tendem a estabilidade em meios redutores, podendo passar a N_2 ou NH_4^+ e excepcionalmente a nitrito (NO_2^-). Esta redução é um fenômeno principalmente biológico produzido pelas bactérias Nitrossomas. A maioria dos compostos nitrogenados passa a NO_3^- em meio oxidante, enquanto o amônio (NH_4^+) pode transformar-se parcialmente em N_2 . O solo pode fixar nitrato (NO_3^-), em especial através da vegetação.

A nitrificação é um processo de oxidação que ocorre em dois estágios; através dele a amônia é convertida em nitrito e depois em nitrato.



As concentrações de nitrato nas águas naturais estão na faixa de 0,1 a 10 mg/L; porém, em águas muito poluídas podem chegar a 200 mg/L; em alguns casos de áreas influenciadas por aplicações excessivas de fertilizantes, as concentrações podem ser maiores que 600 mg/L.

Nitrogênio inorgânico pode existir no estado livre como gás, nitrito, nitrato e amônia. Com exceção de algumas ocorrências como sais evaporíticos, o nitrogênio e seus compostos não são encontrados nas rochas da crosta terrestre. Nas águas subterrâneas, os nitratos ocorrem em teores, em geral, abaixo de 5 mg/L. Nitritos e amônia são ausentes, pois são rapidamente convertidos a nitrato pelas bactérias; pequeno teor de nitrito e amônia é sinal de poluição orgânica recente.

Independente da sua origem, que também pode ser mineral, os nitratos em concentrações acima de 45 mg/L provocam em crianças a cianose ou methemoglobinemia, condição mórbida associadas à descoloração da pele, em consequência de alterações no sangue.

No sistema digestivo, o nitrato é transformado em nitrosaminas, que são substâncias carcinógenas. Crianças com menos de três meses de idade têm, em seu aparelho digestivo, bactérias que reduzem o nitrato a nitrito. Este se liga muito fortemente a moléculas de hemoglobina, impedindo-as de transportar oxigênio

para as células do organismo. A deficiência em oxigênio leva a danos neurológicos permanentes, dificuldade de respiração (falta de ar) e em casos mais sérios, à morte por asfixia. Aos seis meses de idade a concentração de ácido hidrolórico aumenta no estômago, matando as bactérias redutoras de nitrato.

De acordo com a Resolução 396 do CONAMA (2008) as restrições quanto às concentrações de nitrito e nitrato são os VMP indicados na **tabela 5.17**; quando expressos em $N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$ estes valores para consumo humano são 1,5; 1,0 e 10 mg/L, respectivamente.

Tabela 5.17 - Restrições quanto às concentrações de nitrito e nitrato (CONAMA, 2008).

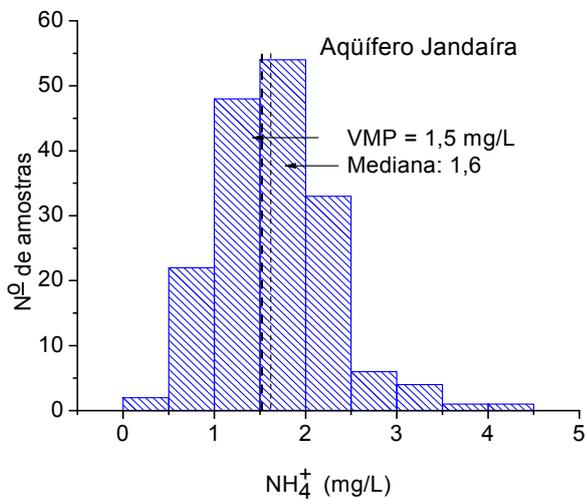
Uso	VMP em NO_2^- (mg/L)	VMP em NO_3^- (mg/L)
Consumo Humano	3,3	45
Dessedentação de animais	33	405
Irrigação	3,3	-
Recreação	3,3	45

Os compostos nitrogenados aparecem por ação antrópica, nas atividades agrícolas ou na decomposição de matéria orgânica. Nos histogramas da **figura 5.35** estão os VMP de cada parâmetro e as medianas. Os dados de concentração destes compostos em poços e fontes do aquífero Jandaíra estão mostrados nas **tabelas A5.2a** (set/09) e **A5.2d** (jan/10).

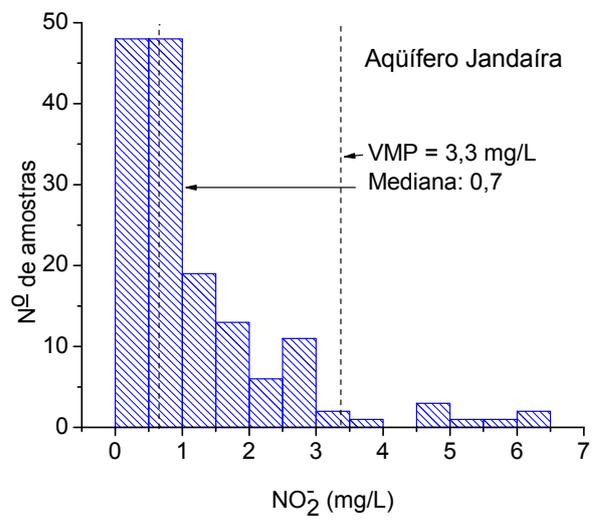
Concentrações de NO_2^- estão na maioria abaixo de 7 mg/L; os valores mais altos não foram colocados no histograma da **figura 5.35**, mas são considerados na classificação das águas. Nas amostras de três fontes do aquífero Jandaíra estes parâmetros estão em concentrações muito abaixo dos valores do VMP.

Estes compostos produzem danos à saúde de consumidores quando ultrapassam os limites determinados pelo CONAMA (2008): de 3,3 mg/L de nitrito para consumo humano e irrigação e de 45 mg/L de nitrato para consumo humano. Pelos histogramas da **figura 5.35** observa-se que os limites foram amplamente ultrapassados pelo nitrito e nitrato em águas do Jandaíra.

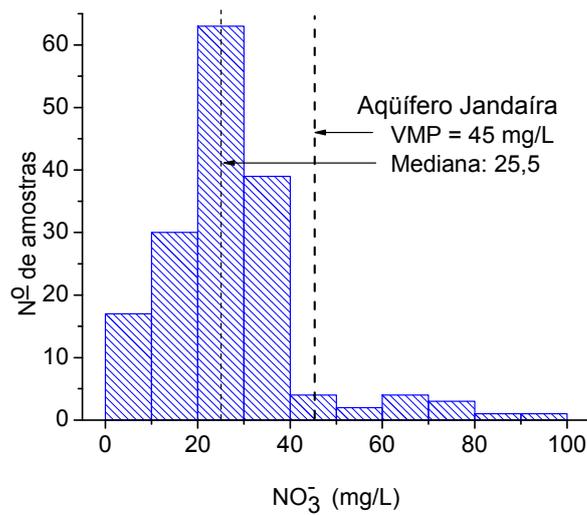
Em quase todas as amostras do aquífero Jandaíra foi encontrado nitrato que pode ser originário de esgotos ou de fertilizantes. Como a distinção entre as origens só pode ser feita através de medidas do isótopo nitrogênio-15, pode-se somente considerar que nas áreas de agricultura intensiva onde são adicionados nutrientes a origem é dos fertilizantes e nas habitadas é originário de esgotos sanitários.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.35 - Compostos nitrogenados; (a) amônia, (b) nitrito (c) nitrato em águas do aquífero Jandaíra.

A **tabela 5.18**, de frequência dos teores dos compostos nitrogenados medidos no aquífero Jandaíra, mostra que os **valores acima do VMP** em set/09 atingem 47% (46/97) para a amônia, 40% (39/97) para o nitrito e 9% (9/97) para o nitrato. Em jan/10 o percentual de valores aumentou para a amônia, representando 63% (52/83) enquanto diminuiu para os demais compostos, ficando, respectivamente, em 27% (22/83) para o nitrito e em 6% (5/83) para o nitrato.

Para caracterizar a distribuição espacial da contaminação por nitrato na área do projeto, foram elaborados os mapas de zoneamento apresentados na **figura 5.36** referente à coleta de set/09 e na **figura 5.37**, referente à amostragem de jan/10. Nota-se que entre set/09 os locais contaminados com valores acima do VMP se distribuem em zonas isoladas relativamente afastadas umas das outras desde e que podem ser vistas no vale do Apodi, na região a leste e sul de Baraúna e no oeste da área, nas regiões de Tiradentes e Tomé.

Em jan/10, com exceção das proximidades do vale do Apodi, onde a contaminação se manifesta de forma bem menos intensa, refletindo prováveis diluições por recarga, a situação em set/09 praticamente se repete no restante da área, nas mesmas zonas ou em suas proximidades.

Admite-se que no vale do Apodi as contaminações muito provavelmente se devem ao desenvolvimento urbano. Nas partes centrais e oeste da área de estudo, onde existe pequena urbanização, é mais provável que a presença de nitrogênio nas águas do Jandaíra seja devida ao uso de fertilizantes na atividade agrícola.

Tabela 5.18 – Frequência dos teores de compostos nitrogenados no aquífero Jandaíra.

Classe	Frequencia	Frequencia acumulada	Frequencia relativa	% Acumulado
set/09				
Amônia aquífero Jandaíra - (mg/L)				
0,0<x<=0,5	1	1	0,0103	0,0103
0,5<x<=1,0	13	14	0,1340	0,1443
1,0<x<=1,5*	37	51	0,3814	0,5258
1,5<x<=2,0	20	71	0,2062	0,7320
2,0<x<=2,5	17	88	0,1753	0,9072
x>2,5	9	97	0,0928	1,0000
Nitrito aquífero Jandaíra - (mg/L)				
0,0<x<=0,5	31	31	0,3196	0,3196
0,5<x<=1,0	17	48	0,1753	0,4948
1,0<x<=1,5*	10	58	0,1031	0,5979
1,5<x<=2,0	7	65	0,0722	0,6701
2,0<x<=2,5	5	70	0,0515	0,7216
x>2,5	27	97	0,2784	1,0000
Nitrato aquífero Jandaíra - (mg/L)				
0<x<=15	23	23	0,2371	0,2371
15<x<=30	44	67	0,4536	0,6907
30<x<=45	21	88	0,2165	0,9072
x>45	9	97	0,0928	1,0000
jan/10				
0,0<x<=0,5	3	3	0,0309	0,0361
0,5<x<=1,0	11	14	0,1134	0,1687
1,0<x<=1,5*	17	31	0,1753	0,3735
1,5<x<=2,0	31	62	0,3196	0,7470
2,0<x<=2,5	16	78	0,1649	0,9398
x>2,5	5	83	0,0515	1,0000
Nitrito aquífero Jandaíra - (mg/L)				
0,0<x<=0,5	27	27	0,3253	0,3253
0,5<x<=1,0	22	49	0,2651	0,5904
1,0<x<=1,5*	12	61	0,1446	0,7349
1,5<x<=2,0	5	66	0,0602	0,7952
2,0<x<=2,5	1	67	0,0120	0,8072
x>2,5	16	83	0,1928	1,0000
Nitrato aquífero Jandaíra - (mg/L)				
0<x<=15	20	20	0,2410	0,2410
15<x<=30	37	57	0,4458	0,6867
30<x<=45	21	78	0,2530	0,9398
x>45	5	83	0,0602	1,0000

*Valores em negrito < VMP

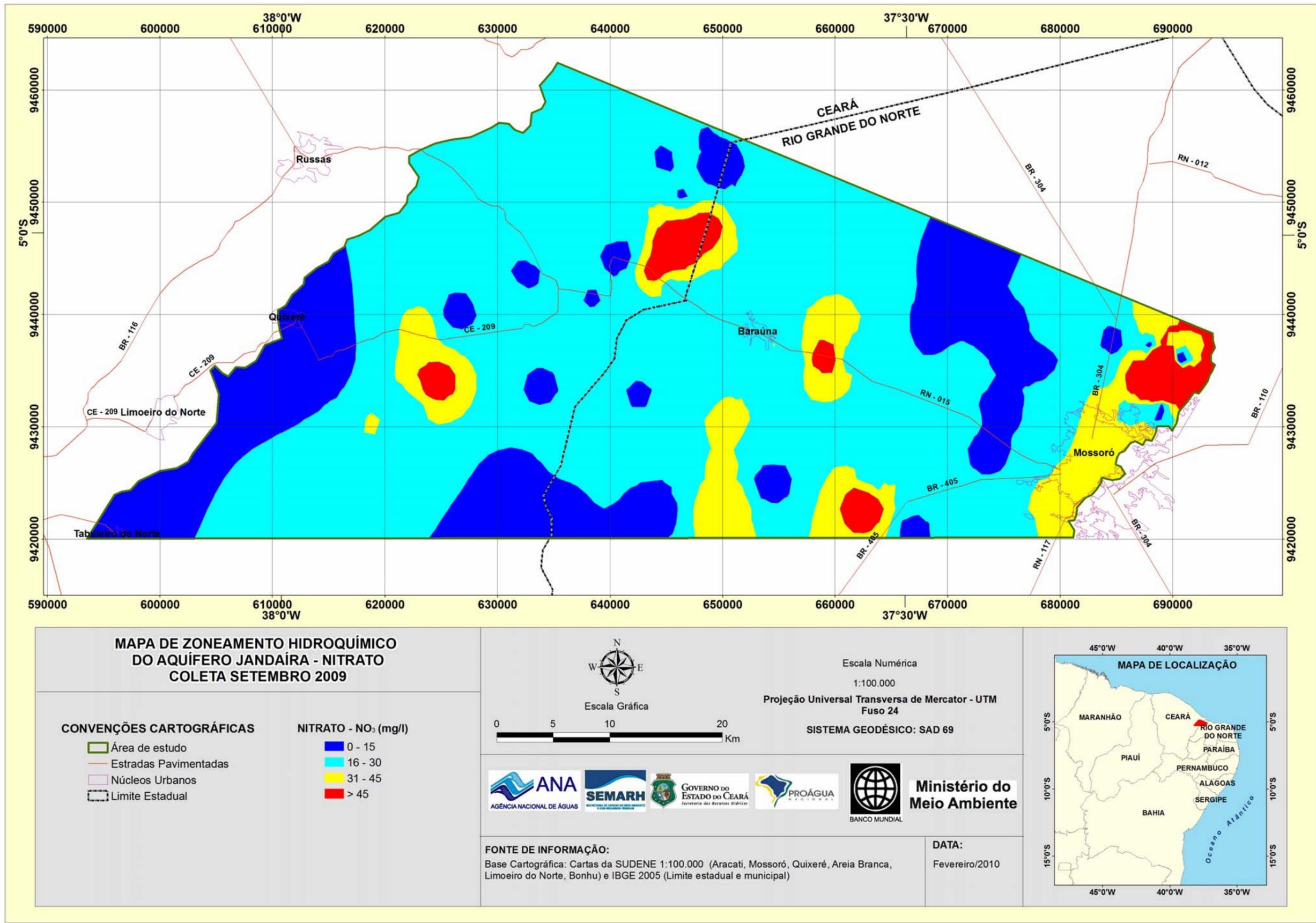


Figura 5.36 - Mapa de zoneamento do nitrato nas águas do aquífero Jandaíra (set/09).

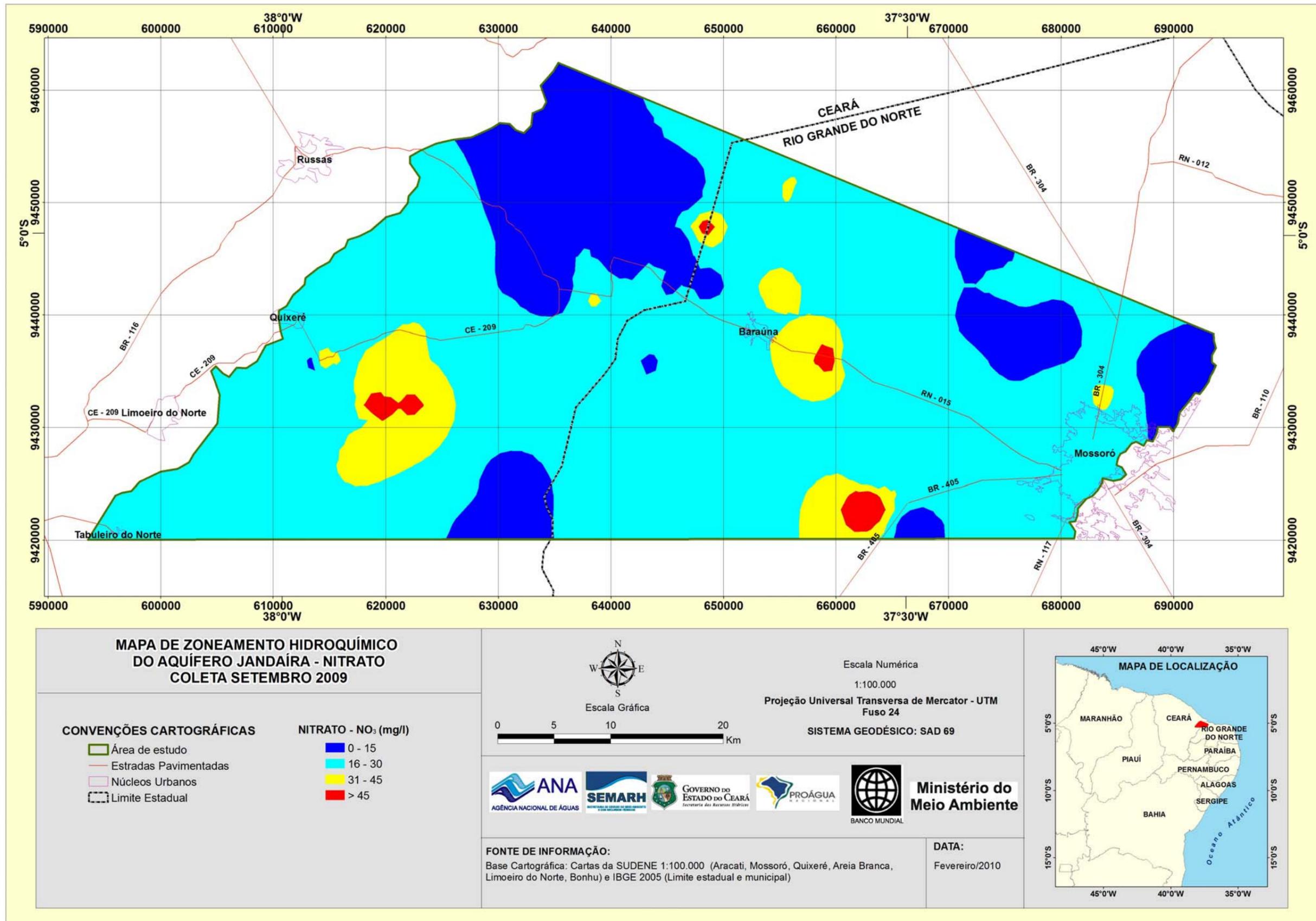


Figura 5.37 - Mapa de zoneamento do nitrato nas águas do aquífero Jandaíra (jan/10).

5.3.8 – Tipos de água - aquífero Jandaíra

O Diagrama de Piper é utilizado para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes. A representação gráfica pode evidenciar possíveis relações entre íons de uma mesma amostra ou ressaltar variações temporais ou espaciais existentes. Ele pode também identificar mistura de água e reações químicas na água subterrânea.

Para o aquífero Jandaíra o referido diagrama é apresentado na **figura 5.38**.

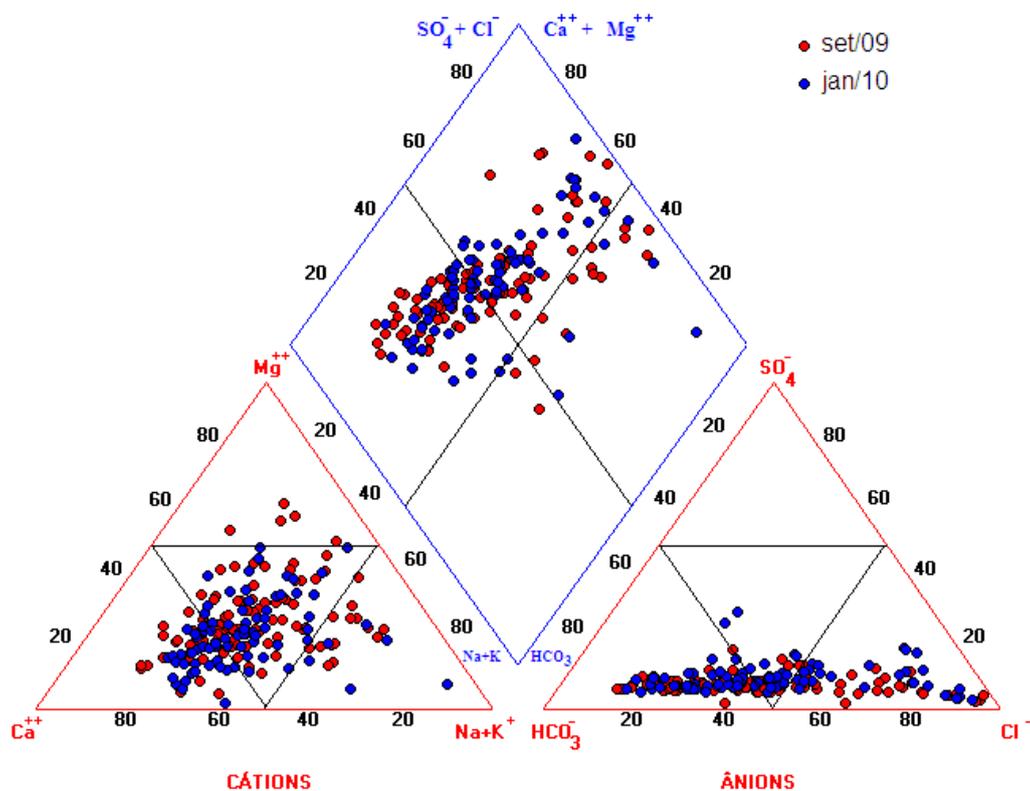


Figura 5.38 -.Diagrama de Piper com as amostras do aquífero Jandaíra coletadas em set/09 e jan/10.

A **tabela 5.19** apresenta a distribuição de frequência dos tipos de água do aquífero Jandaíra segundo os dados produzidos pelo diagrama de Piper. Nota-se que, nas duas campanhas, os tipos de água predominantes são bicarbonatadas cálcicas seguidas dos tipos cloretadas mistas e sódicas. Os demais tipos têm poucas amostras. Águas magnesianas e sulfatadas não foram encontradas, mas a presença, em caráter secundário, de magnésio foi registrada em três poços: cloretada magnesiana no poço A0724 em Mossoró e bicarbonatada magnesiana nos poços A1065 e A0151 em Baraúna.

Em set/09 21% e em jan/10 23% das amostras de água do aquífero Jandaíra na bacia do Apodi são cloretadas sódicas e mistas cloretadas. Admite-se que isto se deve ao processo de difusão molecular que acontece no aquífero freático a partir da *língua salgada* do Vale do Apodi.

Tabela 5.19– Frequência dos tipos de água no aquífero Jandaíra.

Tipo de Água	Frequencia absoluta	Frequencia acumulada	Frequencia relativa	% Acumulado
set/09				
Bicarbonatada cálcica	24	24	0,25	0,25
Bicarbonatada mista	22	46	0,23	0,47
Bicarbonatada sódica	2	48	0,02	0,49
Bicarbonatada magnesi	2	50	0,02	0,52
Cloretada mista	20	70	0,21	0,72
Cloretada sódica	9	79	0,09	0,81
Cloretada cálcica	3	82	0,03	0,85
Cloretada magnesiana	1	83	0,01	0,86
Mista mista	10	93	0,10	0,96
Mista magnesiana	2	95	0,02	0,98
Mista cálcica	0	95	0,00	0,98
Mista sódica	2	97	0,02	1,00
jan/10				
Bicarbonatada cálcica	25	25	0,30	0,30
Bicarbonatada mista	14	39	0,17	0,47
Bicarbonatada sódica	0	39	0,00	0,47
Bicarbonatada magnesi	0	39	0,00	0,47
Cloretada mista	19	58	0,23	0,70
Cloretada sódica	4	62	0,05	0,75
Cloretada cálcica	2	64	0,02	0,77
Cloretada magnesiana	1	65	0,01	0,78
Mista mista	11	76	0,13	0,92
Mista magnesiana	0	76	0,00	0,92
Mista cálcica	5	81	0,06	0,98
Mista sódica	2	83	0,02	1,00

As amostras de água coletadas em fontes do aquífero Jandaíra são bicarbonatadas cálcicas e mistas. As 04 amostras de aluvião são águas de tipos variados: cloretada mista, bicarbonatada sódica e mista sódica, como são, em geral, as águas de aluvião.

Nas águas das duas coletas no aquífero Jandaíra predominam os **tipos bicarbonatada cálcica e bicarbonatada mista** como efeito do processo de dissolução de calcários e algumas são cloretadas sódicas.

As **águas no aquífero Jandaíra** na zona leste da área são **cloretadas sódicas e cloretadas mistas**, sobretudo, no município de Mossoró e se devem ao processo de *difusão molecular*, da água salgada das marés que penetram no Vale do Apodi sob a forma de uma língua salgada e contamina a água doce do freático das aluviões e do calcário Jandaíra.

5.3.9 – Águas do Jandaíra para Irrigação

O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos desenvolveu um diagrama para classificar as águas quanto ao uso na agricultura considerando a Condutividade Elétrica como fator de salinidade e a Razão de Adsorção de Sódio como fator de risco de sódio (USSLS, 1954). A Razão de Adsorção de Sódio compara a concentração de sódio com as concentrações dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} , sendo definida como:

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2]^{1/2}$$

O referido diagrama indicativo do SAR está apresentado na **figura 5.39** com as águas do aquífero Jandaíra de condutividade elétrica inferior a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dominantes na bacia do riacho Mata Fresca e no oeste da área. Nota-se que uma quantidade significativa de pontos apresenta risco de salinidade muito alto embora com risco baixo e médio de sódio.

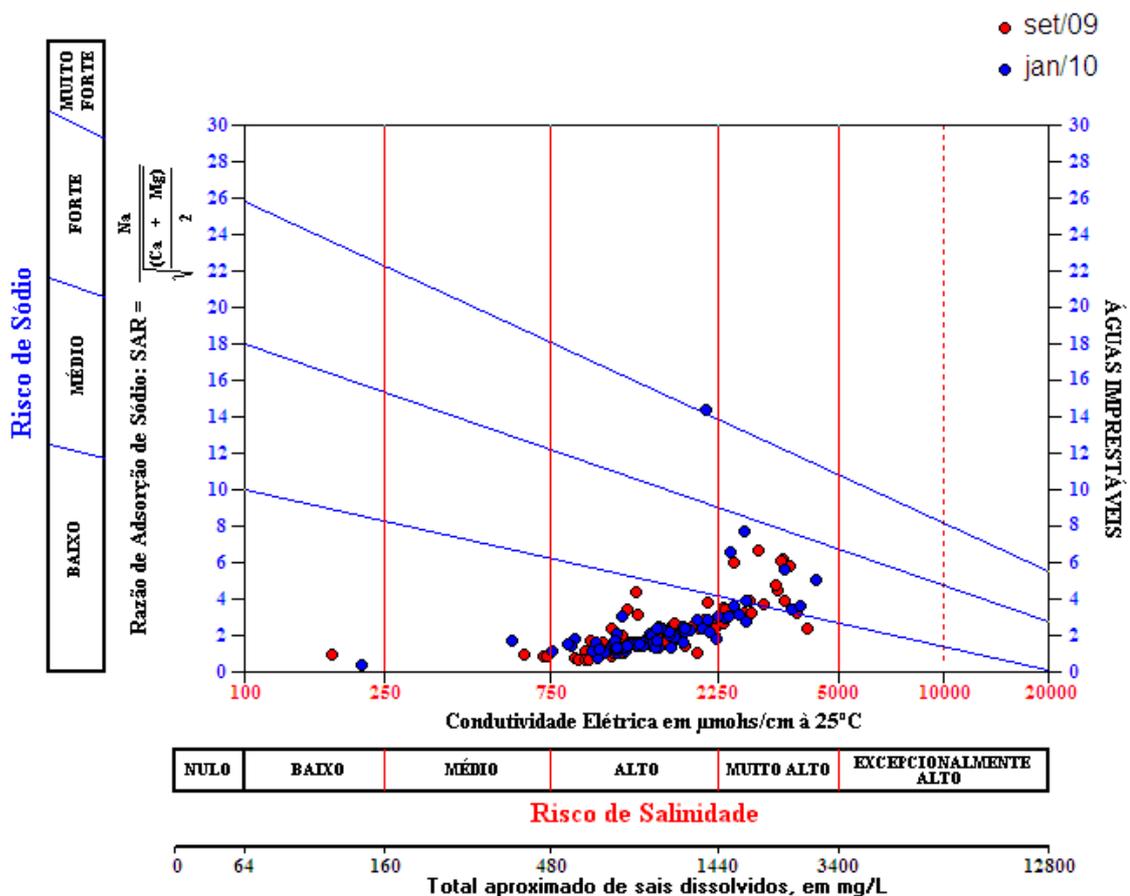


Figura 5.39 - Diagrama de Razão de Adsorção de Sódio – Aquífero Jandaíra.

No diagrama da **figura 5.40** estão amostras do aquífero Jandaíra de condutividade elétrica superior a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dominantes na zona leste da área afetada pela língua salgada do vale do Apodi, nas proximidades de Mossoró. Por se encontrarem em uma zona de difusão iônica de sais marinhos, essas águas são inadequadas ao uso na irrigação, pois apresentam risco de sódio *forte* e *muito forte* e risco de salinidade *muito alto* a *excepcionalmente alto*, como pode ser visto no referido diagrama.

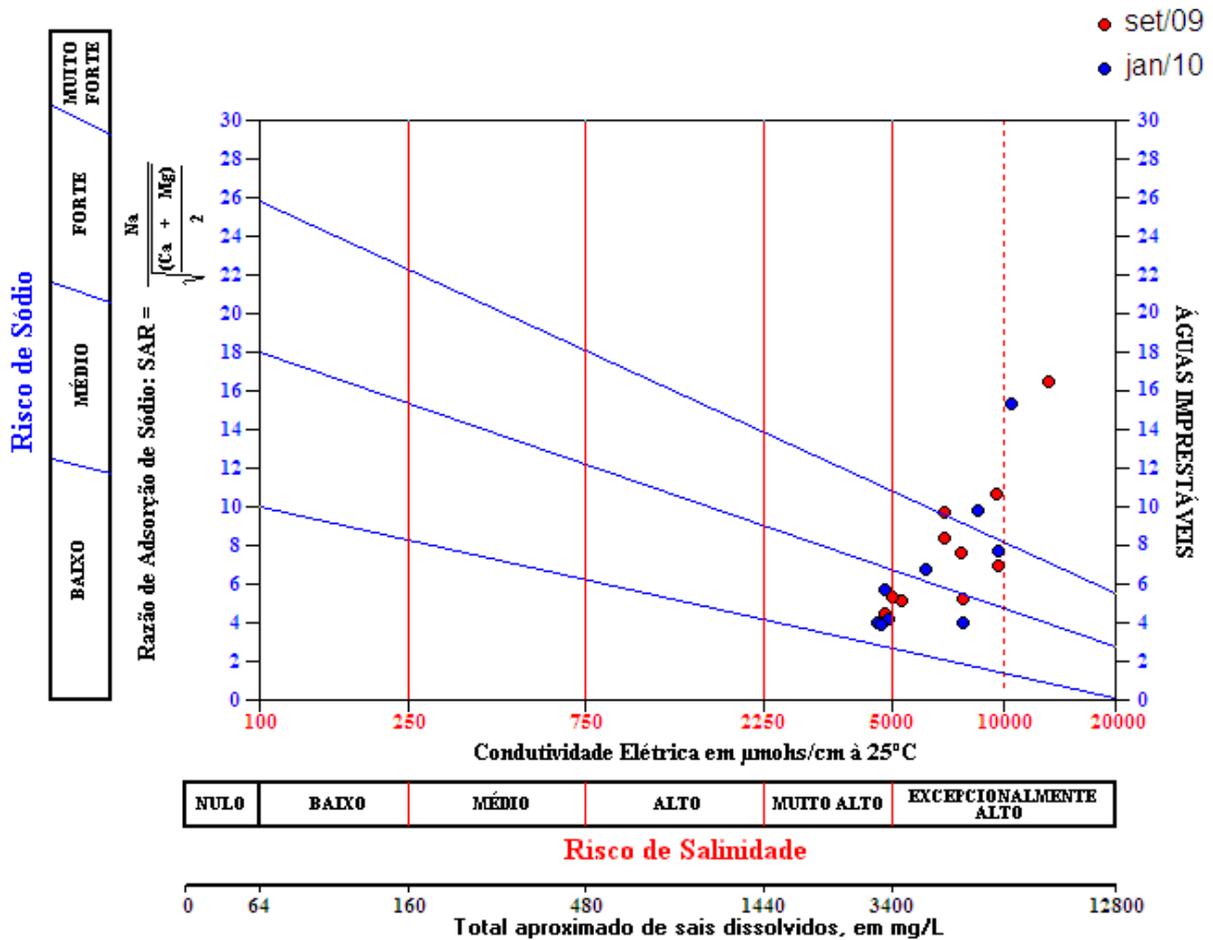


Figura 5.40 - Diagrama de Razão de Adsorção de Sódio – Aquífero Jandaíra contaminado pela língua salgada do vale do Apodi.

Segundo a distribuição de frequência das classes de água para irrigação no aquífero Jandaíra (**tabela 5.20**), 79% das amostras apresentam baixo risco de sódio porém com risco de salinidade variável de baixo (1%), a médio (2%), alto (62%) e muito alto (14%).

As águas do aquífero Jandaíra apresentam para **uso agrícola**, alto e muito **alto** **risco** de salinidade e baixo risco de sódio, características de salinização por dissolução de calcários que eleva a condutividade elétrica, mas não a concentração

de sódio. No setor leste são de muito alto a excepcionalmente alto risco de salinidade com risco de sódio médio, forte e muito forte, característico de predominância de efeito de contaminação por água do mar, que eleva a concentração de sódio com o aumento da condutividade elétrica.

Tabela 5.20 – Frequência das classes de água para irrigação no aquífero Jandaíra.

Tipo de Água	Frequência absoluta	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado	Observação
C1S1	2	2	0,01	1	Jandaíra Normal
C2S1	4	6	0,02	3	
C3S1	110	116	0,62	65	
C4S1	25	141	0,14	79	
C4S2	24	165	0,14	93	Jandaíra afetado pela Língua Salgada no Vale do Apodi
C5S2	3	168	0,02	95	
C5S3	5	173	0,03	98	
C5S4	2	175	0,01	99	
C6S4	2	177	0,01	100	

Predomina, portanto, como se vê, o risco alto de salinidade. Os 21% restantes das amostras apresentaram águas com riscos de sódio médio (16%), forte (3%) e muito forte (2%), associado com riscos de salinidade variáveis de muito alto (14%), a excepcionalmente alto (7%).

O histograma de frequência das classes de água do aquífero Jandaíra para irrigação apresentado na **figura 5.41**, com dados dos diagramas das **figuras 5.39 e 5.40**, mostra a predominância de águas C3S1 (62%) que, embora tenham baixo risco de sódio, têm alto risco de salinidade sendo águas adequadas somente para uso em solo bem drenado.

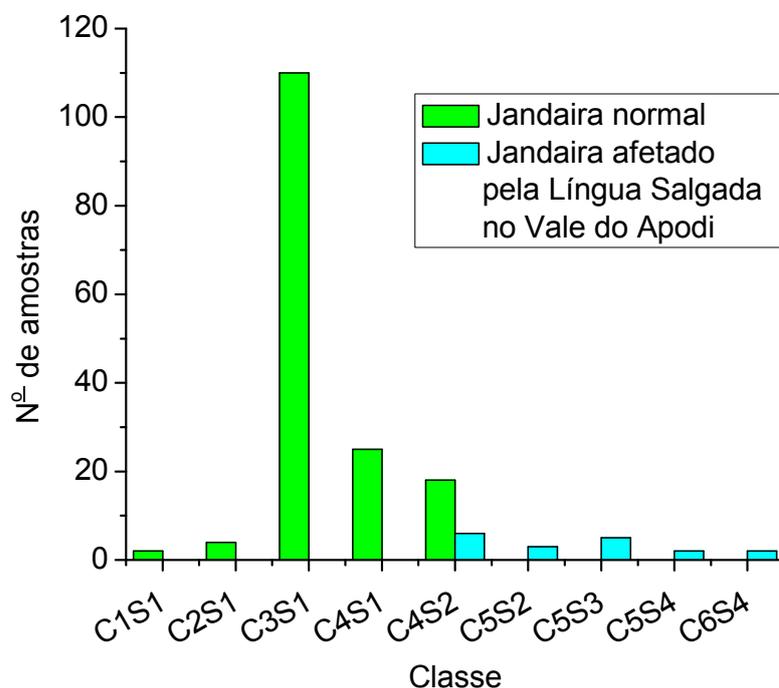


Figura 5.41 - Histograma de classes de água para irrigação do aquífero Jandaíra conforme diagrama RAS vs CE.

O histograma das classes para uso na irrigação (**figura 5.42**) mostra que nas duas coletas (set/09 e jan/10) predominavam no aquífero Jandaíra águas do tipo C3S1, que devem ser usadas somente em solos bem drenados. Para fins comparativos o diagrama também mostra que as águas do aquífero Açú, são do tipo C2S1, portanto adequadas a solos moderadamente drenados, ou seja, melhores para a agricultura irrigada do que as do calcário Jandaíra.

A maioria das amostras do aquífero Jandaíra mostrou elevado **risco de salinidade**, para uso na irrigação; no entanto, são águas de recargas recentes, portanto francamente renováveis como indicam as análises isotópicas. As águas do Jandaíra no setor leste se acham contaminadas por água salgada e não são adequadas à irrigação. A amostra do poço A0919, em Mossoró mostrou a influência de uma salina próxima.

A **salinidade do aquífero Jandaíra** é efeito de processo natural que a torna, em algumas áreas, próxima da saturação ou super saturada de calcita e próxima da saturação de dolomita.

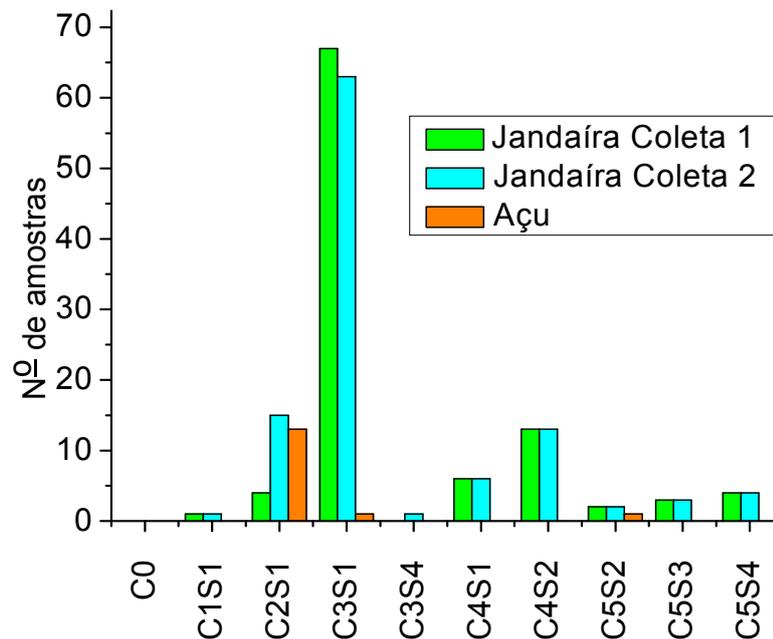


Figura 5.42 - Histograma com a classificação das águas do aquífero Jandaíra para uso na agricultura.

A maioria das amostras do Jandaíra no **setor leste da área** se encontra no município de Mossoró; a proximidade da costa intensifica a presença de uma *língua salgada* no Vale do Apodi. As águas coletadas nesta área são cloretadas mistas e cloretadas sódicas. Por causa da inexistência de correlação entre a condutividade elétrica e os isótopos ambientais, se verifica que diferentes processos de salinização estão ocorrendo e não somente a dissolução de calcários.

Admite-se que a **salinização de origem marinha** que ocorre no setor leste da área é produzida por um processo de *difusão molecular* a partir da língua salgada do Vale do Apodi governada pelas marés.

5.3.9.1 – Mapas de Classes de Água para Irrigação – aquífero Jandaíra

O zoneamento da qualidade das águas do aquífero Jandaíra para irrigação é ilustrado na **figura 5.43** para set/09 e na **figura 5.44** para jan/10.

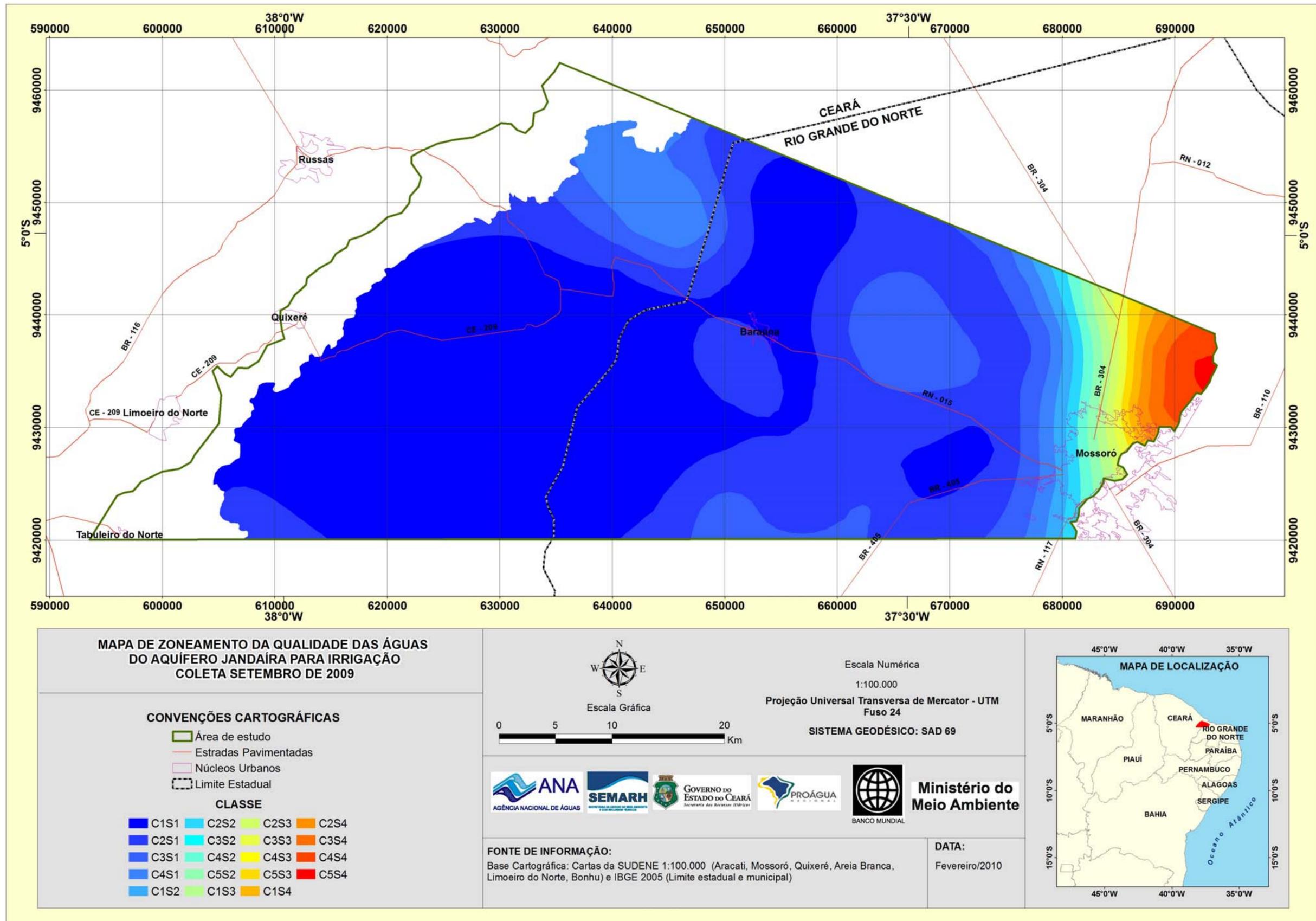


Figura 5.43 - Mapa de zoneamento da qualidade das águas do aquífero Jandaíra para irrigação (set09).

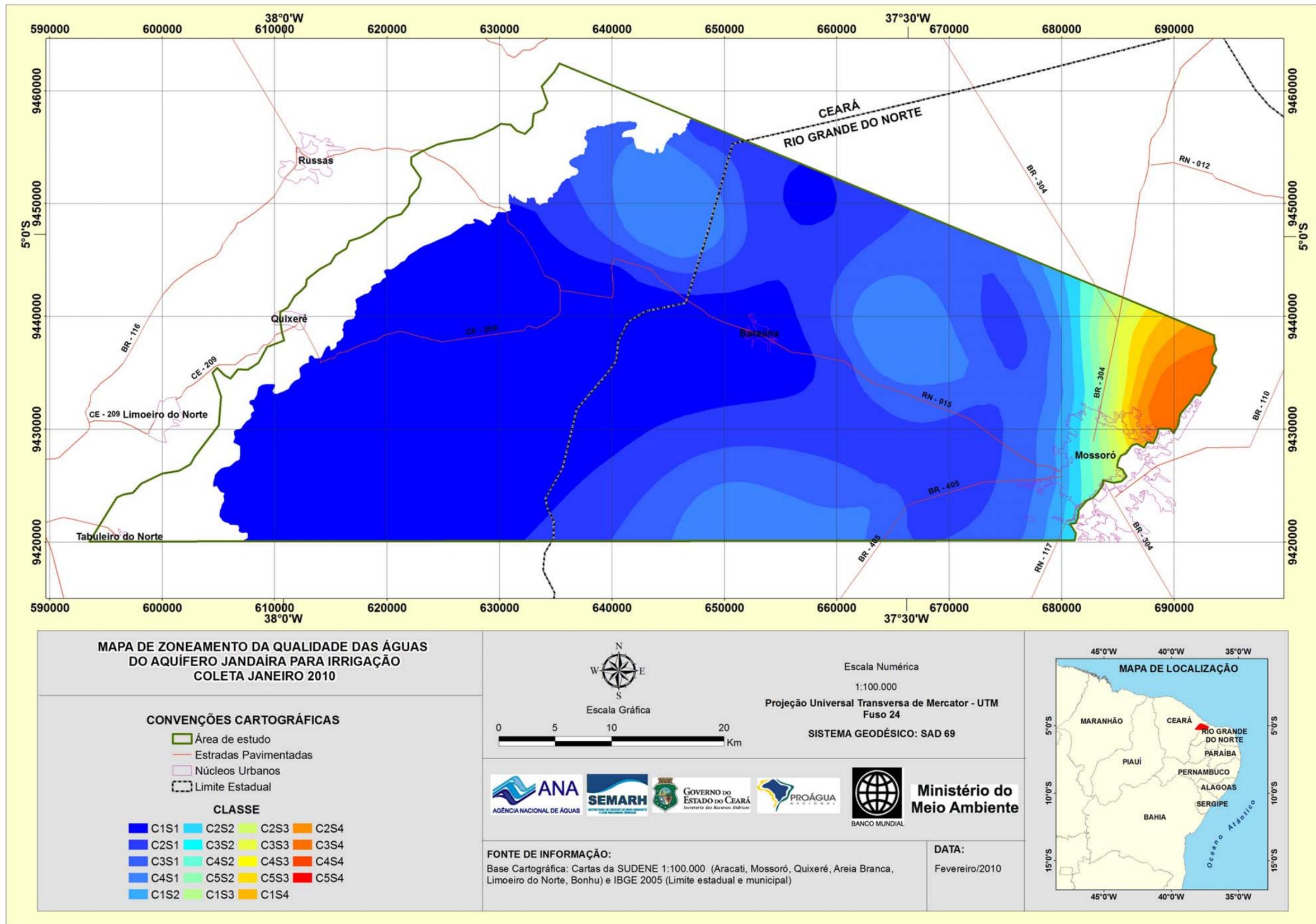


Figura 5.44 - Mapa de zoneamento da qualidade das águas do aquífero Jandaíra para irrigação (jan10).

5.3.10 - Potabilidade das águas do Jandaíra

5.3.10.1 – STD, Cor e Turbidez

STD – aquífero Jandaíra

Sólidos Totais Dissolvidos (STD) correspondem à massa total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Na maioria das águas naturais, a condutividade elétrica (CE) da água, multiplicada por um fator que varia entre 0,55 e 0,75, gera uma boa estimativa de STD. No Nordeste do Brasil, o STD em mg/L pode ser calculado a partir dos valores de CE em $\mu\text{S}/\text{cm}$, multiplicados por um fator de 0,64 (Suassuna, 1996).

Correspondem a toda matéria que permanece como resíduo após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida, durante um tempo fixado. As operações de secagem, calcinação e filtração são as que definem as diversas frações de sólidos presentes na água (sólidos totais, em suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis); são também chamados de resíduo à 105 ° C. Com base nos valores estimados de STD, as águas são classificadas em Doces, Salobras ou Salgadas de acordo com a **tabela 5.21**.

Tabela 5.21 - Classificação das águas de acordo com STD.

Tipo de água	STD (mg/L)
Doce	0 - 500
Salobra	> 500 - 1500
Salgada	> 1500

A distribuição de frequência de STD no aquífero Jandaíra segundo as faixas de água doce, salobra e salgada é apresentada na **tabela 5.22**. Como se pode ver (também nos mapas das **figuras 5.90 e 5.91**) a maioria das águas desse aquífero é salobra (70%) ou salgada (29%), ficando o percentual de água doce restrito a apenas 1%.

Tabela 5.22 – Frequência de STD no aquífero Jandaíra segundo faixas de água doce, salobra e salgada.

Tipo de Água	Intervalo de classe	Frequência absoluta	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
Aquífero Jandaíra					
Doce	$0 < x \leq 500$	1	1	0,01	1
Salobra	$500 < x \leq 1500$	124	125	0,70	71
Salgada	$x > 1500$	52	177	0,29	100

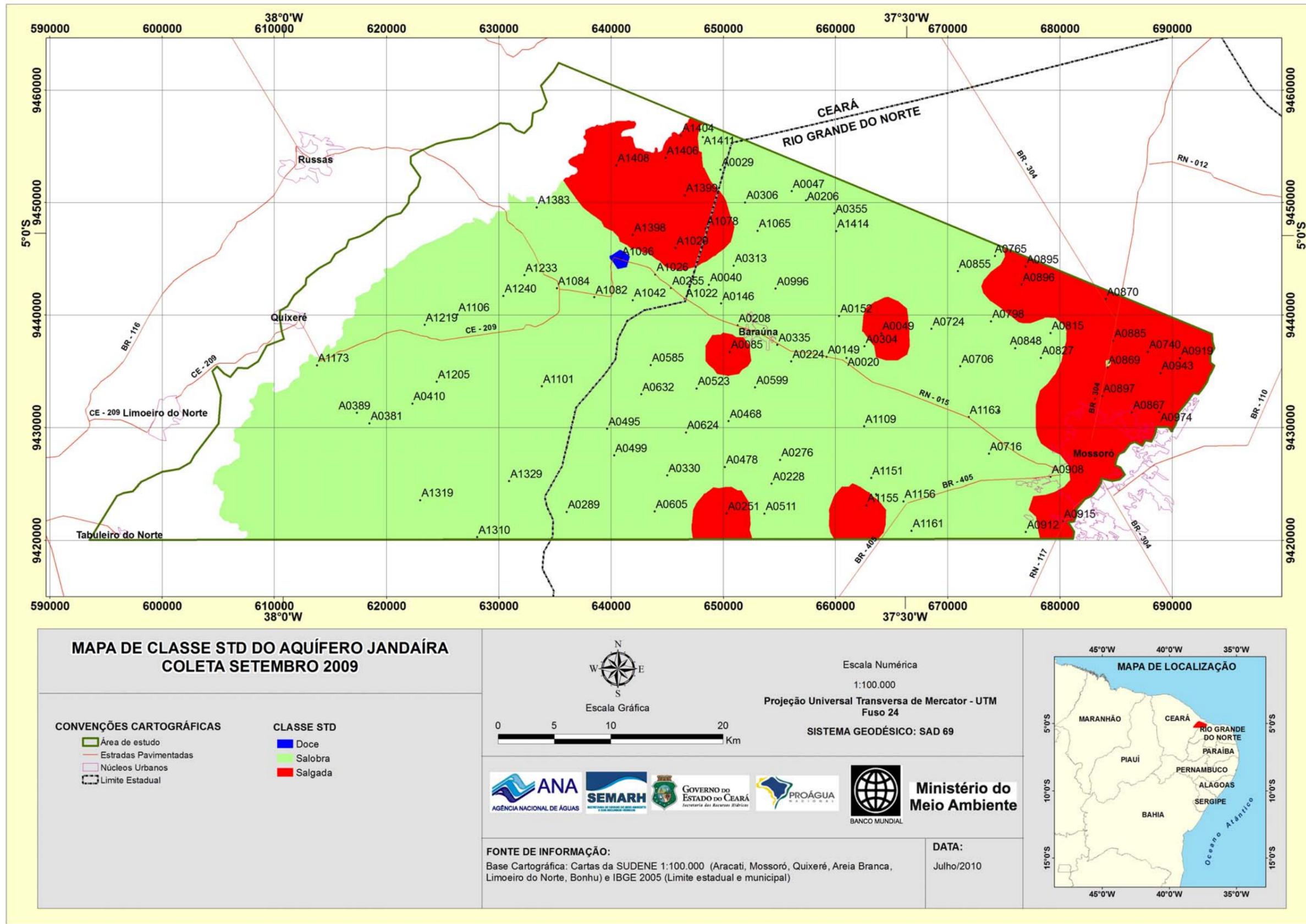


Figura 5.45 – Mapa de classe de STD indicando a distribuição espacial das águas doces, salobras e salgadas no aquífero Jandaíra em set/09.

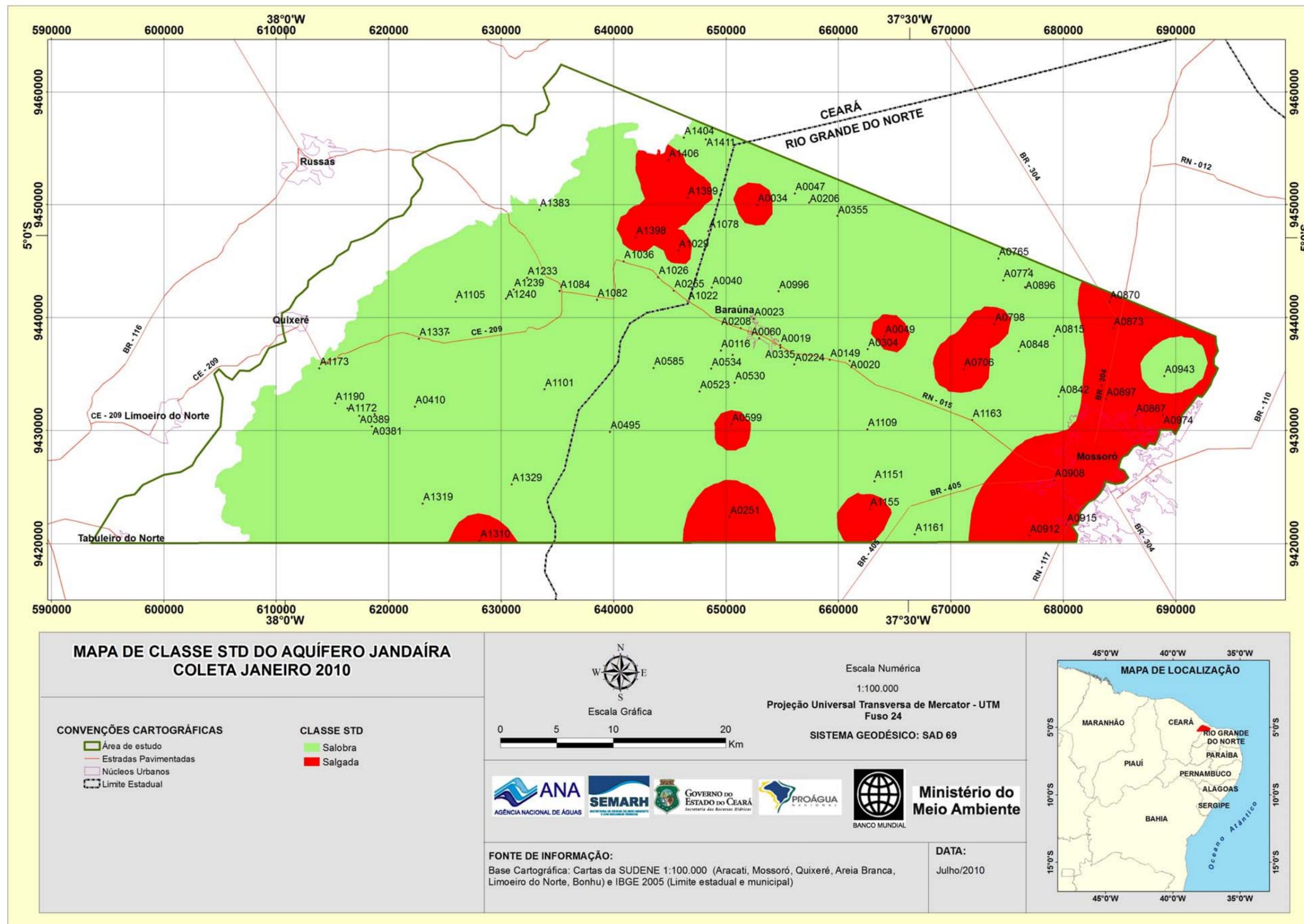


Figura 5.46 – Mapa de classe de STD indicando a distribuição espacial das águas doces, salobras e salgadas no aquífero Jandaíra em jan/10.

A distribuição de frequência dos valores de STD no aquífero Jandaíra é ilustrada no histograma da **figura 5.47**.

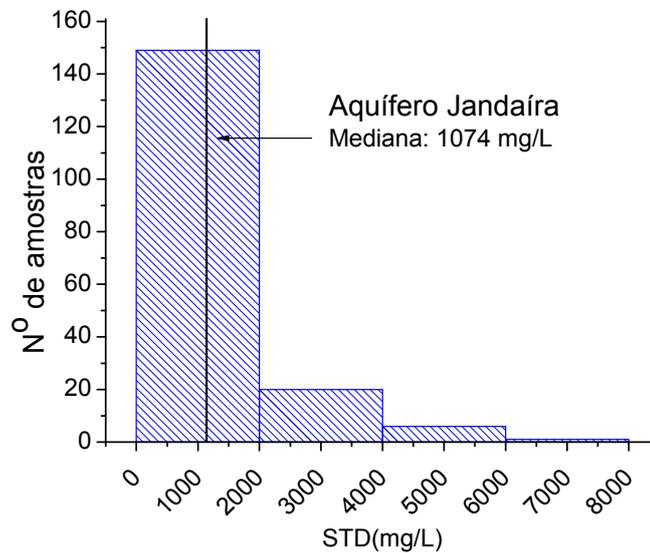


Figura 5.47 – Histograma de frequência de Sólidos Totais Dissolvidos no aquífero Jandaíra.

Nas amostras coletadas em poços do aquífero Jandaíra os valores de STD variam na coleta de set/09 de 113 mg/L a 18624 mg/L havendo (19/96) ou 20% de amostras com STD acima de 2000 mg/L. Os valores extremos são anômalos e se devem a contaminação pela língua salgada do vale do Apodi governada pelas marés.

Em jan/10 o panorama ainda é o mesmo, na medida em que (13/80) ou 16% das amostras apresentam $STD > 2000$ mg/L. Não obstante, a magnitude dos valores extremos nas imediações do vale do Apodi se reduz aproximadamente a 1/3 do valor de set/09, com máximo de 6713 mg/L, baixando 13% no valor da média geral, que era de 1656 mg/L em set/09 e passou a 1440 mg/L em jan/10. A influência da maré e a presença da língua salgada em Mossoró dependem, como já foi dito, essencialmente da descarga do rio Apodi. Essas variações, portanto, estão ligadas a processos extremamente dinâmicos.

Isto, aliás, já foi ilustrado pela distribuição espacial dos valores de CE nos mapas das **figuras 5.10 e 5.11 (item 5.3.2.1)**. Com exceção de uma única amostra, não existem águas doces no aquífero Jandaíra. A maioria das amostras (124/177) ou 70% é de águas salobras que dominam na região compartilhada pelos dois Estados, ficando os 29% de águas salgadas (52/177) restritos às amostras coletadas na bacia do Apodi no Rio Grande do Norte.

Cor – aquífero Jandaíra

A cor indica principalmente a presença de metais (Fe, Mn), ácidos húmicos (matéria oriunda da degradação de matéria de origem vegetal), plâncton (conjunto de plantas e animais microscópicos em suspensão nas águas), dentre outras substâncias dissolvidas na água.

Na determinação da cor há uma incerteza associada a cada faixa de leitura. A **tabela 5.23** mostra os valores de acordo com Métodos Padrões (APHA, 1998). Adota-se como uma unidade de medida da cor a que é produzida pela concentração de 1 mgPt/L.

Tabela 5.23 - Incerteza associada a cada faixa de leitura de cor. (APHA, 1998).

Cor	Incerteza
1 - 50	± 1
51 - 100	± 5
101 - 250	± 10
251 - 500	± 20

De acordo com a distribuição de frequência da cor das águas do aquífero Jandaíra em faixas de 5 uH (**tabela 5.24**), 32% das amostras apresentam valores acima do VMP (15 uH).

Tabela 5.24 – Frequência da cor das águas do aquífero Jandaíra.

Intervalo de classe de cor	Frequencia absoluta	Frequencia acumulada	Frequencia relativa	% Acumulado
Total das duas campanhas				
0 < x ≤ 5	61	61	0,34	34
5 < x ≤ 10	37	98	0,21	55
10 < x ≤ 15	23	121	0,13	68
x > 15	56	177	0,32	100
set/09				
0 < x ≤ 5	21	21	0,22	22
5 < x ≤ 10	28	49	0,29	51
10 < x ≤ 15	15	64	0,15	66
x > 15	33	97	0,34	100
jan/10				
0 < x ≤ 5	19	19	0,22	22
5 < x ≤ 10	25	44	0,28	50
10 < x ≤ 15	13	57	0,15	65
x > 15	31	88	0,35	100

O histograma de frequência de cor das águas subterrâneas do Jandaíra é apresentado na **figura 5.48**. Em set/09 os valores medidos oscilam entre 0 e 145 uH com média de 17,8 uH; em jan/10 os valores encontrados situam-se no intervalo de 1,1 a 211 uH, com valor médio de 24,4 uH. Embora esses valores médios estejam acima do máximo permitido (15 uH) vale dizer que (121/177) ou 68% das amostras são de águas que estão dentro dos padrões (**tabela 5.24**).

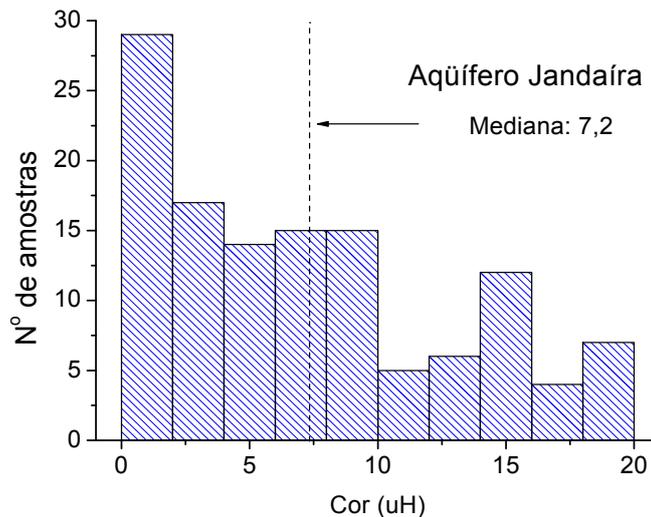


Figura 5.48 – Histograma de frequência de cor das águas do aquífero Jandaíra.

Turbidez – aquífero Jandaíra

A turbidez é uma medida do espalhamento de luz produzido pela presença de partículas coloidais ou em suspensão e é expressa em unidade nefelométrica de turbidez (NTU - *Nephelometric Turbidity Unity*) usando-se como padrão para calibração do turbidímetro uma suspensão de polímero formazin (sulfato de hidrazina + hexametileno tetramina), uma suspensão de látex ou então, micro esferas de estireno-divinilbenzeno, conforme o fabricante do equipamento.

A turbidez é um parâmetro indicador da possível presença de argila, silte, substâncias orgânicas (Ex: húmus) ou inorgânicas (Ex: óxidos) finamente divididas, plâncton e algas, indicando risco de entupimento de filtros e tubulações. A incerteza associada a cada faixa de leitura é mostrada na **tabela 5.25** com valores de acordo com Métodos Padrões (APHA, 1998).

A **tabela 5.26**, de frequência da turbidez das águas do Jandaíra é apresentada para o conjunto das amostras das 185 amostras coletadas nas duas campanhas e para cada uma das campanhas realizadas, respectivamente, em set/09 (97 amostras) e em jan/10 (88 amostras).

Tabela 5.25 - Incerteza associada a cada faixa de leitura de turbidez (APHA, 1998).

Turbidez (NTU)	Incerteza
0 - 1,0	± 0,05
1,0 - 10	± 0,1
10 - 40	± 1
40 - 100	± 5
100 - 400	± 10
400 - 1000	± 50
> 1000	± 100

Tabela 5.26 – Frequência de turbidez das águas do aquífero Jandaíra.

Intervalo de classe de turbidez	Frequencia absoluta	Frequencia acumulada	Frequencia relativa	% Acumulado
Total das duas campanhas				
0 < x ≤ 1	69	69	0,37	37
1 < x ≤ 2	42	111	0,23	60
2 < x ≤ 3	19	130	0,10	70
3 < x ≤ 4	8	138	0,04	78
4 < x ≤ 5	13	151	0,07	82
x > 5	34	185	0,18	100
set/09				
0 < x ≤ 1	36	36	0,37	37
1 < x ≤ 2	22	58	0,23	60
2 < x ≤ 3	10	68	0,10	70
3 < x ≤ 4	4	72	0,04	74
4 < x ≤ 5	8	80	0,08	82
x > 5	17	97	0,18	100
jan/10				
0 < x ≤ 1	33	33	0,38	38
1 < x ≤ 2	20	53	0,23	60
2 < x ≤ 3	9	62	0,10	70
3 < x ≤ 4	4	66	0,05	75
4 < x ≤ 5	5	71	0,06	81
x > 5	17	88	0,19	100

Nota-se que praticamente não houve variação na distribuição dos valores, na medida em que o percentual de amostras com turbidez até 1 uT, foi de 37% para o conjunto das amostras; de 37% para as amostras coletadas em set/09 e de 38% para as amostras coletadas em jan/10.

Por outro lado, 18% do total das amostras (18% em set/09 e 19% em jan/10) apresentaram turbidez acima do VMP. Admite-se que isto se deve ao fato de que

muitos poços não possuem revestimento e o bombeamento realizado para a coleta de água tende a induzir o carreamento de partículas coloidais, particularmente das intercalações de argilitos e folhelhos existentes na Formação Jandaíra.

O histograma de frequência construído com 167 valores de turbidez das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra abaixo do limite superior de 10 uT (**figura 5.49**), mostra o maior número de amostras no primeiro intervalo de frequência. São (72/167) ou 43% de valores até 1 uT, havendo (146/167) ou 87% de valores abaixo do máximo permitido que é 5 uT. Na verdade, considerando-se todas as amostras, esses percentuais são, respectivamente, 37% até 1 uT, 82% até 5 uT e 18% acima do VMP, como indica a **tabela 5.26**.

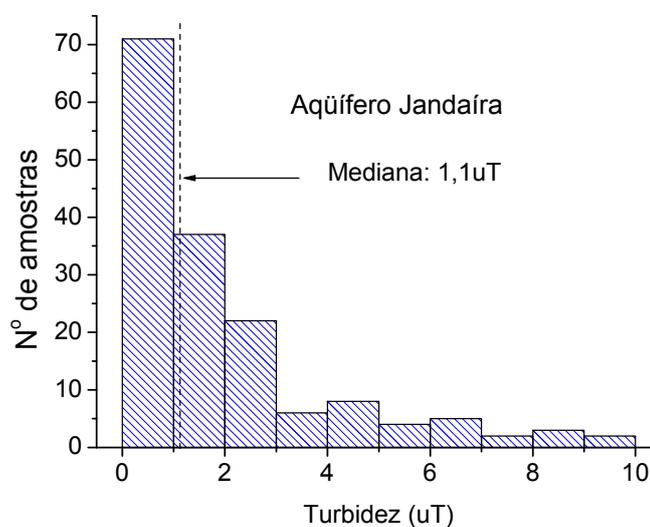


Figura 5.49 - Histograma de turbidez das águas do aquífero Jandaíra.

5.3.10.2 - Ferro, pH e Eh

Ferro é um elemento presente em quase todas as águas subterrâneas em teores abaixo de 0,3 mg/L. São fontes de ferro os minerais escuros (máficos): magnetita, biotita, pirita, piroxênios e anfibólios; pela afinidade geoquímica quase sempre é acompanhado pelo manganês.

O ferro no estado ferroso (Fe^{2+}) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o Fe^{2+} passa a Fe^{3+} dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água. Por isso, águas com alto conteúdo de Fe, ao saírem do poço são incolores, mas ao entrarem em contato com o oxigênio do ar ficam amareladas.

A precipitação de ferro presente nas águas é a principal responsável pela perda da capacidade específica de poços profundos. Estas incrustações são produtos da atividade de ferro-bactérias. O uso de substâncias orgânicas emulsificantes e polifosfatos nos processos de perfuração e desenvolvimento dos poços cria condições para que as ferro-bactérias, naturalmente ocorrente nos aquíferos,

proliferem com mais facilidade, sendo necessária uma boa limpeza no processo de completação do poço.

Resultados das análises de Fe, pH e Eh se encontram nas **tabelas A5.3a a A5.3b**. O histograma de frequência dos teores de ferro nas águas do aquífero Jandaíra é mostrado na **figura 5.50** e a distribuição das faixas de valores na **tabela 5.27**.

Ferro – aquífero Jandaíra

Em set/09 a presença de **ferro** em águas do aquífero Jandaíra foi detectada em (73/97) ou 75% das amostras. Os valores encontrados variam de 0,01 a 6,11 mg/L com média 0,32 mg/L. Desses valores, (61/73) ou 84% estão abaixo do máximo permitido, que é de 0,3 mg/L. No conjunto das amostras analisadas em set/09 foram encontradas (12/97) ou praticamente 12% com teores de ferro acima do máximo permitido.

Em jan/10 não foi detectada a presença de ferro em 60% das amostras, ou (50/83); nos 40% restantes, os teores ficaram no intervalo de 0,01 a 8,81 mg/L e dentre estes 78% (25/33) com valores dentro do limite permitido.

A significativa diferença de detecção do ferro de 75% ou (73/97) em set/09 para 40% (33/83) em jan/10, pode ser um reflexo de influência de diluição produzida por recarga. Embora com pequena magnitude, o indício de diluição se reflete no percentual de amostras com teor de ferro acima do VMP entre set/09 e jan/10. De fato, tomando-se como referência, para fins comparativos, as faixas de valores expressas na **tabela 5.27** nota-se que nas duas campanhas a variação do número de amostras com teores acima do VMP decresceu de 12% para 10%, ou seja, o percentual de amostras com teores de ferro dentro do limite permitido aumentou de 88% em set/09 para 90% em jan/10.

Tabela 5.27 – Frequência de ferro nas amostras de água do aquífero Jandaíra.

Classe	Frequência	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
Total das duas campanhas				
0,0<x<=0,1	136	136	0,76	76
0,1<x<=0,2	14	150	0,08	83
0,2<x<=0,3	10	160	0,06	89
x>0,3	20	180	0,11	100
set/09				
0,0<x<=0,1	68	68	0,70	70
0,1<x<=0,2	10	78	0,10	80
0,2<x<=0,3	7	85	0,07	88
x>0,3	12	97	0,12	100
jan/10				
0,0<x<=0,1	68	68	0,82	82
0,1<x<=0,2	4	72	0,05	87
0,2<x<=0,3	3	75	0,04	90
x>0,3	8	83	0,10	100

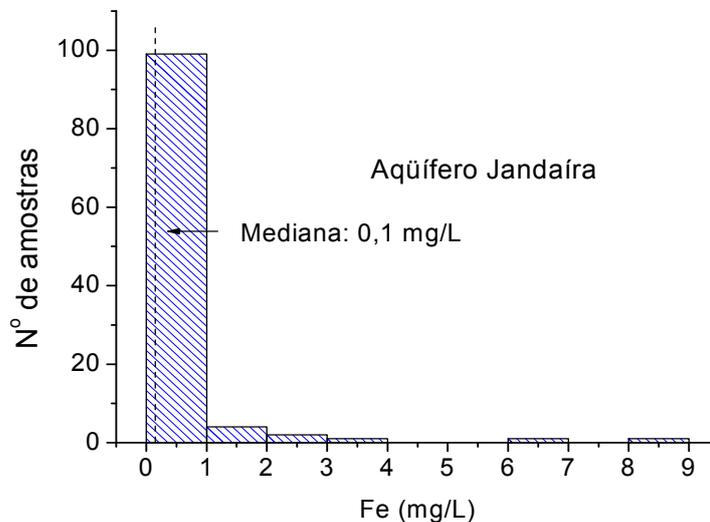


Figura 5.50 – Histograma de frequência de Fe nas águas do aquífero Jandaíra.

pH – aquífero Jandaíra

Nos sistemas de abastecimento público de água, o pH deve estar entre 6,5 e 9,5. De um modo geral, águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a

certos metais, a paredes de concreto e a superfícies de cimento-amianto, enquanto águas de alto pH tendem a formar incrustações. Na maior parte das águas naturais, o pH é controlado pelo sistema de equilíbrio gás carbônico – bicarbonatos – carbonatos.

O pH é a medida da concentração do íon hidrogênio ou de sua atividade, e é definido como o logaritmo negativo da concentração de íons de hidrogênio.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Por causa da concentração iônica das águas, o pH se encontra na faixa de 0 a 14. A classificação da água quanto ao pH é feita utilizando o seguinte critério:

pH < 7 – água ácida;

pH = 7 – água neutra;

pH > 7 – água básica.

O pH, cujo histograma de frequência é mostrado na **figura 5.51**, apresentou em set/09 valores compreendidos entre 5,0 e 7,2, com média de 6,7. Em jan/10 os valores medidos variaram de 6,1 a 9,96 ficando a média em 6,8.

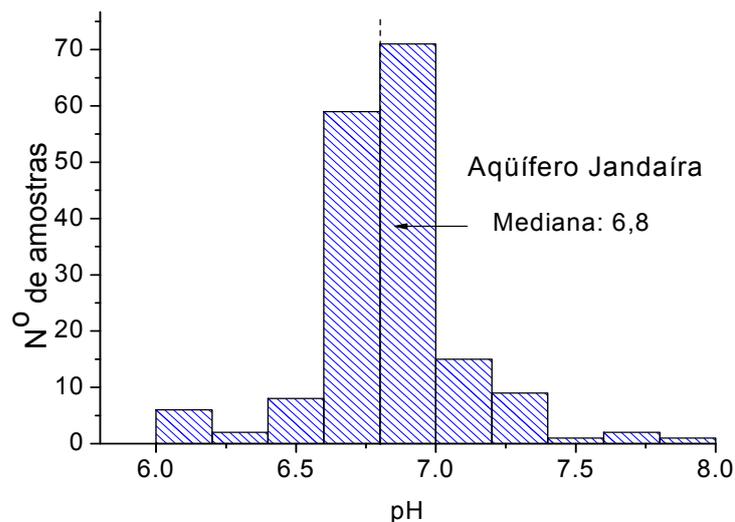


Figura 5.51 – Histograma de frequência de pH nas águas do aquífero Jandaíra.

Eh – aquífero Jandaíra

O potencial redox (Eh) mede a concentração de elétrons para indicar o processo de oxidação, que é a remoção de um elétron da espécie química e de redução que é a adição de elétrons em uma espécie química. Quando um corpo d'água é oxidado ou reduzido fica determinada a forma química dos elementos traços que estão nele dissolvidos.

Diagramas de estabilidade Eh – pH foram desenvolvidos para descrever as condições nas quais ocorram os possíveis processos de oxidação e redução de espécies do mesmo elemento como por exemplo, hidrólise de Fe^{3+} e interconversão $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e Fe^{2+} .

O histograma de frequência de Eh das águas do aquífero Jandaíra (**figura 5.52**) elaborado com os valores medidos em jan/10, indica um valor mediano de 8. Os valores medidos oscilam entre -53 V e 52 V, com média de 8,7. Os valores de set/09 variaram entre -53 mV e 59 mV.

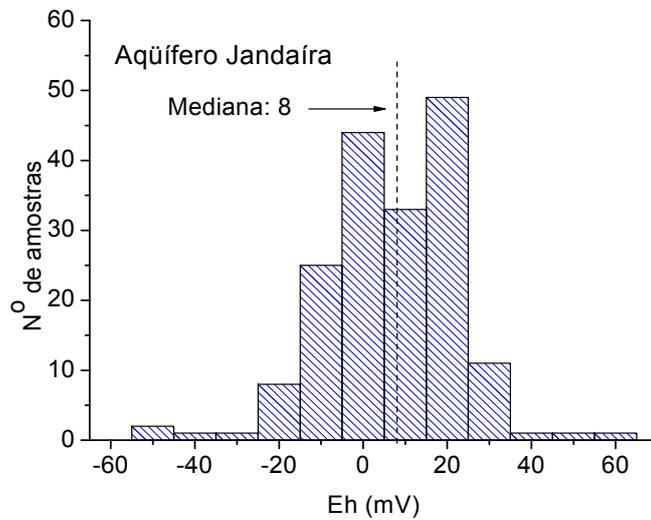


Figura 5.52- Histograma de Eh das águas do aquífero Jandaíra.

5.4 – Águas Subterrâneas do Aquífero Açú e das Aluviões

A estatística descritiva dos parâmetros químicos analisados em amostras de água subterrânea do aquífero Açú é apresentada na **tabela 5.28**.

Tabela 5.28 - Estatística de parâmetros analisados em águas do aquífero Açú.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
CE ($\mu\text{S/cm}$)	558	44,9	487	617
Dureza (mg/L)	126,2	49,1	50,0	200,0
Ca ²⁺ (mg/L)	18,0	14,8	4,0	56,0
Mg ²⁺ (mg/L)	28,3	31,0	9,7	129,2
Na ⁺ (mg/L)	63,0	18,4	36,6	101,6
K ⁺ (mg/L)	21,7	7,8	10,1	39,3
Cl ⁻ (mg/L)	52,6	9,3	33,8	67,5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	17,1	3,9	11,6	23,6
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	251,0	33,0	206,1	317,1
Fe (mg/L)*	N/D	N/D	N/D	N/D
Turbidez (uT)	0,94	0,18	0,72	1,3
Cor (uH)	232,9	495,9	1,8	119,5
pH	7,4	0,5	6,2	8,4

*Ferro não detectado.

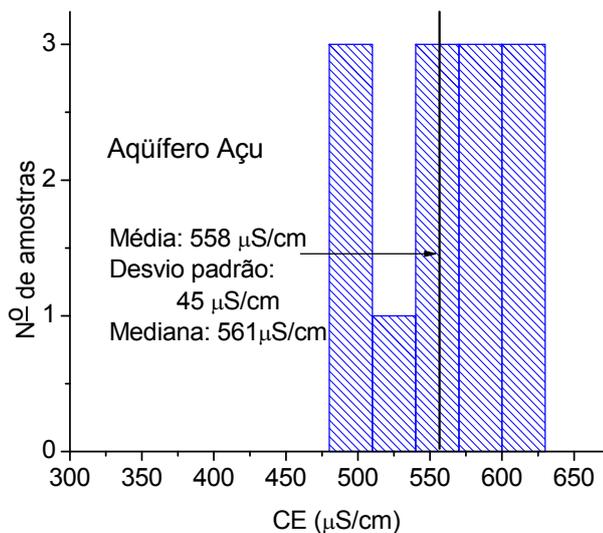
5.4.1 - Condutividade elétrica no aquífero Açú

A **figura 5.53** mostra os histogramas de frequência dos valores da condutividade elétrica no aquífero Açú (**tabela A5.3c**), na faixa de 460 a 660 $\mu\text{S/cm}$, portanto, bem mais baixos do que nas amostras do Jandaíra.

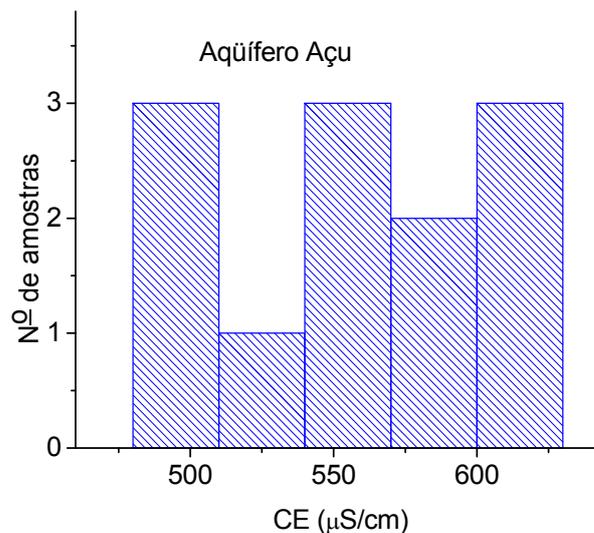
A única amostra de água do **aquitarde Quebradas** em Vertentes Santa Cruz, na zona de afloramento da Formação Açú superior, tem CE = 6.270 $\mu\text{S/cm}$, muito maior do que têm as águas do aquífero Açú confinado; portanto, esta água não infiltra para o aquífero Açú confinado.

O valor médio das 04 amostras de água no **aquífero aluvial** é CE = 1044 $\mu\text{S/cm}$ e portanto, o aumento da condutividade elétrica ocorre na sequência dos aquíferos e aquitarde:

Aquífero Açú confinado < aquífero aluvionar < aquitarde Quebrada.



Set/09



Jan/10

Figura 5.53 - Histogramas de Condutividade Elétrica de águas do aquífero Açú em set/09 e jan/10.

5.4.2 – Dureza no aquífero Açú

A frequência da **dureza** das águas do aquífero Açú é ilustrada na **figura 5.54**. Para um conjunto de 13 determinações em amostras coletadas em jan/10, a dureza média de 126 mg/L, fica abaixo do máximo permitido (200 mg/L) e perfeitamente compatível com a natureza arenosa desse aquífero.

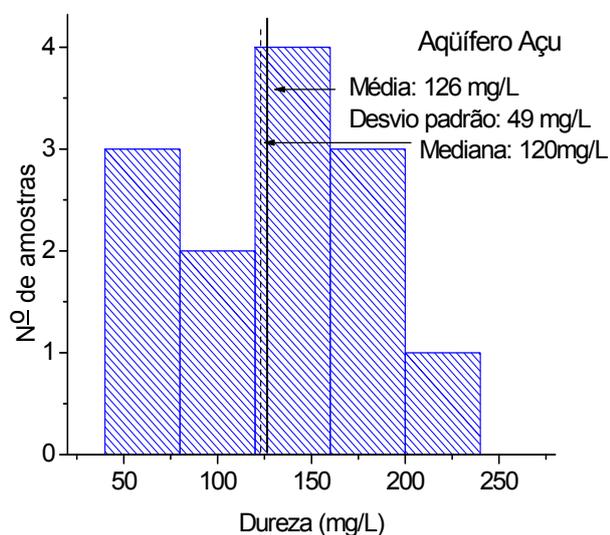
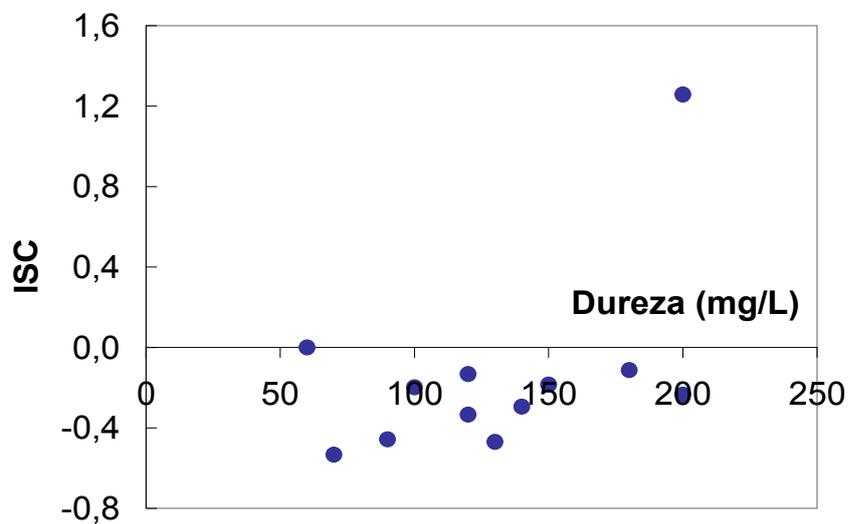


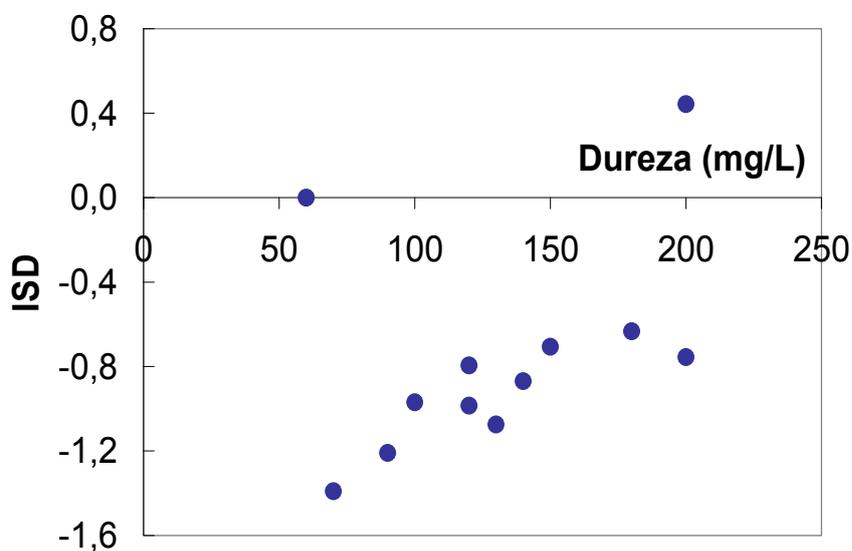
Figura 5.54 – Histograma de dureza das águas do aquífero Açú em jan/10.

5.4.3 –Índices de saturação no aquífero Açú

As figuras 5.55 e 5.56 mostram estes índices em função da dureza e da condutividade elétrica para o aquífero Açú.



(jan/10)



(jan/10)

Figura 5.55 - ISC vs dureza e ISD vs dureza em jan/10 - aquífero Açú.

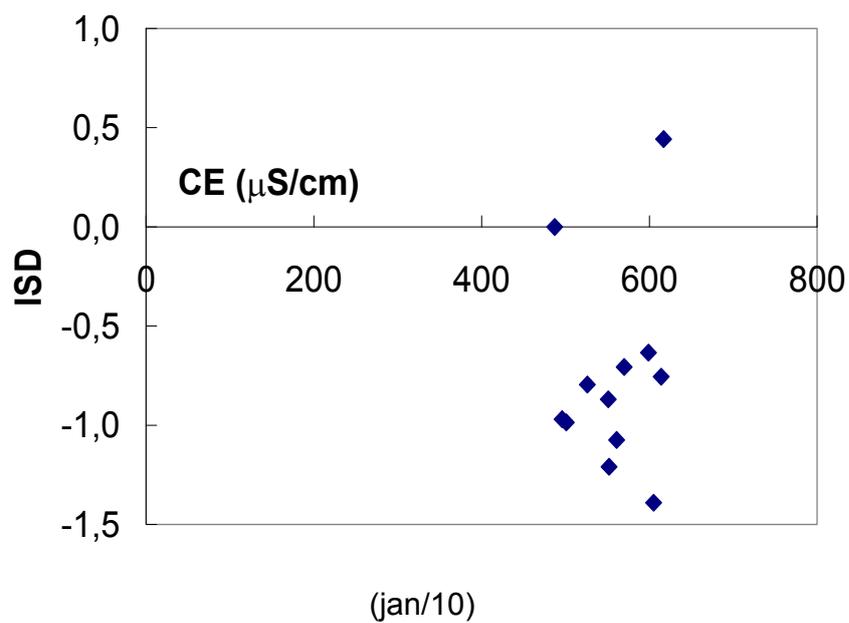
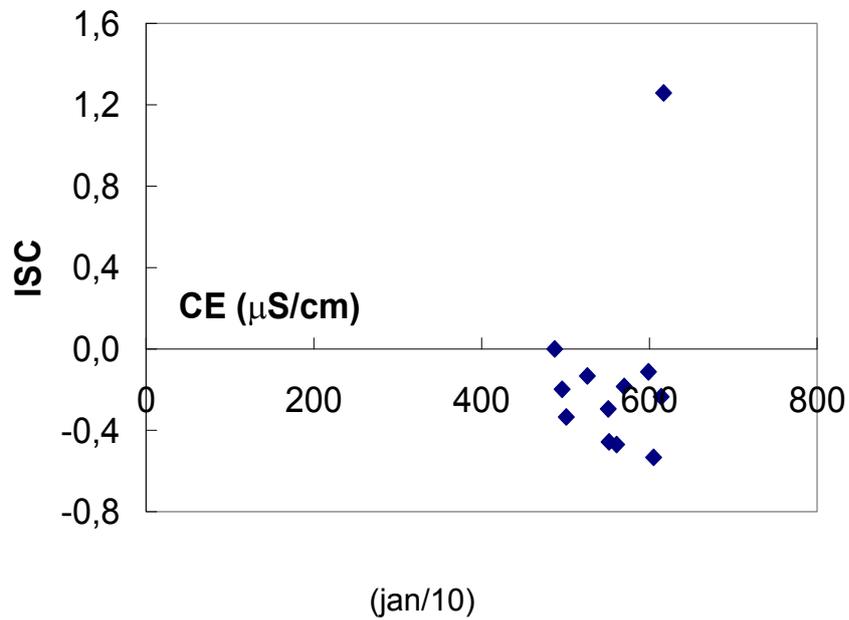


Figura 5.56 - ISC vs CE e ISD vs CE em jan/10 - aquífero Açú.

A **figura 5.57** ilustra os valores negativos e positivos dos índices de saturação da calcita (ISC) e da dolomita (ISD) que indicam, respectivamente, as tendências de dissolução e de precipitação para a calcita e dolomita na água.

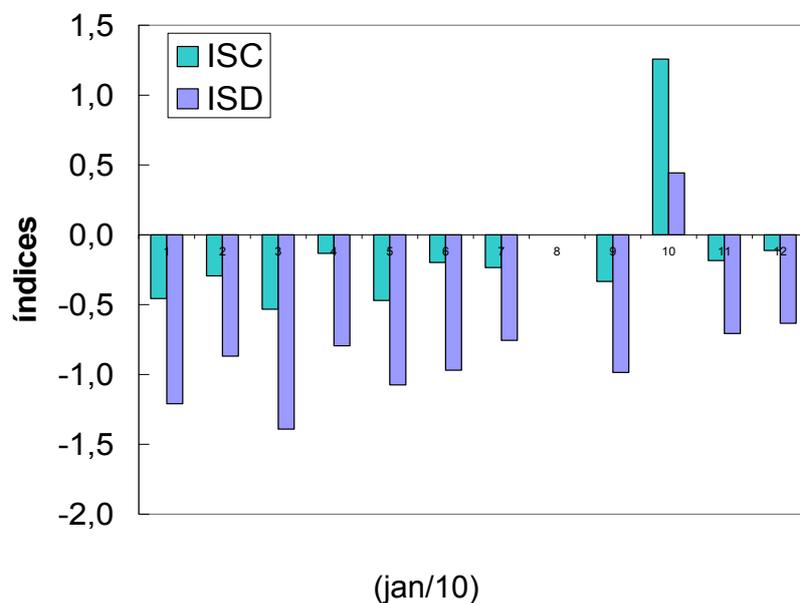


Figura 5.57 - ISC e ISD em cada poço do aquífero Açú em jan/10.

5.4.4 - Concentração de Cátions no Aquífero Açú

As **concentrações dos cátions** cálcio, magnésio, sódio e potássio (**tabela A5.2c**), em amostras de água subterrânea do aquífero Açú, estão mostradas na **figura 5.58**. Todas as amostras são potáveis com relação aos cátions.

5.4.5 - Concentração de Ânions no Aquífero Açú

Os histogramas de frequência das **concentrações dos ânions** cloreto, sulfato e bicarbonato (**tabela A5.16**) em amostras de água subterrânea do aquífero Açú, estão apresentados na **figura 5.59**. Todas as amostras estão dentro do padrão de potabilidade.

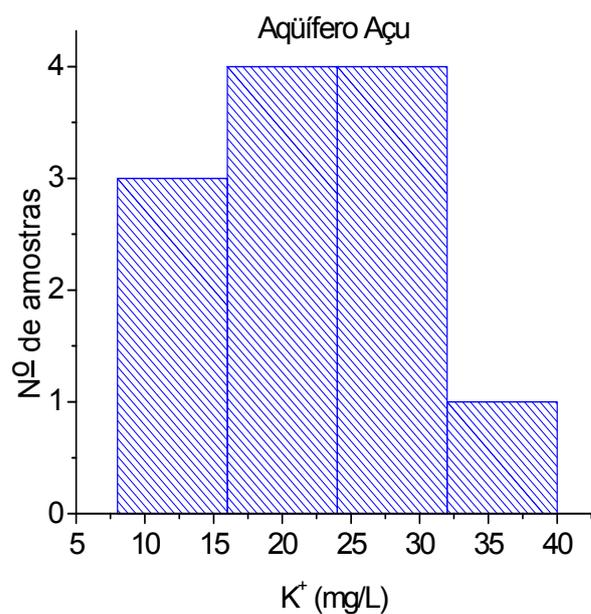
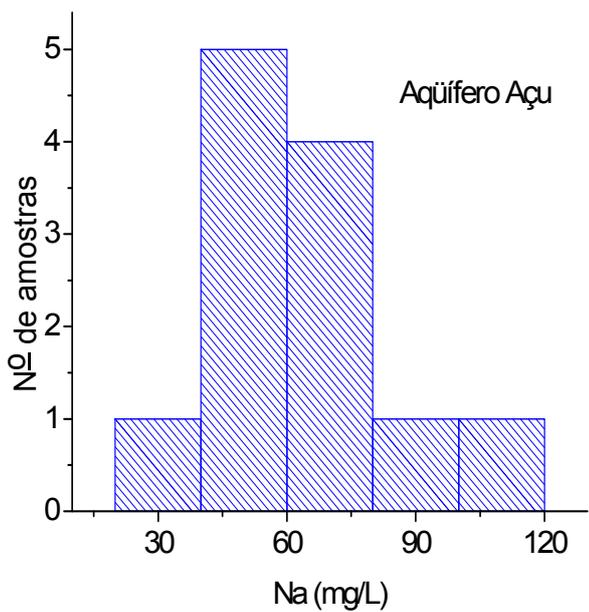
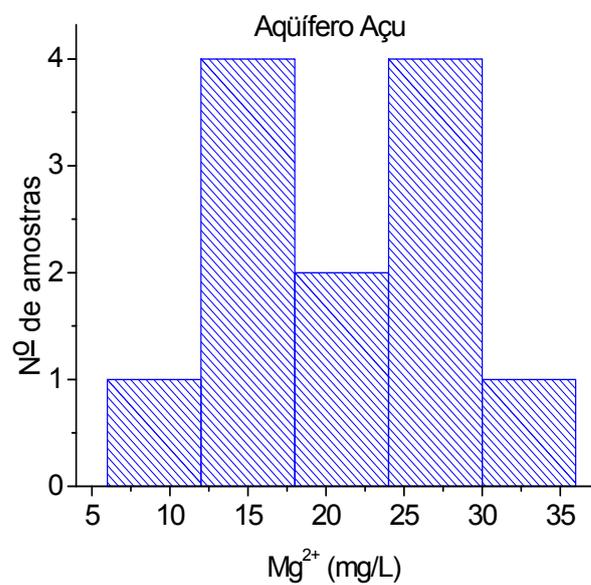
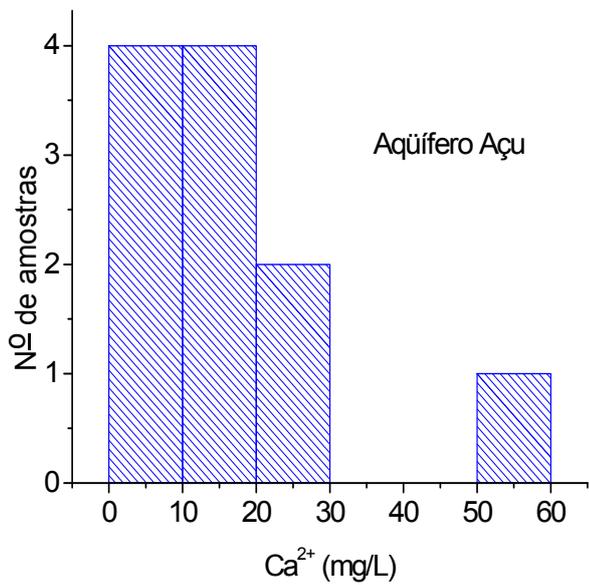


Figura 5.58 – Histogramas de frequência dos valores das concentrações de cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} Na^+ e K^+ em amostras do aquífero Açú em jan/10.

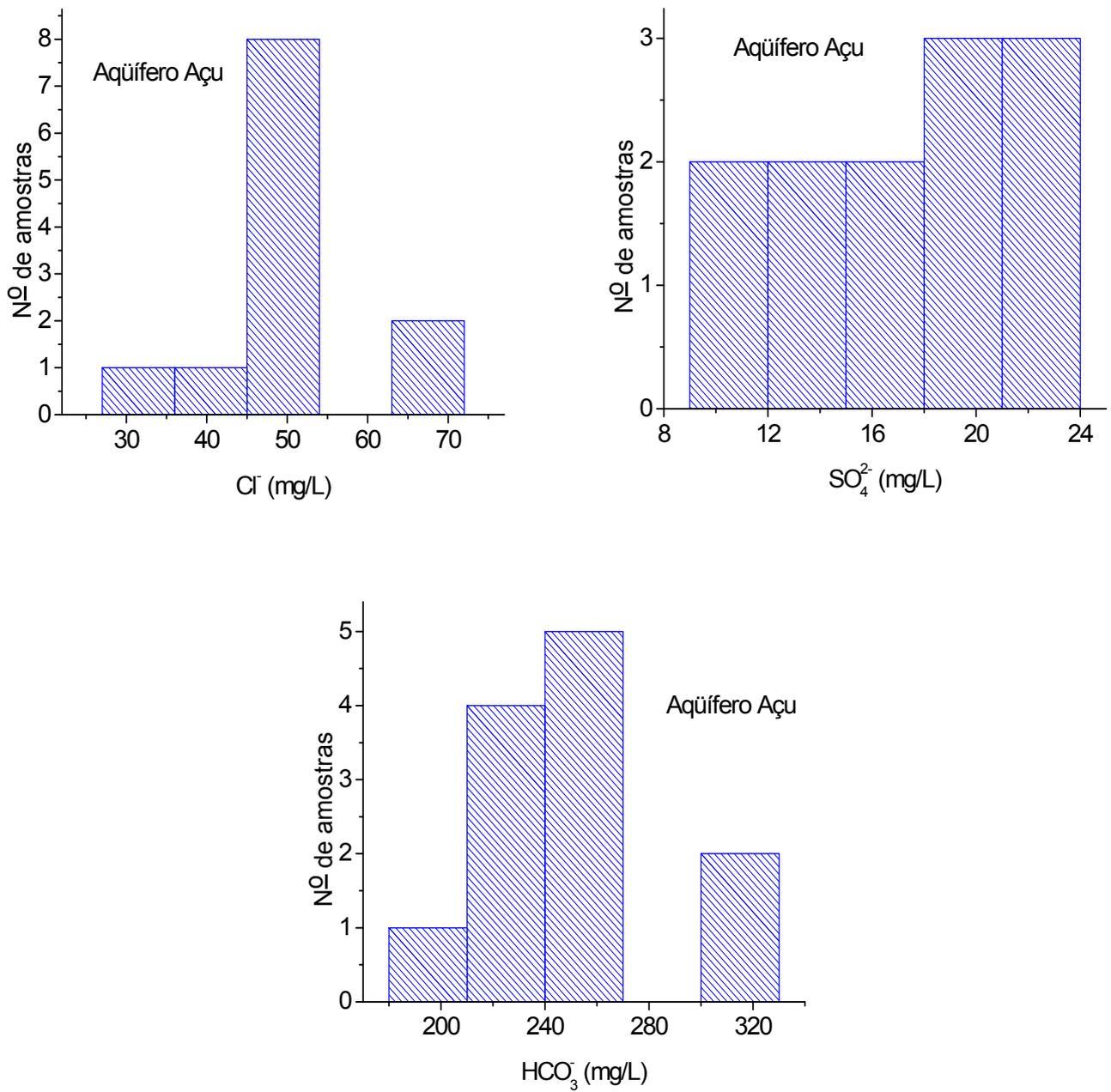


Figura 5.59 – Histogramas de frequência da concentração de ânions no aquífero Açú em jan/10.

5.4.6 - Razões iônicas do Açú

Para o aquífero Açú a estatística descritiva para cada razão é mostrada na **tabela 5.29**.

Tabela 5.29 – Razões iônicas de águas do aquífero Açú.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
Mg^{2+}/Ca^{2+}	2,8	1,8	0,1	6,0	2,0
Na^+/Cl^-	1,8	0,5	1,1	2,7	1,8
Cl^-/HCO_3^-	0,4	0,3	0,2	1,3	0,4

A amostra do aquífero Quebradas (A1438) tem $Mg^{2+}/Ca^{2+} = 0,5$; $Na^+/Cl^- = 0,2$; $Cl^-/HCO_3^- = 14,4$; comparando com as medianas da **tabela 5.16** observa-se que:

- Mg^{2+}/Ca^{2+} : Açú > Jandaíra (Leste) > Jandaíra (Central e Oeste) = Aquífero Quebradas
- Na^+/Cl^- : Jandaíra (Leste) > Açú > Jandaíra (Central e Oeste) > Aquífero Quebradas
- Cl^-/HCO_3^- : aquífero Quebradas > Jandaíra (Central e Oeste) > Açú

A amostra A0090 do aquífero Açú confinado tem uma condutividade muito elevada em relação às demais deste aquífero e razões iônicas $Mg^{2+}/Ca^{2+} = 0,8$; $Na^+/Cl^- = 0,9$; $Cl^-/HCO_3^- = 0,8$ na faixa de valores nas águas do aquífero Jandaíra.

Os histogramas de frequência das razões correspondentes à amostragem de set/09 podem ser vistos na **figura 5.60**.

Os histogramas de frequência das **razões iônicas**, rMg^{2+}/rCa^{2+} , rNa^+/rCl^- e $rCl^-/rHCO_3^-$ em amostras de água subterrânea do aquífero Açú em jan/10, estão mostradas na **figura 5.61** As faixas de valores são:

- rMg^{2+}/rCa^{2+} de 0,1 a 6,0.
- rNa^+/rCl^- de 1,1 a 2,7.
- $rCl^-/rHCO_3^-$ de 0,2 a 0,5.

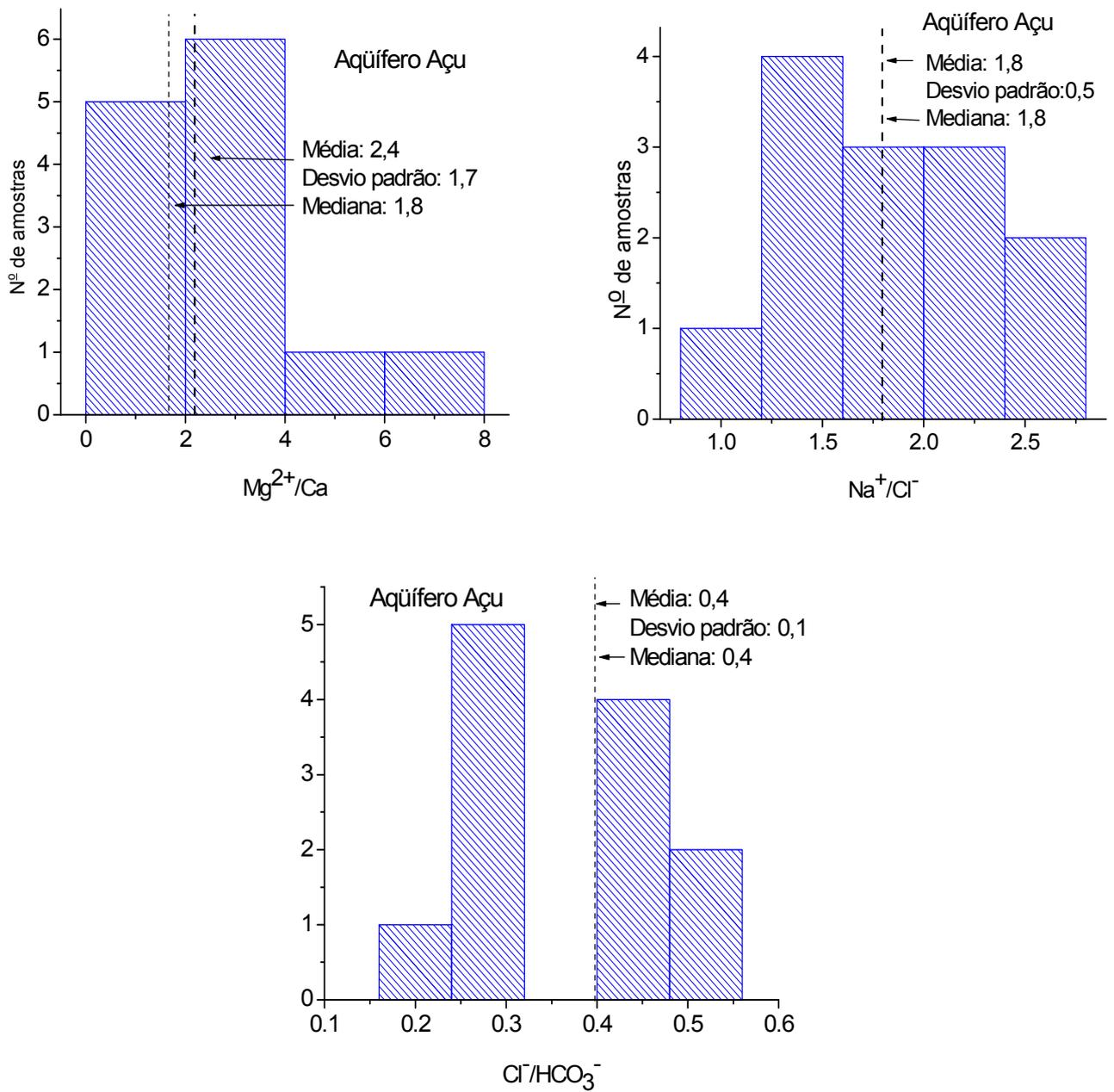


Figura 5.60 - Histogramas de frequência de razões iônicas nas águas do aquífero Açú (set/09).

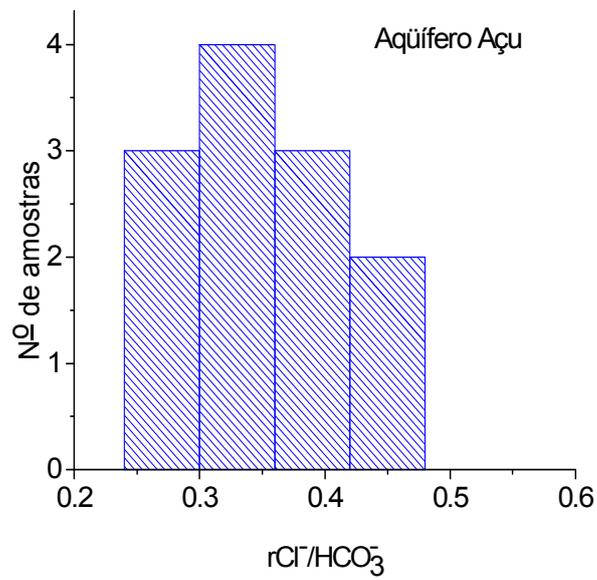
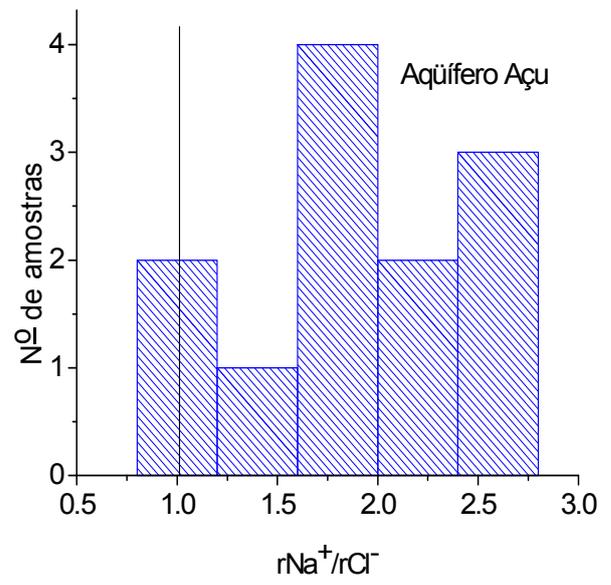
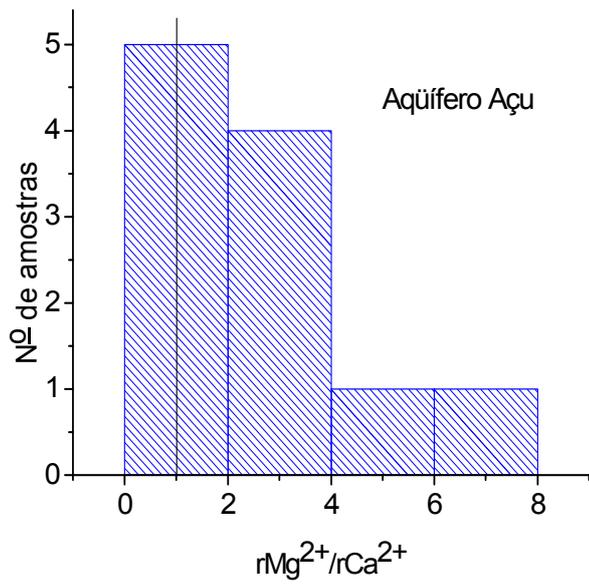


Figura 5.61 - Histogramas de frequência de Razões iônicas no aquífero Açú em jan/10.

5.4.7 - Compostos Nitrogenados no Açú

A **figura 5.62** apresenta as concentrações dos compostos nitrogenados no aquífero Açú em jan/10 (**tabela A5.2c**). Os histogramas de frequência desses compostos são mostrados na **figura 5.63**.

Nos 13 poços amostrados o teor de amônia não foi detectado em 2 (dois) e nos 9 (nove) poços restantes variou no intervalo de 1,1 a 2,4 mg/L com média de 1,4 mg/L. Para o nitrito o valor médio das 13 amostras foi de apenas 0,5 mg/L ficando os valores no intervalo de 0,4 a 1,2 mg/L. Já as concentrações de nitrato das 13 amostras ficaram no intervalo de 2,8 a 10,7 mg/L com média de 6,4 mg/L.

Portanto, em termos de compostos nitrogenados todas as amostras analisadas no aquífero Açú apresentaram valores dentro dos limites de potabilidade.

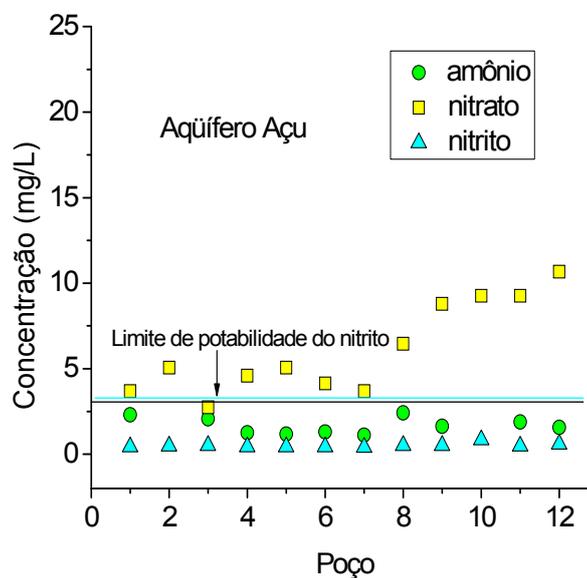
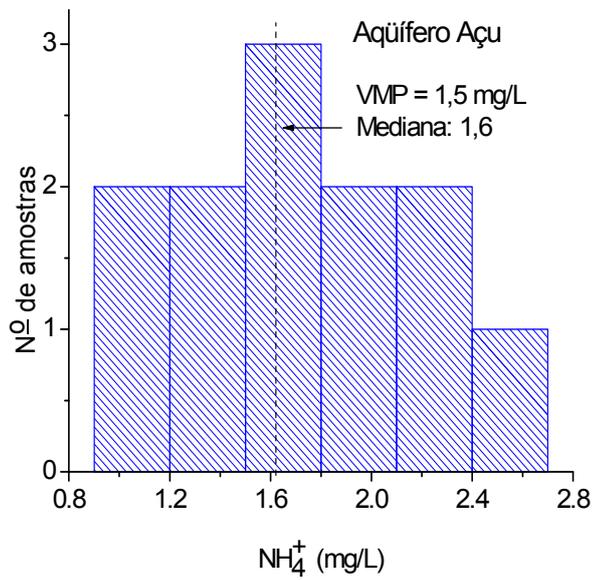


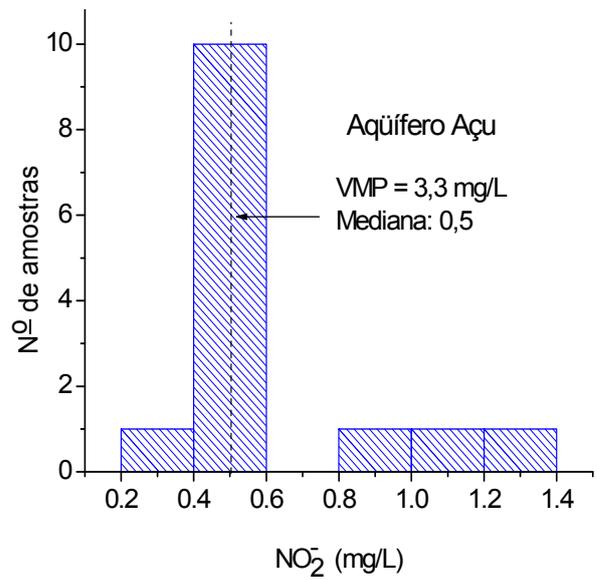
Figura 5.62 - Compostos nitrogenados aquífero Açú, em jan/10.

Nenhuma amostra do aquífero Açú teve **nitrato acima do VMP**. Muitos dos poços no aquífero Jandaíra e no aquífero Açú não possuem proteção ao redor do poço e o tubo de revestimento fica ao nível do solo pode permitir a entrada de água superficial.

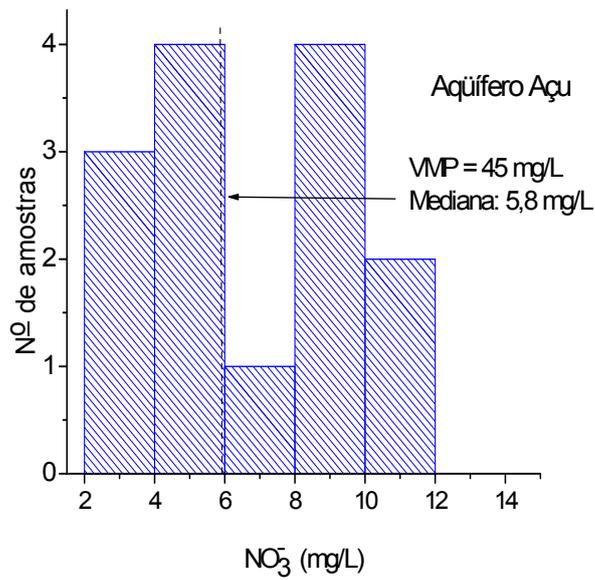
O membro superior da Formação Açú (**aquitarde Quebradas**) é constituído no topo por folhelhos, argilitos e siltitos com intercalações de arenitos finos e raros bancos de calcários e margas, passando a arenitos finos a médios, argilosos, com intercalações de folhelhos e siltitos. A presença destes bancos de calcários justifica a presença de algumas águas bicarbonatadas no aquífero Açú.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.63 - Compostos nitrogenados; (a) amônia, (b) nitrito (c) nitrato em águas do açúfero Açú.

5.4.8 – Tipos de água no Açú

A caracterização dos tipos de água encontrados no aquífero Açú é feita através do diagrama de Piper apresentado na **figura 5.64**. O triângulo de cátions indica a predominância de águas sódicas de origem marinha associadas com litologia dominada por folhelhos. O triângulo de ânions sugere que a maioria das amostras é de água carbonatada associada com litologia de calcita e dolomita, o que também indica o losango superior.

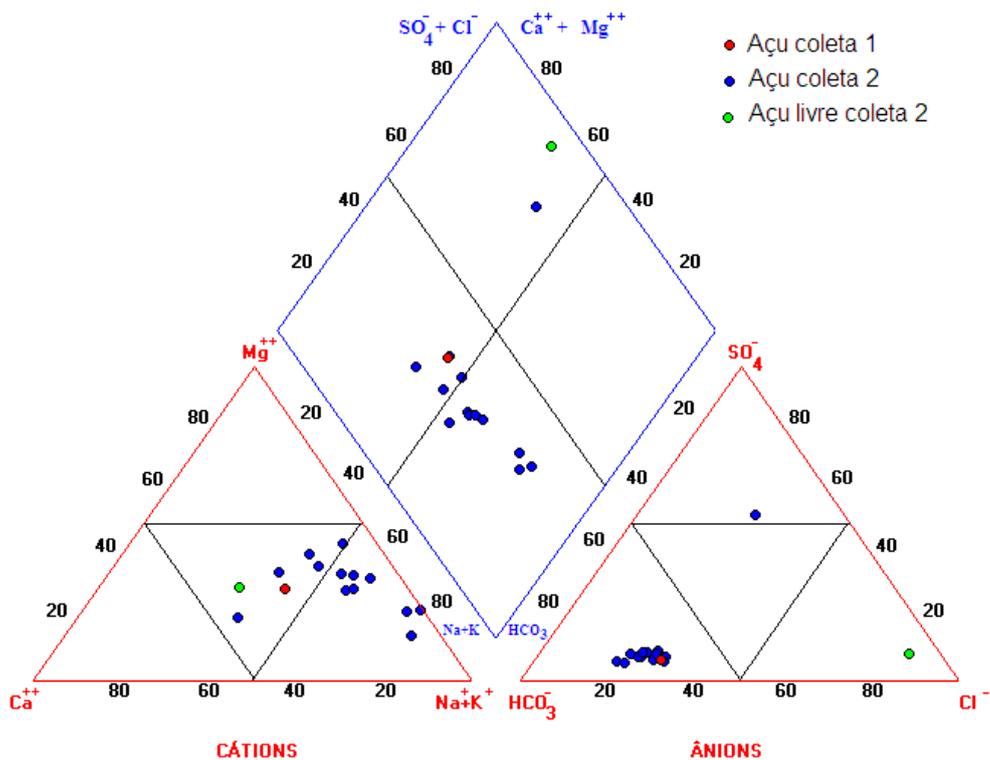


Figura 5.64 - Diagrama de Piper, poços no Açú, coleta 1 (set/09) e coleta 2 (jan/10).

As águas do aquífero Açú, no diagrama da **figura 5.65** são, sobretudo, bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas mistas. Portanto, são águas com características hidroquímicas diferentes das do aquífero Jandaíra. A amostra do poço A1438, Aquitarde Quebradas, é a única cloretada mista e a do Açú confinado, do poço A0090 era sulfatada mista (este poço está com o filtro danificado); o sulfato pode vir de gipsita encontrada em lentes de argila na área.

Admite-se, porém, que a origem mais provável da água bicarbonatada do Açú seja consequência de filtrações verticais descendentes do aquífero Jandaíra para o aquífero Açú através de *caminhos preferenciais*, criados pelo forte rebaixamento dos níveis potenciométricos do Açú em Mossoró, que se acha em exploração há mais de 40 anos. Esses caminhos estão provavelmente ligados a falhamentos, uma vez que a região de Mossoró se encontra na zona de transição entre o

Graben Central da Bacia Potiguar e a *Plataforma de Baraúna*, atravessada pela chamada *Linha de Charneira* de Areia Branca. Como se isso não bastasse, a presença de incrustações de carbonato de cálcio na rede de distribuição de água de alguns dos poços profundos que captam águas do aquífero Açú em Mossoró, se apresenta como uma evidência importante da existência de tais *caminhos preferenciais*, ou *curto circuitos* de fluxo vertical. Neste sentido, vale dizer que estudos anteriores (Manoel Filho *et al.* 2003) indicam uma contribuição, através de fluxos verticais, de nada menos que 79% da descarga total bombeada do aquífero Açú entre 1967 e 1997, em Mossoró. Na falta de outras explicações esses fluxos foram atribuídos à *drenança*, o que seguramente não parece plausível, pois com uma drenança dessa magnitude o sistema seguramente já teria entrado em equilíbrio há muito tempo. A ideia de que tais fluxos podem ser originados através de *caminhos preferenciais*, surgiu a partir de casos semelhantes apontados, particularmente nos Estados Unidos, por pesquisas recentes. Por exemplo, Barlow & Reichard (2010) descrevem a migração vertical de fluxos ao longo de fraturas e outros caminhos preferenciais no *aquífero carbonático Floridano* (análogo do Jandaíra) no sudeste da Georgia e nordeste da Flórida; Landon *et al.* (2010) descrevem estudos de casos e mostram como a coleta de dados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, com a profundidade, em poços de abastecimento público de água em sistemas multi-aquíferos (como é o caso do sistema Jandaíra e Açú em Mossoró), pode contribuir para apontar a existência caminhos “dominantes” ou “preferenciais” para contaminação de poços de abastecimento.

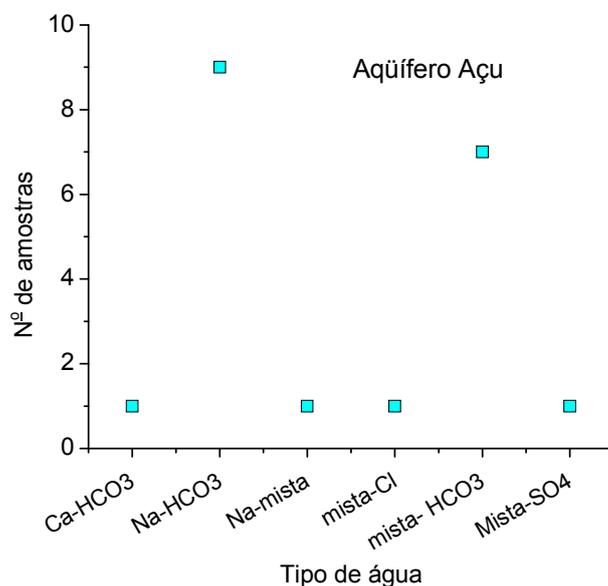


Figura 5.65 - Tipos de água do aquífero Açú.

Esses caminhos podem ser naturais (Ex: fraturas nas camadas confinantes) ou artificiais (ex, os próprios poços).

As **águas do aquífero Açú** são bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas mistas. Do conjunto de amostras analisadas somente uma é sulfatada o que pode identificar a presença de gipsita no local e a do aquífero de Quebradas é cloretada indicando processo de evaporação. As de aluvião são dos tipos, cloretada mista e bicarbonatada sódica.

5.4.9 – Águas do Açú para irrigação

A qualidade da água do aquífero Açú para irrigação, de acordo com o diagrama da **figura 5.66** é predominantemente do tipo **C2S1** que indica médio risco de salinidade e baixo risco de sódio.

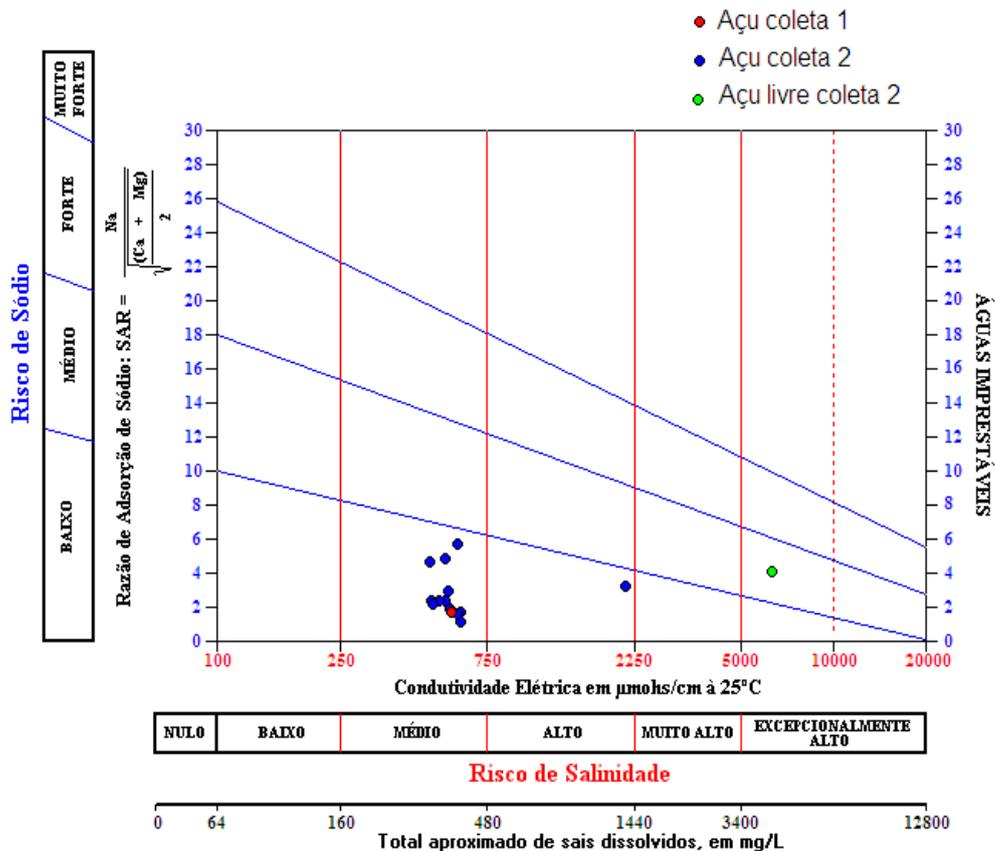


Figura 5.66 - Diagrama de Razão de Adsorção de Sódio – Aquífero Açú, set/09 e jan/10 e do aquífero de Quebradas (jan/10).

A amostra chamada de “Açú Livre”, que aparece na **figura 5.66**, na classe **C5S2**, foi interpretada inicialmente com essa denominação por situar-se na zona de afloramento da Formação Açú, onde se desenvolvem, sobretudo, sedimentos pouco permeáveis do membro superior, representados por folhelhos, argilitos, siltitos e arenitos finos, de fato pertencentes à Formação Açú.

No entanto, toda a sequência dessa Formação até o cristalino, com espessura de 150 m em Vertentes Santa Cruz, incluindo os 30 m mais arenosos da base, é extremamente argilosa. Por essa razão, do ponto de vista hidrogeológico o meio aquífero no qual a referida amostra foi coletada é o **aquitarde Quebradas**.

As águas do aquífero Açú têm baixo risco de salinidade; no entanto, elas são misturas de paleoáguas com águas recentes, representando um recurso pouco renovável, ou seja, uma reserva estratégica. Para **fins de irrigação** as águas do aquífero Açú são de **risco** médio de salinidade e baixo risco de sódio, com exceção de uma amostra; a amostra do aquitarde Quebradas apresenta excepcionalmente alto risco de sódio e médio risco de salinidade.

5.4.10 – Potabilidade das águas do Açú

5.4.10.1 – STD, Cor e Turbidez

STD – aquífero Açú

A **figura 5.67** exibe o histograma de frequência dos **valores de STD** avaliados em (12/13) poços no aquífero Açú (**tabela A5.2c**). Foi descartado apenas um valor anômalo de STD=1508 mg/L (RG 1646) determinado no poço CAERN P02 de Baraúna (A0090), que se encontra desativado por apresentar problemas de rompimento no revestimento.

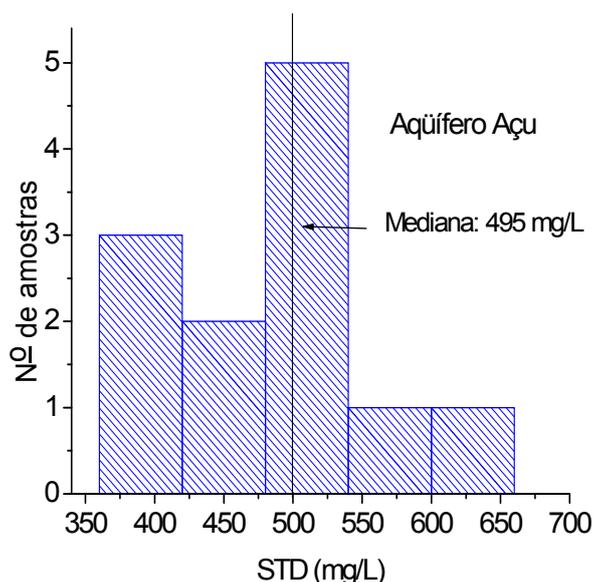


Figura 5.67 - STD em amostras do aquífero Açú (jan/10).

As concentrações de STD dos 12 (doze) poços cujos valores são ilustrados na **figura 5.124**, estão situados no intervalo de 376 a 549 mg/L e são indicativos de águas de boa qualidade para consumo humano. O valor médio é de 532 mg/L.

Cor – aquífero Açú

A **figura 5.68** mostra **valores de cor** no aquífero Açú (**tabela A5.3c**) que estão abaixo de 2,2 uH, muito menos do que nas águas do aquífero Jandaíra.

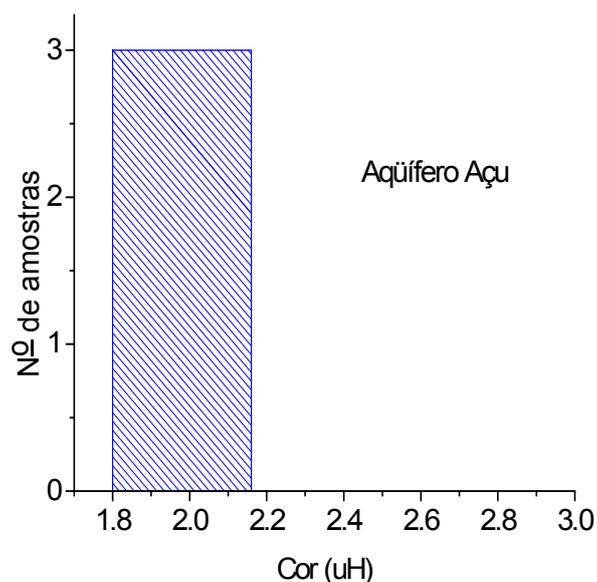


Figura 5.68 – Histograma de Cor da água em amostras do aquífero Açú (jan/10).

Turbidez - aquífero Açú

A **figura 5.69** mostra o histograma de **valores de turbidez** em amostras de água do aquífero Açú (**tabela A5.3c**) nenhuma amostra teve valor acima do VMP.

5.4.10.2 - Ferro, pH e Eh

Ferro – aquífero Açú

Nenhum teor de ferro foi detectado em amostras de água subterrânea do aquífero Açú.

pH – aquífero Açú

Todos os valores de pH estão na faixa dos encontrados nas águas naturais, de 4 a 8,5 (Krauskopf, 1991). A **figura 5.70** mostra o histograma de valores de **pH** no aquífero Açú elaborado com dados da **tabela A5.3c**. Eles variam na faixa 7,2 a 8,4.

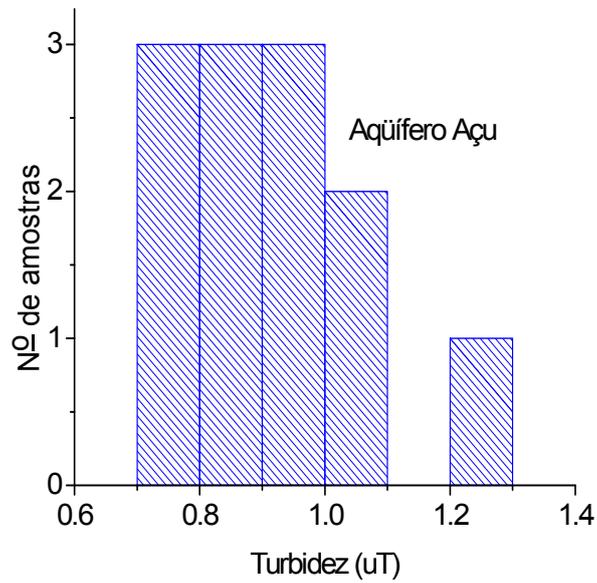


Figura 5.69 - Turbidez em amostras do aquífero Açú (jan/10).

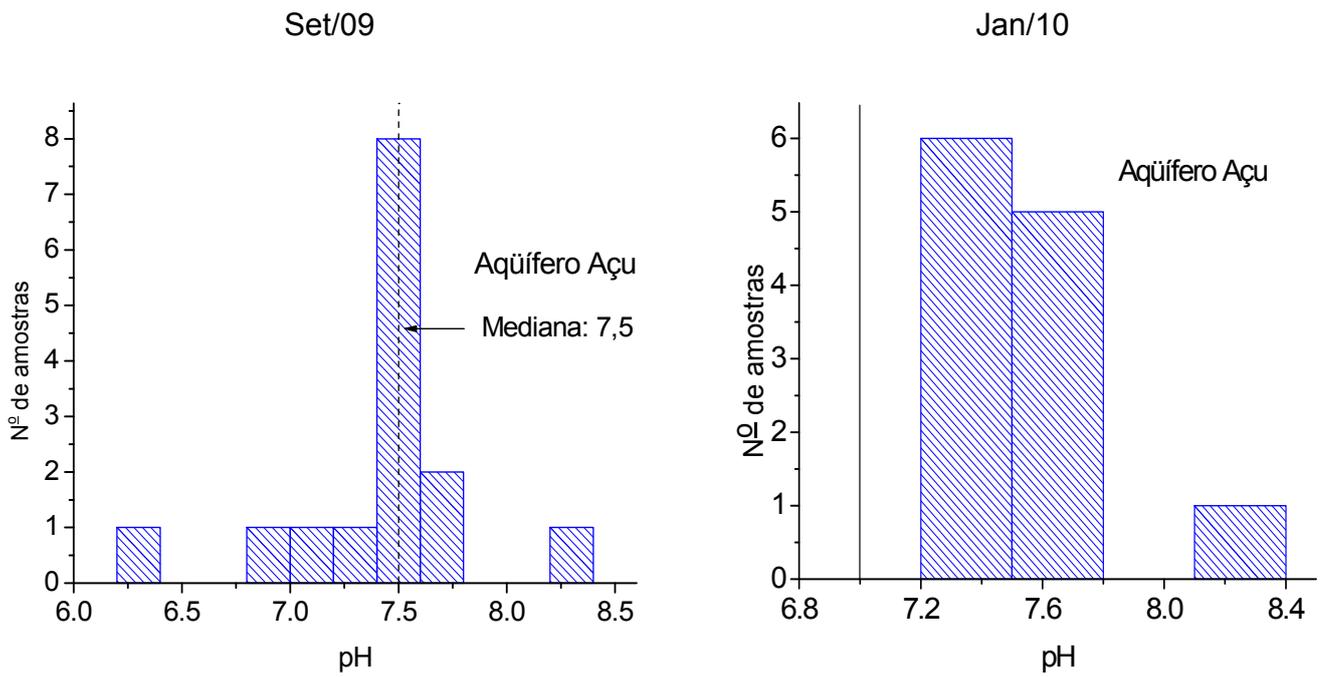
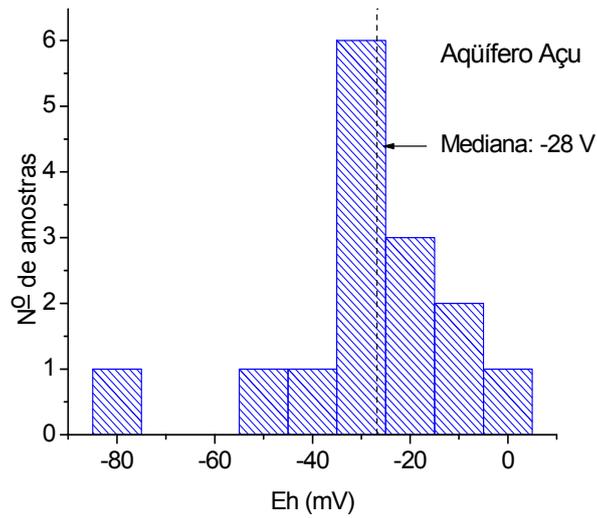


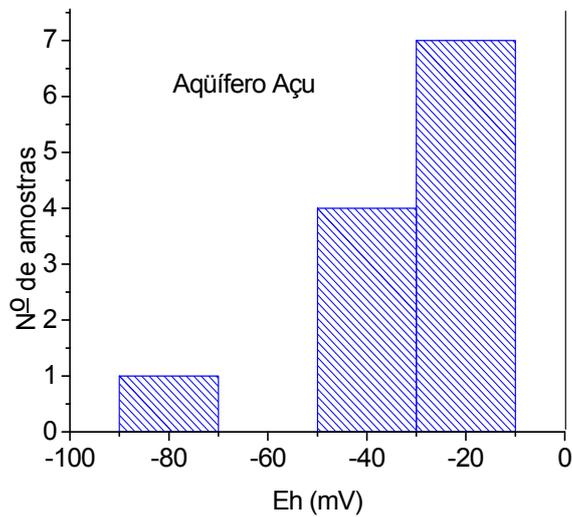
Figura 5.70 - Histogramas de pH das águas do aquífero Açú em set/09 e jan/10.

Eh – aquífero Açú

Os histogramas da **figura 5.71** mostram que os valores de Eh no aquífero Açú (**tabela A5.3c**), estão na faixa de -90 a -9 mV, portanto, mais baixos do que os valores no calcário Jandaíra, uma amostra (RG1656) tem Eh = -80 mV e as outras entre -47 e -9 mV.



Set/09



Jan/10

Figura 5.71 – Histograma de valores de **Eh** em amostras de água do aquífero Açú em set/09 e (jan/10).

A diferença dos valores Eh nas águas do Açú e das águas do Jandaíra se deve às condições de aquífero confinado e de aquífero livre; o Jandaíra é um aquífero aberto, em contato com a atmosfera e o Açú um aquífero fechado onde o oxigênio está em concentrações mais baixas do que no Jandaíra. A presença de oxigênio está associada a valores de Eh positivos e a ausência a valores de Eh negativos. (Hoffmann, 2001).

5.5 - Isótopos ambientais

O hidrogênio e o oxigênio fazem parte da molécula da água e apresentam cada um deles, três formas diferentes; o hidrogênio: ^1H , D (^2H) e T (^3H) e o oxigênio ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O . Por isso, a água pode ser encontrada em formas isotópicas diferentes, sendo as mais abundantes H_2^{16}O , H_2^{18}O e HD^{16}O . As abundâncias relativas médias destas três moléculas da água são, respectivamente, 99%, 73% e 0,032%.

Portanto, a quantidade de moléculas H_2^{18}O e HD^{16}O é muito pequena em relação à quantidade de moléculas H_2^{16}O , porém varia dependendo da origem da água e de processos que ocorrem durante o seu deslocamento e de seu armazenamento superficial. Assim, estas moléculas marcam a água e são utilizadas como traçadores para pesquisar a história da água.

Os resultados são dados em termos de $\delta\text{‰}$, definido por,

$$\delta\text{‰} = [(R_a - R_p)/R_p] \times 10^3$$

Onde, R_a é a razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou D/H, respectivamente, para o oxigênio e para o hidrogênio na amostra e R_p seu valor para uma água padrão "VSMOW" (Vienna Standard Mean Ocean Water) da IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) em Viena/Áustria. O padrão SMOW originalmente era água do oceano escolhido por Craig (1961a).

O valor de δ mede, portanto, o enriquecimento (ou empobrecimento, quando < 0) no isótopo pesado na amostra em relação ao padrão. É importante que, devido à grande predominância do isótopo mais leve (^1H ou ^{16}O), o δ comporta-se como uma concentração em mistura de águas de valores de δ diferentes (i.e. segue uma reta de mistura) (Craig, 1961b). Uma revisão do uso de ^{18}O e D no estudo de águas do Nordeste do Brasil pode ser visto em Santiago *et al.* (2008).

Os gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ vs δD nas **figuras 5.72 e 5.73** permitem distinguir claramente as águas do aquífero Jandaíra nas duas coletas; na coleta de janeiro, os dados ficam próximos da Reta Meteorica Mundial (RMM), o que caracteriza início da recarga em jan/10 e o afastamento dos dados da coleta de set/09 reflete o efeito da dissolução dos calcários.

A RMM ($\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$) tem inclinação 8, mas em clima seco a evaporação durante a queda das chuvas produz inclinação menor do que 8; é o que se observa na **figura 5.73**.

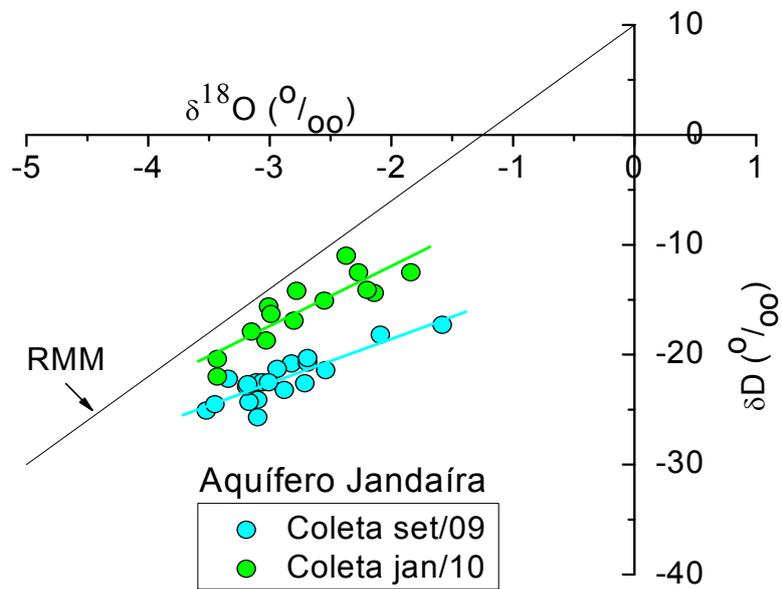


Figura 5.72 - $\delta^{18}\text{O}$ vs δD com amostras do aquífero Jandaíra nas duas coletas, set/09 e jan/10.

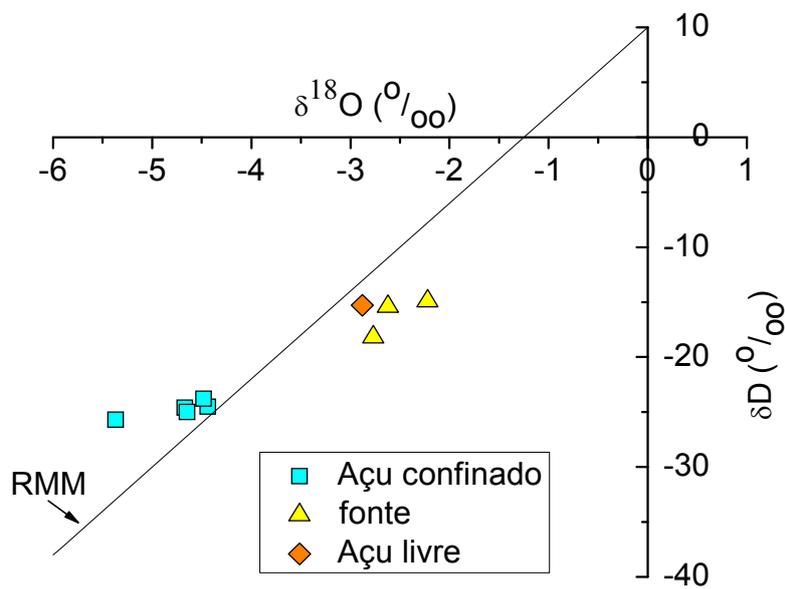


Figura 5.73 - $\delta^{18}\text{O}$ vs δD com amostras do aquífero Açú confinado, fontes e aquífero Quebradas.

A faixa de valores acima de -4 ‰ das águas do Jandaíra indica a presença de águas recentes e os valores abaixo -4 ‰ das águas do Açú indicam mistura de paleoáguas, ou seja, águas que devem ser consideradas como reserva estratégica.

Os dados isotópicos mostram também que as águas do aquífero Jandaíra são de recargas recentes, têm $\delta^{18}\text{O}$ a acima de -4 ‰, e que as águas do Açú são paleoáguas.

O gráfico de $\delta^{18}\text{O}$ vs Condutividade elétrica na **figura 5.74** com água do Jandaíra mostra fraca correlação entre estes dois parâmetros o que indica diferentes mecanismos de salinização. Apenas em parte, os mais elevados valores de $\delta^{18}\text{O}$ estão associados a elevados valores de condutividade elétrica indicando efeito de evaporação. A amostra considerada do aquífero Quebradas não é representativa do aquífero Açú. A relação entre estes dois parâmetros ($\delta^{18}\text{O}$ e CE) tem sido usada com êxito na separação de diferentes tipos de águas em sistemas aquíferos.

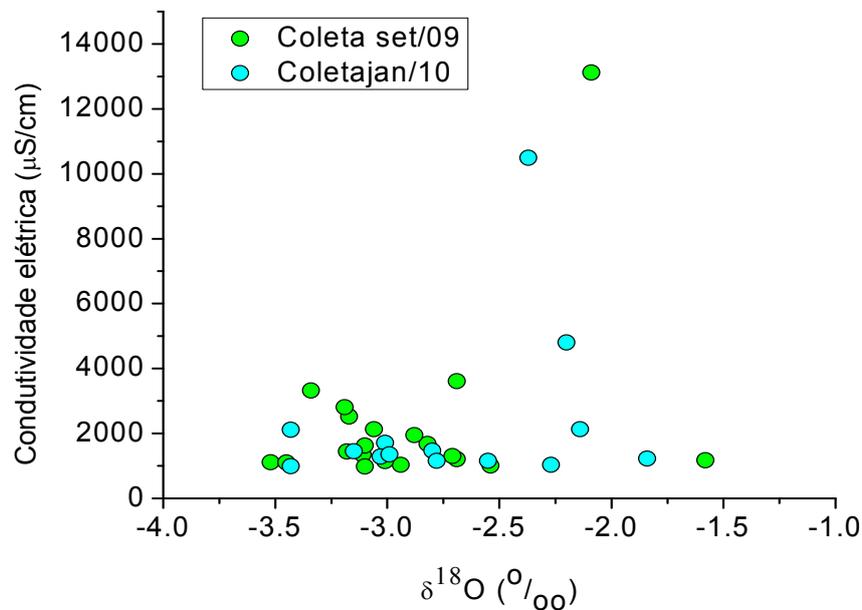


Figura 5.74 – Condutividade elétrica vs δD com amostras do aquífero Jandaíra nas duas coletas, set/09 e jan/10.

As medidas de oxigênio-18 e deutério foram feitas em amostras coletadas nos pontos indicados no mapa da **figura 5.75** mostrados na **tabela A5.6a**, onde estão também os resultados das medidas.

Presença de água evaporada é identificada pelos valores mais altos de oxigênio-18 e deutério. O processo interno de dissolução de calcário aumenta os valores de oxigênio-18 mantendo os valores de deutério porque o oxigênio-18 nos calcários tem valor positivo.

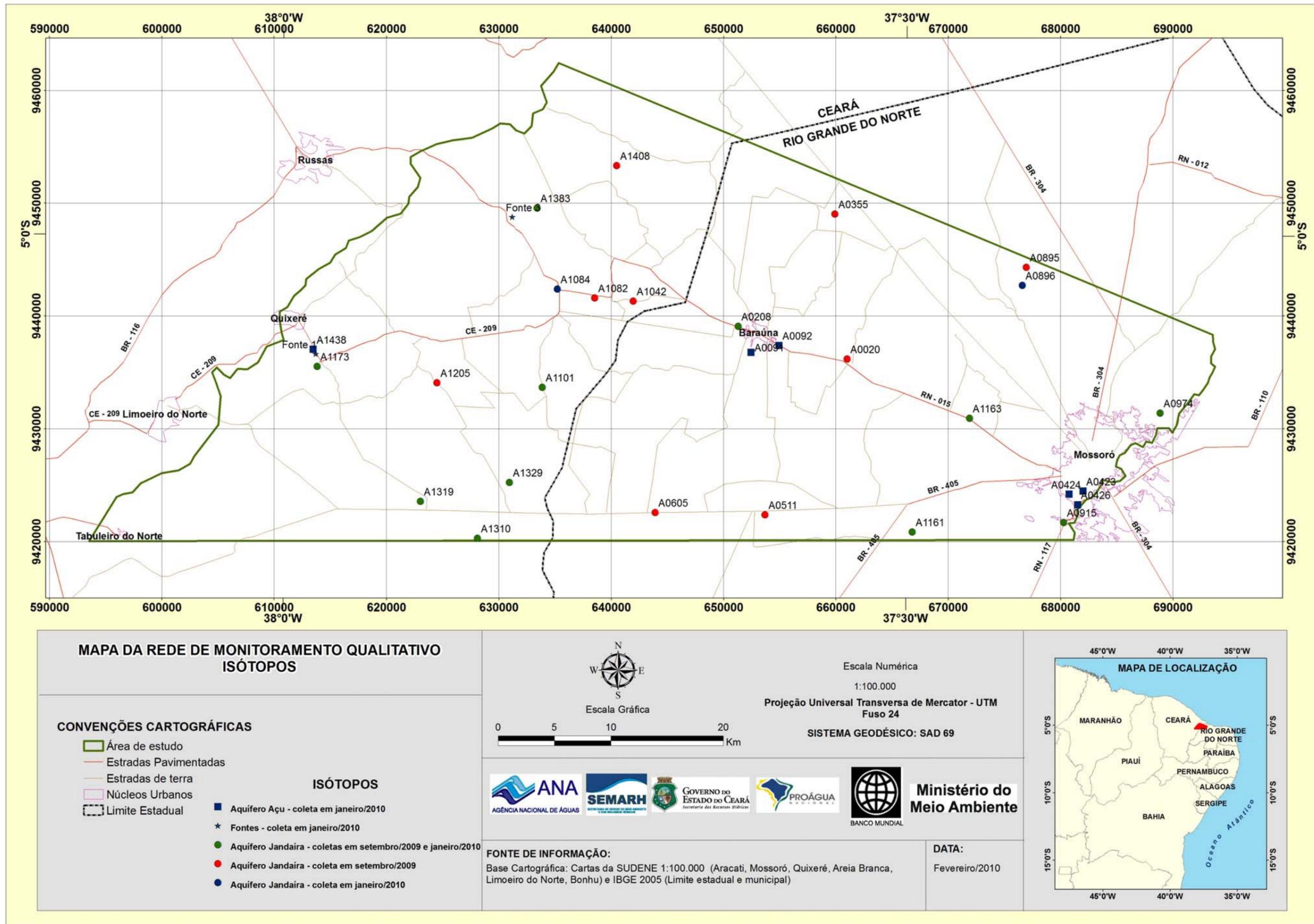


Figura 5.75 - Mapa de localização de pontos de coleta de águas subterrânea para análise isotópica.

5.6 - Metais pesados

As concentrações dos metais pesados, bário, boro, zinco, alumínio, cromo, cobre, níquel, chumbo, arsênio, cádmio e mercúrio foram determinadas em 58 amostras, 45 de água do **aquífero Jandaíra**. Os locais de amostragem estão apresentados na **tabela A5.7a**, mostrados no mapa da **figura 5.78**.

Os resultados das medidas, (**figura 5.76**) mostram a presença de bário em todas as amostras e somente 04 amostras com concentração < VMP. O boro, que também aparece em todas as amostras está em 26 delas com concentração > VMP; ele é usado como micronutriente agrícola deixando resíduos nas águas subterrâneas.

Doze amostras de poços e uma de fonte do aquífero Jandaíra apresentaram outros metais pesados além de bário e boro: 02 em Baraúna, (A0019 e A0149), 09 em Mossoró (A0867 e A0897, na sede do município, e A1156 e A01161, fora do município), 03 em Quixeré (A0410, A01172 e A1173) e 01 em Limoeiro do Norte (A01319). Em uma das fontes a concentração de boro > VMP.

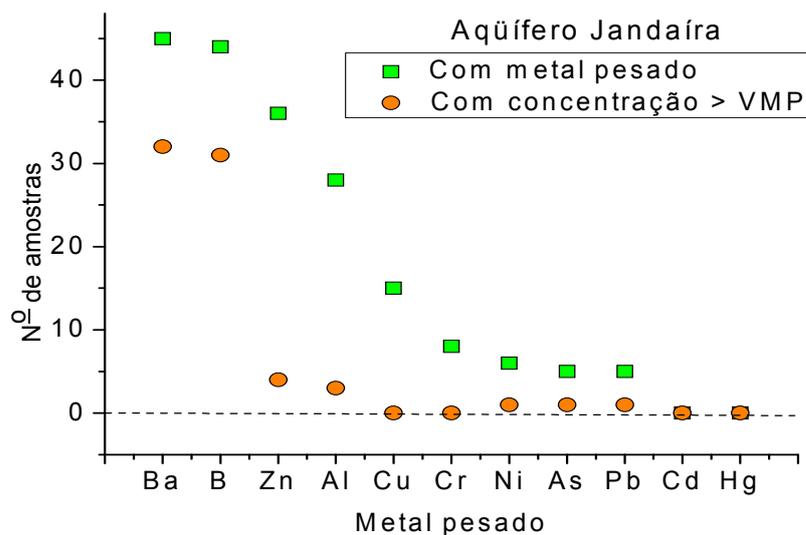


Figura 5.76 - Número de amostras de água com ocorrência de metais pesados no aquífero Jandaíra.

O bário como composto dissolvido em água é extremamente venenoso como é o caso do sulfeto de bário. No entanto, o sulfato de bário pode ser usado como contraste em medicina, por via oral, porque não se dissolve e é eliminado rapidamente pelo trato digestivo. A barita, o mais abundante mineral de bário, é encontrado em veios de calcário junto à calcita, ou como massas residuais na argila que recobre o calcário.

O boro e os boratos não são tóxicos; entretanto, alguns compostos de boro e hidrogênio são tóxicos; ele é utilizado intensivamente como micronutriente. Como exemplo na aplicação foliar de cálcio e boro em sementes de soja, aumentando o peso dos grãos por planta (Bevilaqua *et al.* (2002).

Os resultados das análises de metais pesados em amostras de água do **aquífero Açu** estão apresentados na **tabela A5.7b** e na **figura 5.77**. No aquífero confinado, bário e boro estão presentes em todas as amostras com concentrações muito abaixo do VMP. O mesmo acontece com outros metais: alumínio em 02 amostras (A0091 e A0425), cobre em 01 (A0425), cromo em 06 amostras (A0091, A0092, A0423, A0424, A0425 e A0426) e zinco nas 07 amostras.

As amostras de água coletadas em aluvião (A1440 e A1443) também apresentaram bário, boro, alumínio e zinco.

A amostra do poço Cabeça de Santa Cruz, próximo de um lixão, apresentou estes mesmos metais e zinco com concentração (202,5 mg/L) > VMP (100 mg/L).

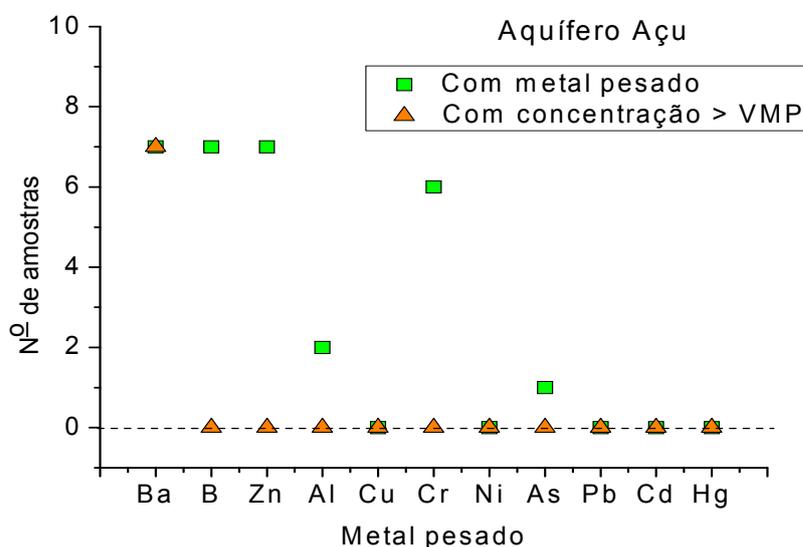


Figura 5.77 - Número de amostras de água com ocorrência de metais pesados no aquífero Açu.

Como mostra a **tabela 5.30**, dentre os metais encontrados nas águas subterrâneas, o bário é o único que ocorre em 100% das amostras e com teores significativos em ambos os aquíferos. Os valores acima do VMP no aquífero Jandaíra ocorrem em 71% das amostras (32/45) e no aquífero Açu em 100% das amostras (7/7).

Depósitos estratiformes de barita costumam ser encontrados em bacias sedimentares e têm como origem fluidos hidrotermais que exalam dos fundos oceânicos precipitando barita e outros minerais como sedimentos químicos (Paradisi *et al.* 1998). Os principais tipos de rochas hospedeiras de barita são folhelhos carbonáticos e silicáticos, siltitos, argilitos, turbiditos, arenitos, dolomitos e calcários. Na bacia Potiguar (Pessoa Neto, 2007) esses tipos litológicos ocorrem na Formação Quebradas, sob a forma de interdigitações que afetam toda a sequência Açu-Jandaíra. Portanto, admite-se que as intercalações de folhelhos da Formação Quebradas existentes no sistema aquífero Açu-Jandaíra na Chapada do Apodi, são as prováveis rochas

hospedeiras do bário, que realmente ocorre em teores significativos em águas dos dois aquíferos.

O bário como composto dissolvido em água é extremamente venoso como é o caso do sulfeto de bário. No entanto, o sulfato de bário pode ser usado em medicina, por via oral, como contraste porque não se dissolve e é eliminado rapidamente pelo trato digestivo.

O boro e os boratos não são tóxicos; entretanto, alguns compostos de boro e hidrogênio são tóxicos; o boro é utilizado intensivamente como micronutriente. Como exemplo foi feita por Bevilaqua *et al.* (2002) a aplicação foliar de cálcio e boro em sementes de soja aumentando o peso dos grãos por planta.

Os maiores depósitos de boro são encontrados em rochas sedimentares formadas durante a Era Cenozóica, como resultado da evaporação das nascentes geotérmicas (Schlag & Mori, 2008). Assim sendo, pode-se dizer que na área de estudo as fontes termais do calcário Jandaíra, evidenciadas pela presença de travertinos em muitos locais da borda oeste da Chapada do Apodi, podem ser as responsáveis pela presença de boro nas águas subterrâneas do aquífero Jandaíra.

Tabela 5.30 - Metais pesados em 45 amostras do aquífero Jandaíra 07 do aquífero Açú.

Metal	Aquífero Jandaíra Nº amostras			Aquífero Açú Nº amostras		
	Com o metal	Com Valor > VMP	% > VMP	Com o metal	Com Valor > VMP	% > VMP
Bário	45	32	71	7	7	100
Boro	44	31	70	7	0	0
Zinco	36	4	11	7	0	0
Alumínio	28	3	11	2	0	0
Cobre	15	0	0	0	0	0
Cromo	8	0	0	6	0	0
Níquel	6	1	17	0	0	0
Arsênio	5	1	20	1	0	0
Chumbo	5	1	20	0	0	0
Cádmio	0	0	0	0	0	0
Mercúrio	0	0	0	0	0	0

Boro, zinco e alumínio, devem ter origem no próprio aquífero pela sua distribuição na área; análise mineralógica de sedimentos permitiria identificar a origem dos metais encontrados. Admite-se que a gênese primária de todos esses metais na Bacia Potiguar está ligada a fluidos hidrotermais que exalam dos fundos oceânicos, afetando, portanto, ambos os aquíferos, Jandaíra e Açú.

Dos 11 **metais pesados** analisados em águas do aquífero Jandaíra, cádmio e mercúrio não foram encontrados nas amostras analisadas. Arsênio, níquel e chumbo apareceram em 5, 5 e 6 amostras, respectivamente e cada um deles aparece em 01 amostra com concentração > VMP. Zinco foi detectado em 36 amostras, 4 delas com teor > VMP e alumínio em 28 amostras, 3 delas com concentração >VMP.

Bário foi detectado nas 45 amostras das quais 32 tinham concentração > VMP e somente uma amostra apresentou boro que apareceu em 31 amostras com

concentração > VMP. De acordo com Hem (1985) estes dois metais são abundantemente encontrados nas águas subterrâneas, o boro pode estar presente como acessório da biotita e do anfibólio e o bário como barita.

Admite-se que as intercalações de folhelhos da Formação Quebradas existentes no aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi, são as prováveis rochas hospedeiras do bário, que realmente ocorre em teores significativos.

Nas águas do aquífero Açú, dos 11 **metais pesados** analisados, cobre, níquel, chumbo, cádmio e mercúrio não foram encontrados, arsênio foi encontrado em uma amostra, cromo em 6 amostras, bário, boro e zinco em 7 amostras tendo o bário concentrações > VMP.

5.7 - Agrotóxicos

Um conjunto de 38 amostras de água subterrânea coletadas nos locais indicados no mapa da **figura 5.79** foi analisado para determinação da presença de 197 agrotóxicos indicados nos laudos.

No aquífero Jandaíra (**tabela A5.8a**) das 29 amostras coletadas em 28 poços e uma de fonte, apenas duas amostras apresentaram resíduos de agrotóxicos, uma em Baraúna (A0116) e outra em Quixeré (A0410). A amostra A0116 continha 0,09 µg/L de tebuconazol e a amostra A0410 continha 0,176 mg/kg de buproferina (praticamente inofensivo), 0,066 mg/kg de difenoconazol I e II (altamente tóxico) e 0,117 mg/L de metalaxil (moderadamente tóxico) (EPA/USA, 2010), como mostra a **tabela 5.31**.

Nenhuma das amostras coletadas no aquífero Açú e aquitarde Quebradas (**tabela A5.8b**) e no aquífero aluvial (**tabela A5.8c**) apresentaram resíduos de agrotóxicos.

Tabela 5.31 – Amostras com resíduo de agrotóxico. * (EPA/USA, 2010).

Município	Poço	Agrotóxico	Toxicidade *	Conc
Baraúna	A0116	Tebuconazol	Pouco tóxico	0,090 (µg/L)
Quixeré	A0410	Buproferina	Praticamente Inofensivo	0,176 (mg/kg)
		Difenoconazol I e II	Altamente tóxico	0,066 (mg/kg)
		Metalaxil	Medianamente tóxico	0,117 (mg/kg)

A presença de resíduo de agrotóxicos nas águas subterrâneas depende de variáveis ambientais como a quantidade de matéria orgânica no solo que absorve grande parte dos compostos orgânicos não polares, impedindo que estes cheguem ao lençol freático por lixiviação; depende também da textura e da porosidade que determinam a capacidade do solo reter ou não a solução no solo.

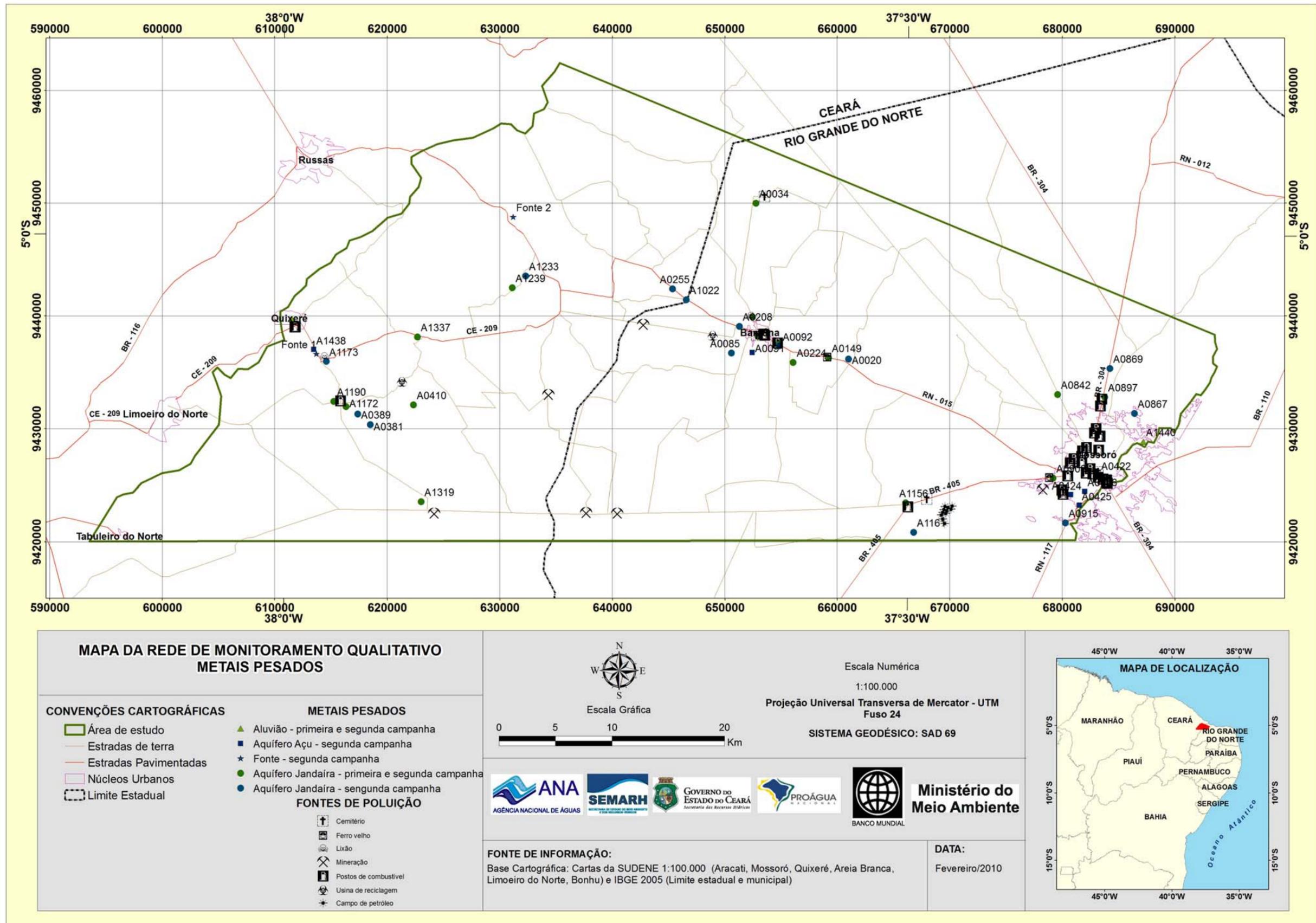


Figura 5.78 – Mapa de localização dos pontos de coleta para análise de metais pesados.

A tendência de contaminação das águas subterrâneas por agrotóxicos se deve, conforme os critérios da EPA, aos seguintes aspectos do composto: a solubilidade em água, o coeficiente de adsorção à matéria orgânica, a meia vida no solo e a meia vida na água. Devem-se considerar também as características ambientais: pluviosidade anual, presença de solo poroso e presença de aquífero não confinado.

A degradação do ingrediente ativo e extensão da biodegradação dependem das características do solo; portanto, a meia vida no solo (D_{50} : tempo, em geral em dias, para a concentração reduzir para metade) varia com parâmetros ambientais.

Nas águas com análise de **agrotóxicos** só foram encontrados resíduos em duas delas, dos Poços A0116 em Baraúna e A0410 em Quixeré. Como os agrotóxicos aderem ao solo e em geral têm uma meia vida curta, ter atingido as águas subterrâneas significa elevado e recente uso destes compostos.

A não detecção de resíduo nas outras águas não significa que estas águas não tiveram resíduos de **agrotóxicos** porque a coleta de água pode ter acontecido após um intervalo de tempo de várias meias vidas. A tendência atualmente é de produção de agrotóxicos com meia-vida curta para que eles sejam rapidamente degradados.

Um conjunto de amostras de água subterrânea coletadas em junho e outubro de 2008 foi analisado quanto à presença de resíduos de **agrotóxicos** (COGERH, 2009), sendo as amostras dos municípios de Tabuleiro do Norte, Limoeiro do Norte, Quixeré e Alto Santo. Os resultados mostraram a presença de resíduo de agrotóxico em 05 das 10 amostras da coleta de junho. Somente 01 amostra da coleta de outubro apresentou resíduo em água de um poço que não tinha resíduo na coleta de junho.

Estes resultados são decorrentes de dois aspectos; o uso de agrotóxico não é contínuo e os **agrotóxicos** têm, em geral, meia-vida curta.

5.8 - BTEX e fenóis

Em 54 amostras coletadas nos locais indicados no mapa da **figura 5.80** foi analisada a presença de BTEX. Os resultados são apresentados na **tabela A5.9a** para o aquífero Jandaíra. Para o aquífero Açú e aquitarde Quebradas, na **tabela A5.9b** e para o aquífero aluvial na **tabela A5.9c**. A distribuição de frequência do índice de fenóis em ambos os aquíferos é apresentada na **tabela 5.32**.

No aquífero Jandaíra, somente 01 amostra (A0023) de Baraúna apresentou 1,03 de tolueno e 01 amostra de Limoeiro do Norte (A1319) apresentou 1,45 de etil-benzeno.

Os BTEX – benzeno, tolueno e etil xileno - são hidrocarbonetos monoaromáticos presentes nas águas como fonte de contaminação, provenientes principalmente do vazamento de gasolina de tanques subterrâneos mal conservados ou mal manejados. Pátios de armazenagem de derivados de petróleo, oleodutos com vazamentos ou oficinas mecânicas que manipulam derivados de petróleo são outras fontes de contaminação por BTEX.

Tabela 5.32 – Frequência do índice de fenóis nos aquíferos Jandaíra e Açú.

Intervalo de classe índice do Fenóis	Frequência absoluta	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
Aquífero Jandaíra				
$0 < x \leq 5$	13	13	0,32	32
$5 < x \leq 10$	13	26	0,32	63
$x > 10$	15	41	0,37	100
Aquífero Açú				
$0 < x \leq 5$	3	3	0,38	38
$5 < x \leq 10$	0	3	0,00	38
$x > 10$	5	8	0,63	100

BTEX é o grupo de compostos aromáticos mais solúveis e mais móveis encontrados na gasolina (Poulsen *et al.* 1992). A sua solubilidade pode ser maior se a gasolina for misturada com solventes orgânicos oxigenados, tais como álcool e éteres, como é o caso da gasolina comercial brasileira que é misturada com etanol, que é um co-solvente potencial (Corseuil & Alvarez, 1996).

Quando liberados no ambiente, eles podem se volatilizar, dissolver-se, ser adsorvidos pelas partículas do solo ou podem ser biologicamente degradados.

Os fenóis aparecem nas águas naturais através de descarga de efluentes industriais, são tóxicos ao homem e aos organismos aquáticos.

Os resultados das medidas de fenóis estão mostrados nas **tabelas do item A5.7**. Para o aquífero Jandaíra (**tabela A5.7a**) o histograma de frequência do índice de fenóis é ilustrado (**figura 5.81a**). Os valores oscilam entre 3 e 40 $\mu\text{g/L}$ e apresentam uma mediana de 6 $\mu\text{g/L}$.

Como já mencionado, a análise de **BTEX** identificou somente tolueno na água do poço A0023, em Baraúna e etil-benzeno na água do poço A1319 em Limoeiro do Norte. Os BTEX aderem ao solo e sua movimentação para o nível freático é relativamente lenta; se houver oxigênio em grande quantidade, eles podem ser biologicamente degradados o que justifica não serem encontrados em outras amostras mesmo que estejam presentes nas águas superficiais e/ou no solo.

Fenóis podem ser formados naturalmente por processos biogeoquímicos (Hoekstra *et al.* 1999). São encontrados em pequenas concentrações em águas naturais. Por serem constituintes das plantas, podem também ser formados durante os processos de humificação no solo. São também liberados no ambiente pela degradação de pesticidas com estrutura fenólica. Fenóis e clorofenóis têm sido definidos como poluentes devido à sua toxicidade e persistência à biodegradação. A sua origem natural justifica a presença em todas as amostras analisadas.

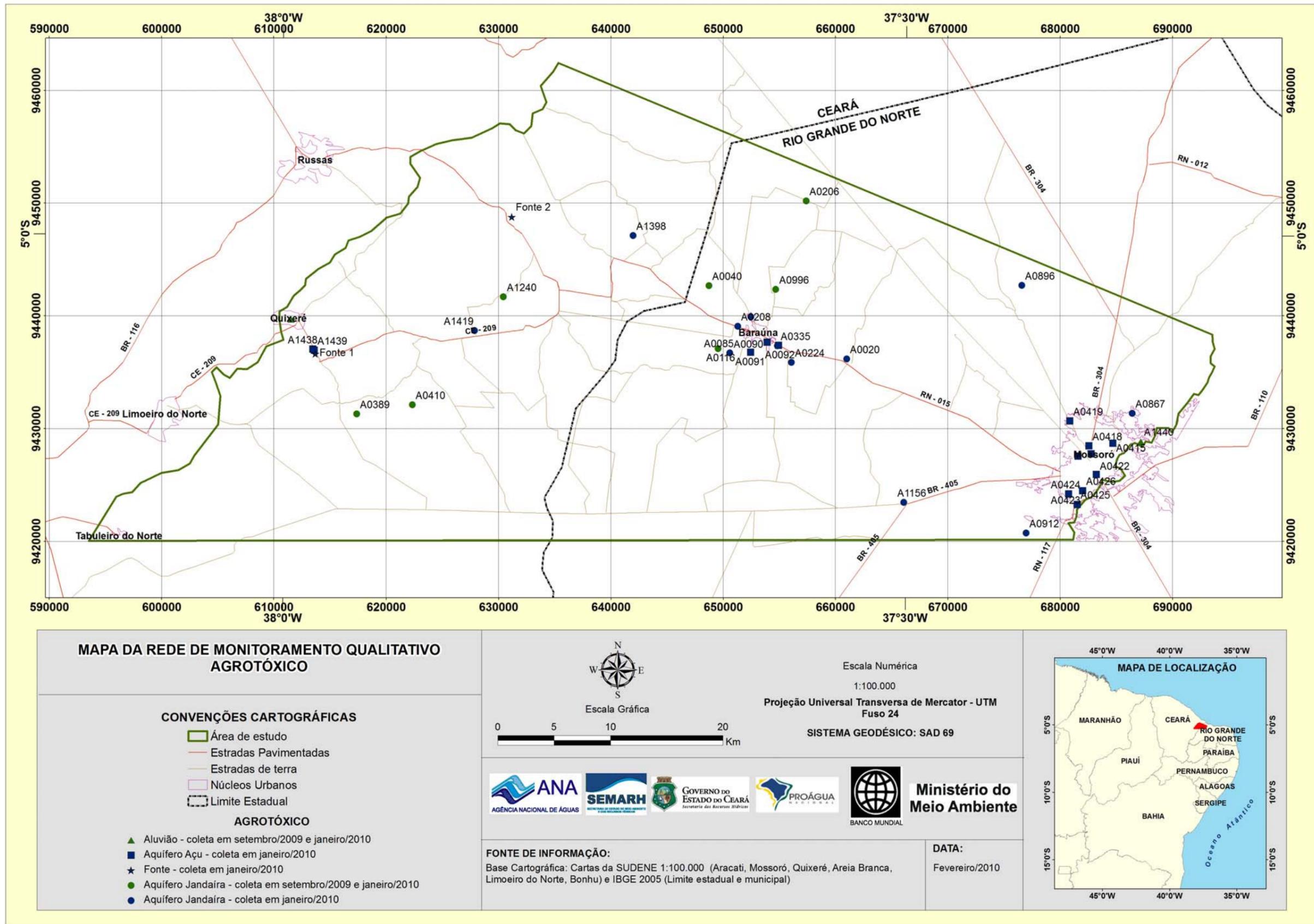


Figura 5.79 - Mapa de localização dos pontos de coleta para análise de agrotóxicos.

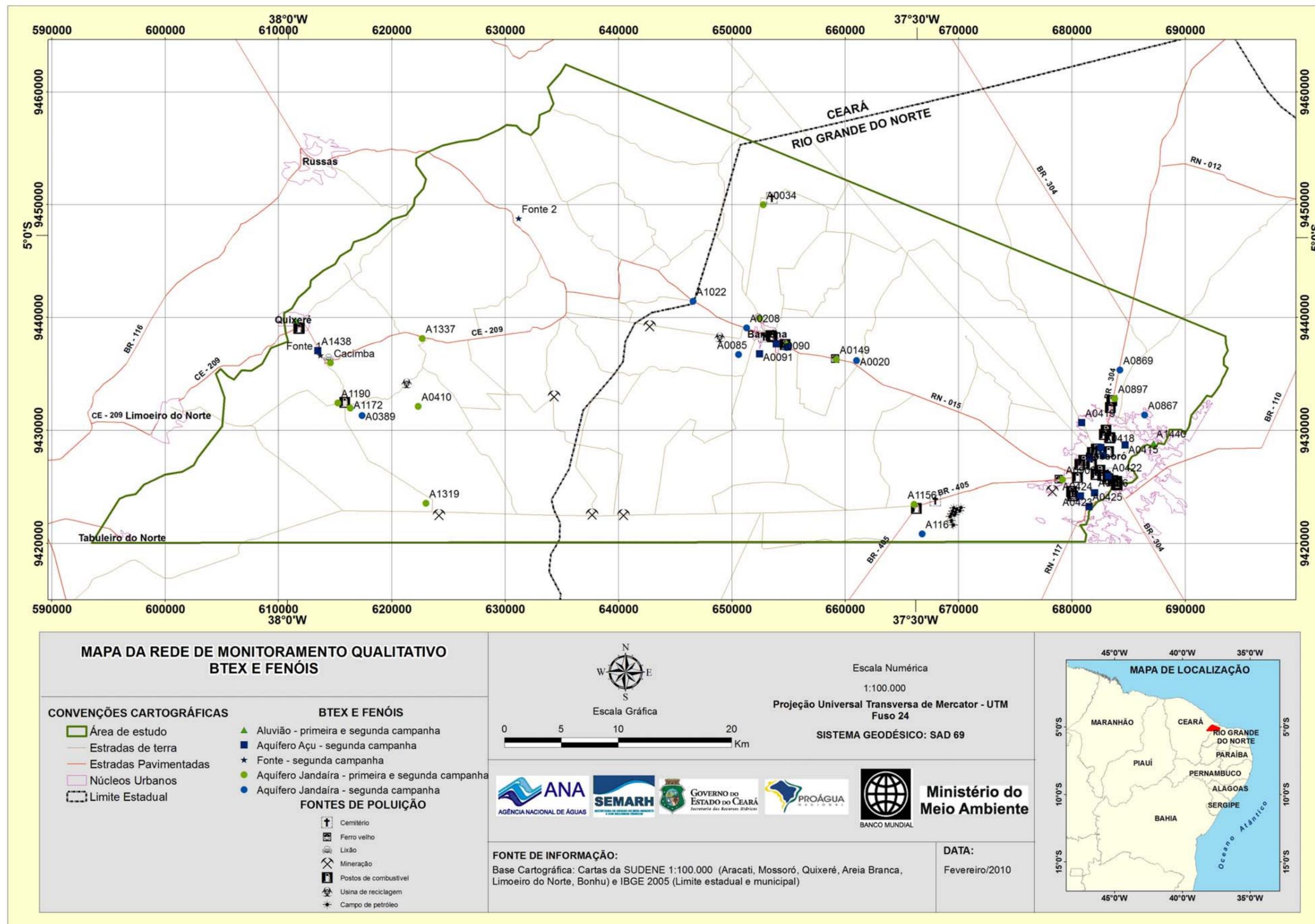
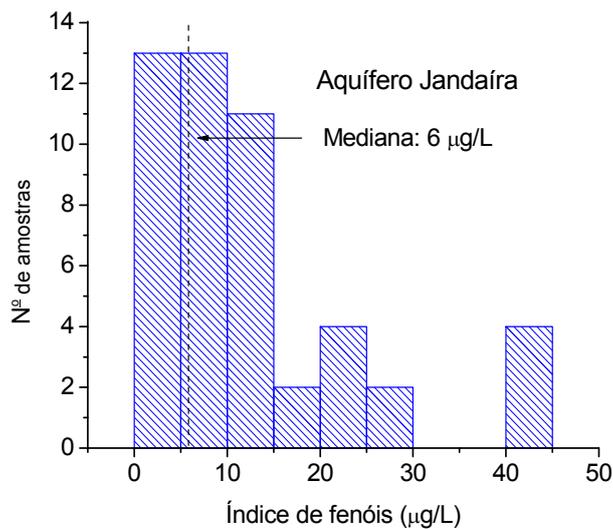


Figura 5.80 - Mapa de localização dos pontos de coleta para análise de BTEX e fenóis.

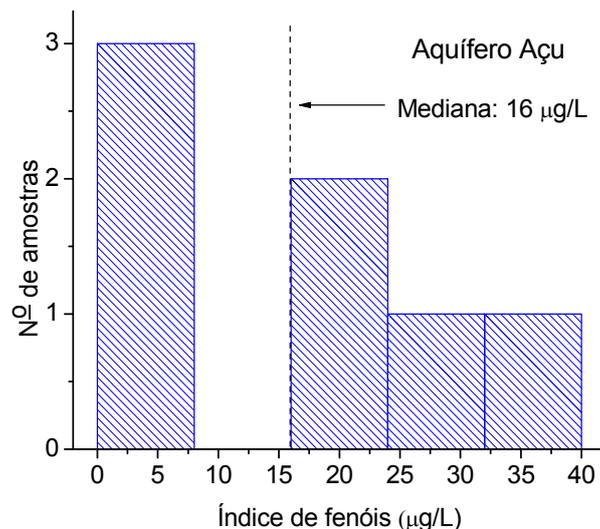
No aquífero Açú (**tabela A5.7b**) o histograma de frequência do IF (**figura 5.81b**) contempla valores de 4 a 35 $\mu\text{g/L}$ cuja mediana é de 16 $\mu\text{g/L}$. Não foi incluído um valor de IF = 180 $\mu\text{g/L}$, muito mais elevado em relação aos demais encontrado no poço A0426 (poço P15 da CAERN em Mossoró).

Considerando que o limite para as águas potáveis é de 10 $\mu\text{g/L}$, nos dois aquíferos são encontradas águas inadequadas ao consumo humano pelas concentrações acima deste valor. No Jandaíra são (6/41) ou 15% das amostras e no Açú, (4/6) ou 67% das amostras de poços da CAERN em Mossoró e (2/2) ou 100% das amostras de poços da CAERN em Baraúna.

A média dos valores de 04 amostras de aluvião (**tabela A5.7c**) é 6,2 $\mu\text{g/L}$.



a



b

Figura 5.81 - Índice de fenóis em águas dos aquíferos Jandaíra e Açú.

5.9 - Análises bacteriológicas

Somente 11 amostras foram coletadas em janeiro de 2010 para análise bacteriológica; 04 do município de Baraúna, 04 de Mossoró, 02 de Quixeré e 01 de Jaguaruana. Em todas as amostras foram encontradas coliformes totais (CT) e 07 tinham coliformes fecais (termotolerantes), como mostrado na **tabela 5.33**.

As águas destinadas ao consumo humano (para beber, para preparar alimentos, etc.) não devem conter microrganismos patogênicos como bactérias, protozoários ou vírus, pois eles podem originar uma série de doenças infecciosas, representando um risco para a saúde humana. Esta é a principal causa da ocorrência de epidemias, principalmente em países onde as infra-estruturas, os cuidados sanitários e os cuidados de higiene pessoal são insuficientes ou inexistentes.

Os organismos indicadores de poluição fecal são as bactérias do grupo coliforme; são atualmente denominados de coliformes termotolerantes pela sua resistência a temperaturas mais elevadas do que as demais.

Tabela 5.33 – Resultados de análises bacteriológicas.

ANA	Local	Município	Coliformes Totais	Coliformes Fecais
A0149	Campestre	Baraúna	275,5	9,8
A0251	Santa Clara	Baraúna	1,0	<1,0
A0335	Moinho Novo	Baraúna	>2419,6	<1,0
A1026	Córrego da Pedra	Baraúna	307,6	2,0
A1029	Formigueiro	Jaguaruana	>2419,6	>2419,6
A0915	Sítio Estreito	Mossoró	261,3	<1,0
A0943	Sítio Ema	Mossoró	11,0	2,0
A1115	Barreira Vermelha	Mossoró	>2419,6	<1,0
A1440	Cajazeira	Mossoró	>2419,6	1553,1
A1205	Queimadas	Quixeré	>2419,6	>2419,6
A1443	Aluvião	Quixeré	>2419,6	648,8

5.10 - Classes de águas

As amostras de água das duas campanhas foram coletadas em locais de diferentes condições ambientais, não sendo necessário realizar medidas de todos os parâmetros em todas elas. Sem todos os dados disponíveis para classificar as águas de acordo com o artigo 12 da Resolução CONAMA 396/2008, propomos classificar as águas separando-as em dois grupos:

- no primeiro a potabilidade das águas foi determinada utilizando dados de íons maiores, ferro, STD, dureza, cor e turbidez.
- no segundo grupo estão as águas que além da determinação das análises do primeiro grupo tiveram medidos alguns dos parâmetros, metais pesados, BTEX, fenóis, agrotóxicos e bactérias.

A classificação foi feita em função dos VMP (**item A5.11**), considerando:

- **classe 1** as águas com todos os parâmetros com valores menores do que o VMP;
- **classe 2** com um parâmetro com valor maior do que o VMP;
- **classe 3** com dois parâmetros > VMP;
- **classe 4** as amostras com três ou mais parâmetros > VMP;

A **figura 5.82** mostra o número de amostras em cada classe para cada uma das duas coletas classificadas a partir dos parâmetros físico-químicos. Observa-se que com o início do período chuvoso, quando inicia a recarga, diminuiu o número de amostras nas classes C1 a C3 e aumentou o número de amostras na classe C4 indicando recarga com mais parâmetros acima do VMP.

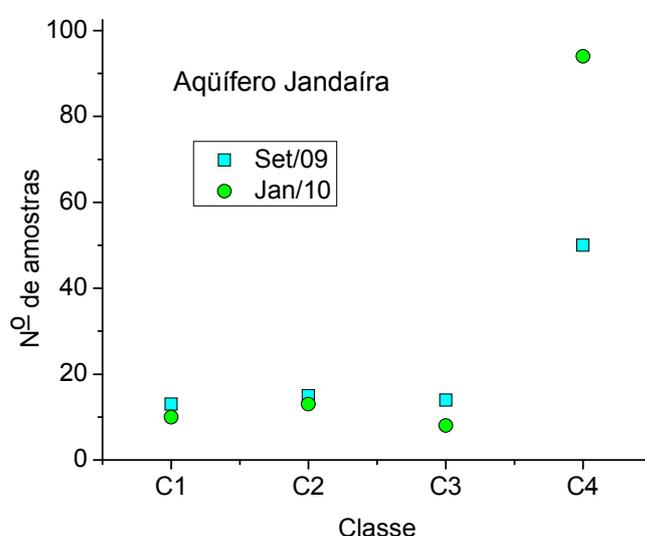


Figura 5.82 - Número de amostras por classe nas águas do Jandaíra em set/09 e jan/10, considerando íons maiores, ferro, STD, dureza, cor e turbidez.

Na **figura 5.83** observa-se a mudança de classe quando são considerados, além dos parâmetros físico-químicos, medidas de metais pesados, agrotóxicos e bactérias contribuindo para diminuir o número de amostras das classes 1 e 2. Na inclusão destes parâmetros foi considerado também o VMP para os agrotóxicos, metais pesados e bactérias. O maior percentual de amostras está na classe C4 (59%), seguido das classes C2 e C3 com 15 e 15%, respectivamente e na classe 1 está somente 10% das amostras.

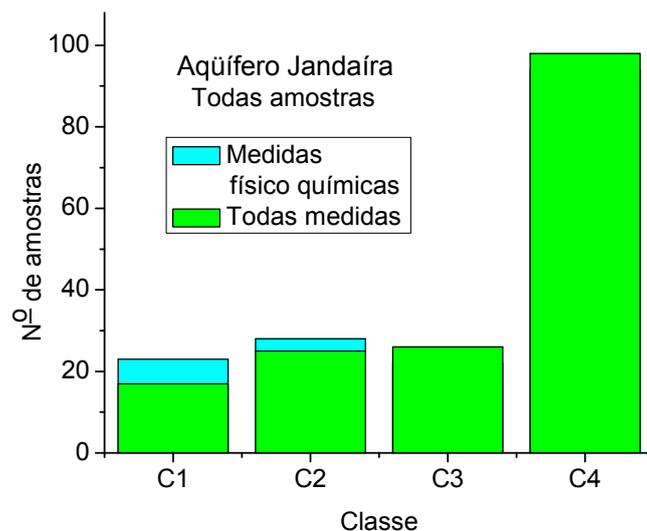


Figura 5.83 - Número de amostras por classe nas águas das duas coletas no Jandaíra considerando as análises físico-químicas e também considerando as análises de metais pesados, agrotóxicos, índice de fenóis e bactérias.

A **figura 5.84** mostra que no aquífero Açú águas da classe 2 passaram à classe 3 quando foram analisados parâmetros além dos físico-químicos.

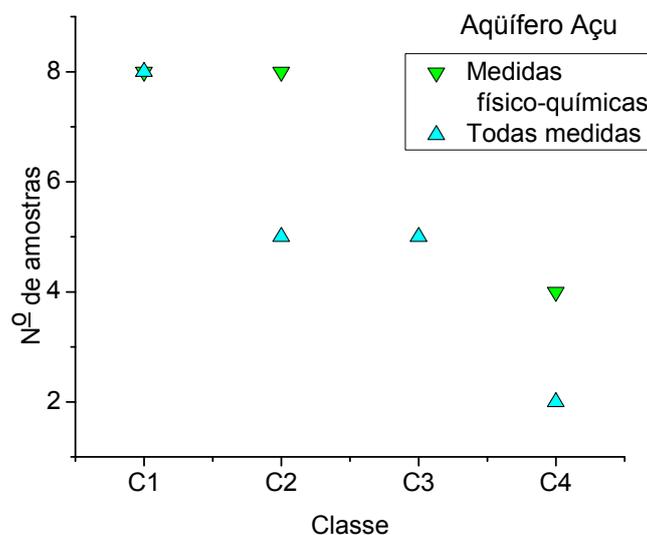


Figura 5.84 - Número de amostras por classe nas águas do aquífero Açú considerando as análises físico-químicas e também considerando as análises de metais pesados, agrotóxicos, índice de fenóis e bactérias.

A **figura 5.85** mostra o mapa de zoneamento de classificação para o aquífero Jandaíra com as amostras coletadas em set/09 (**tabela A5.11c**) e a **figura 5.86** para jan/10 (**tabela A5.11d**) no aquífero Jandaíra. A **figura 5.87** mostra o mapa de classificação para o aquífero Açú (**tabela A5.11e**).

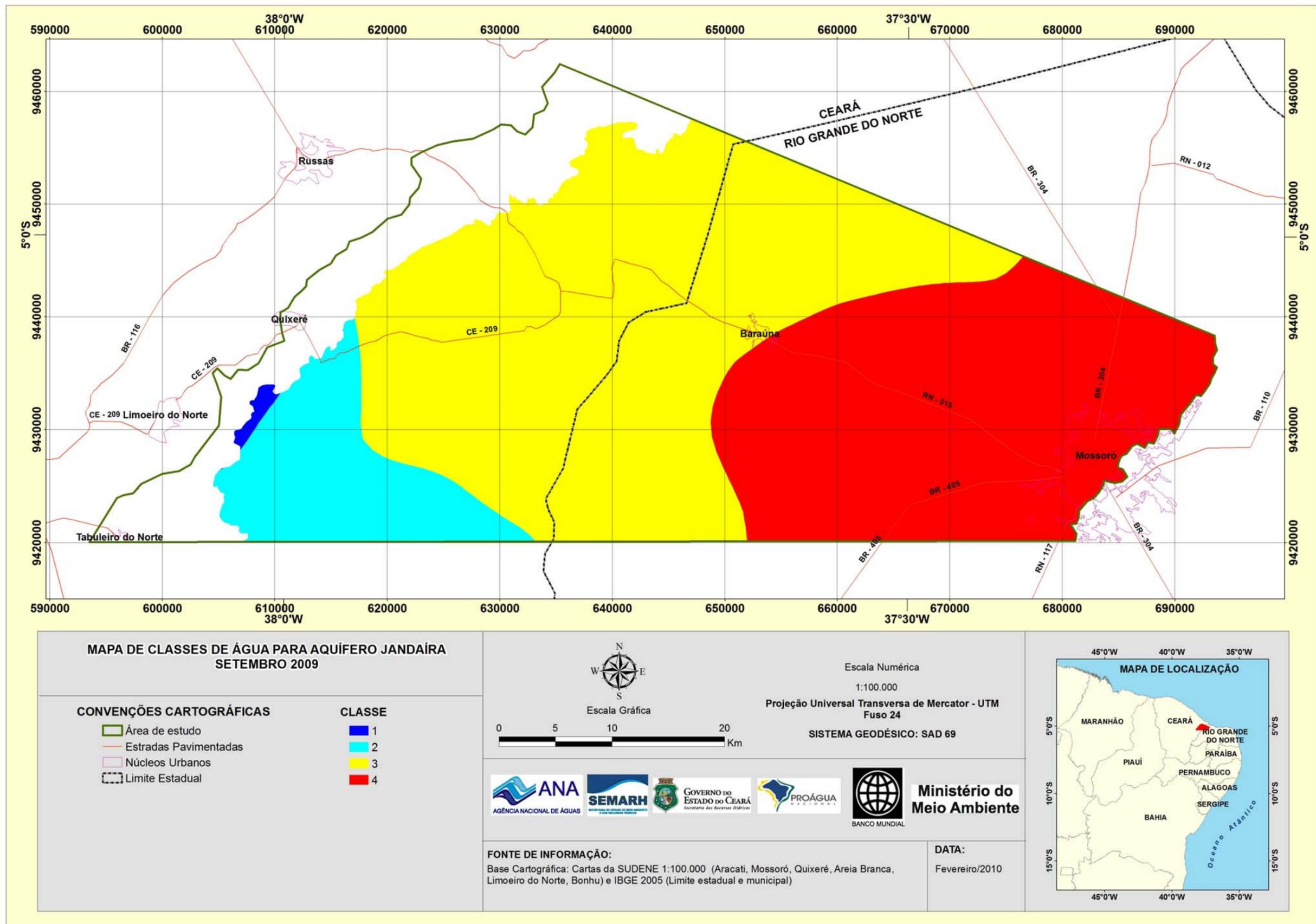


Figura 5.85 - Mapa de classes de água para o aquífero Jandaíra na coleta de set/09.

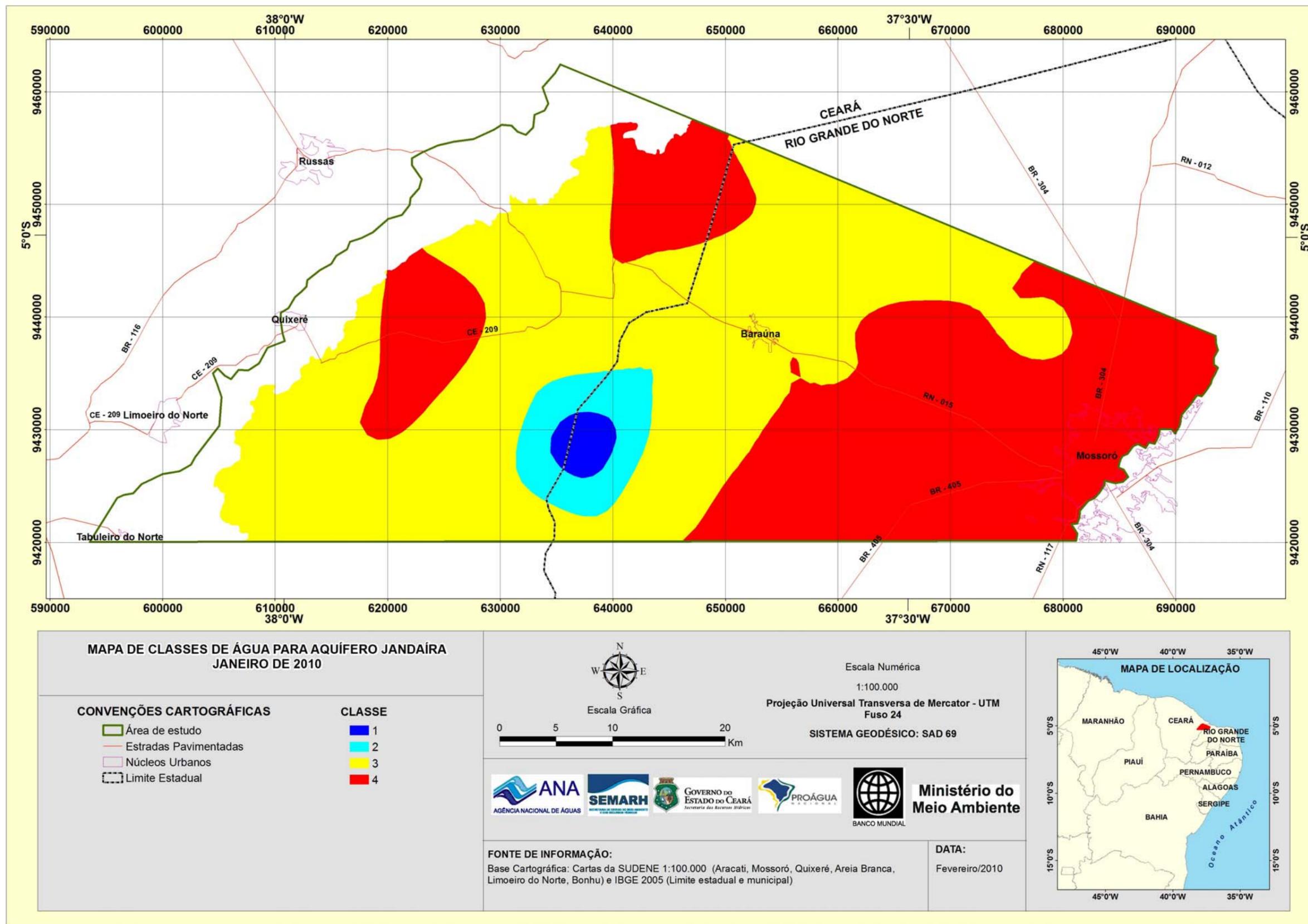


Figura 5.86 - Mapa de classes de água para o aquífero Jandaíra na coleta de jan/10.

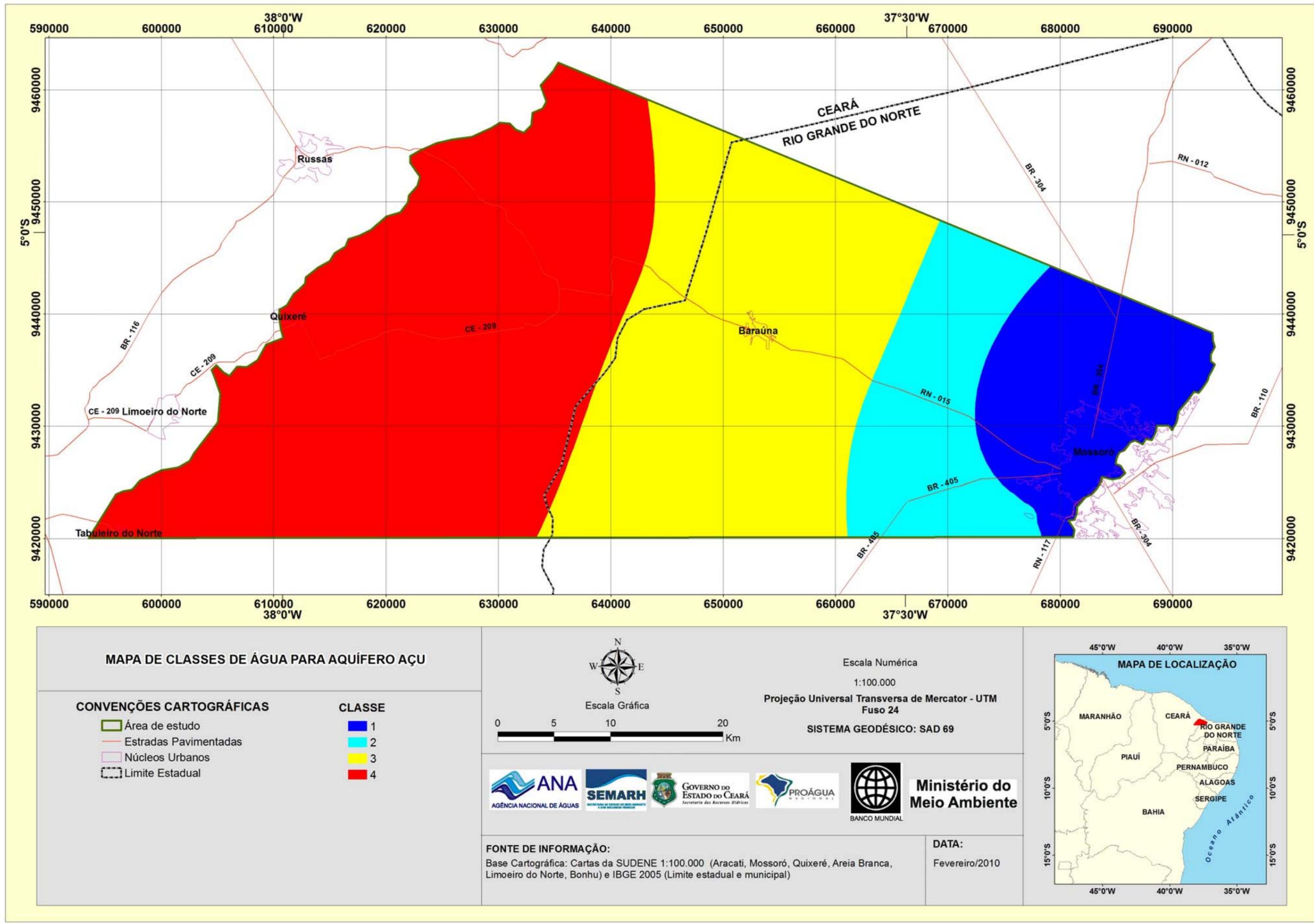


Figura 5.87 - Mapa de classes de água para o aquífero Açu.

5.11 - Vulnerabilidade dos aquíferos

O índice de vulnerabilidade foi determinado pelo método “GOD” (item 5.2.3) que utiliza o produto de três parâmetros relacionados com: (i) a condição do aquífero (ii) o substrato litológico e (iii) a profundidade da água subterrânea. O cálculo da vulnerabilidade foi feito somente para o aquífero Jandaíra.

O aquífero Açú, na área de estudo, ocorre apenas sob a forma de *aquífero confinado profundo* e à luz do método GOD apresenta vulnerabilidade *insignificante*. Na área de afloramento da Formação Açú, ocorrem apenas sedimentos do membro superior que do ponto de vista hidrogeológico correspondem ao aquífero Quebradas.

Predominam na área profundidades da água de até 20 m (figura 5.88) uma característica que torna o aquífero Jandaíra mais vulnerável, notadamente devido à sua natureza cárstica.

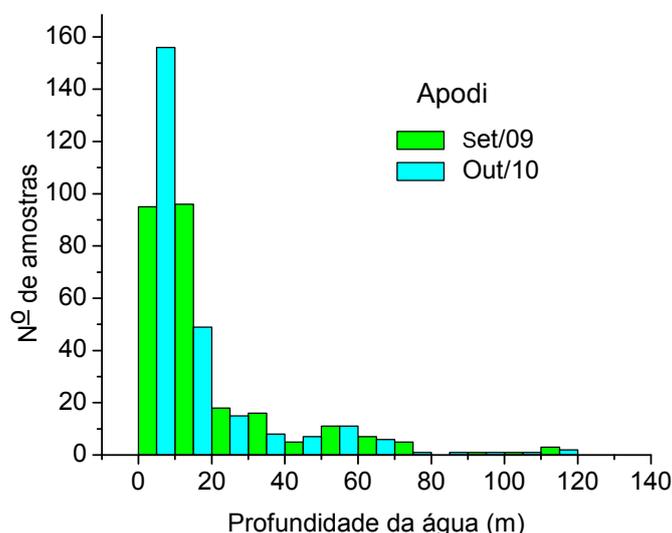
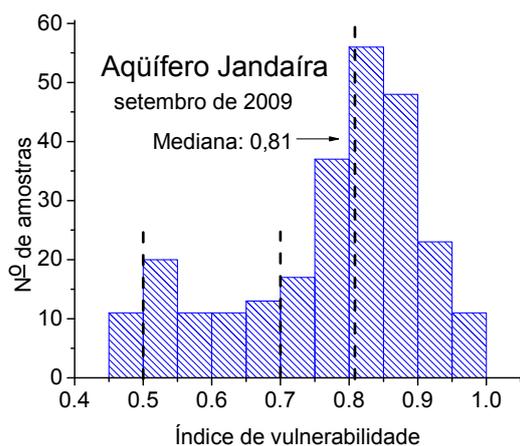


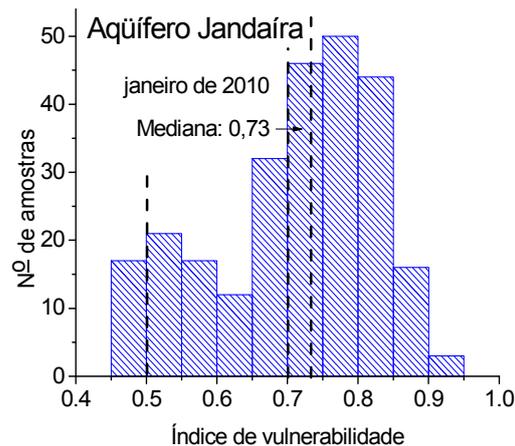
Figura 5.88 - Número de amostras por profundidade do nível de água.

Os histogramas da figura 5.89 apresentam os índices de vulnerabilidade medidos em 200 locais, calculados com dados de set/09 e de jan/10; eles mostram que a vulnerabilidade do aquífero Jandaíra varia espacialmente, em função da condição de aquífero cárstico e no tempo em função da mudança de período seco para chuvoso, pelo processo de recarga que eleva o nível de água.

Os histogramas mostram que nas duas medidas predominam áreas com índice de vulnerabilidade $> 0,7$ que caracteriza extrema vulnerabilidade, ou seja, vulnerável a muitos poluentes e com rápido impacto. Os valores dos índices de vulnerabilidade avaliados com os dados de set/09 e jan/10 estão apresentados na tabela A5.12.



(a)



(b)

Figura 5.89 - Histogramas de Índice de Vulnerabilidade em set/09 e jan/10 (> 0,7 vulnerabilidade extrema, > 0,5 a 0,7 vulnerabilidade alta e > 0,3 a 0,5 vulnerabilidade média).

O mapa de vulnerabilidade natural do aquífero Jandaíra é apresentado na **figura 5.90**. Em consonância com a natureza cárstica desse aquífero o mapa revela um predomínio da extrema vulnerabilidade.

5.12 – Mapa de risco de contaminação do aquífero Jandaíra

Na elaboração do mapa de risco de contaminação do aquífero Jandaíra (**figura 5.91**) a área do projeto foi discretizada em 33 diferentes células de 85,5 km² (9 km x 9,5 km). Adotou-se como critério para definir o índice de risco o número de fontes potenciais de poluição cadastradas em cada uma das referidas células e o respectivo índice de vulnerabilidade da célula, como mostrado na **tabela 5.34**. Do produto do índice de vulnerabilidade pelo número de fontes de poluição em cada célula, resulta o índice de risco na célula.

Tabela 5.34 – Valor numérico do índice de risco com base na vulnerabilidade natural e no número de fontes potenciais de poluição cadastradas em 2009.

Índice de Vulnerabilidade	Vulnerabilidade	Número de Fontes potenciais de contaminação	Índice de Risco	Risco
$0 < x \leq 0,1$	Insignificante	$0 < x \leq 1$	$0 < x \leq 0,1$	Muito baixo
$0,1 < x \leq 0,3$	Baixa	$1 < x \leq 3$	$0,1 < x \leq 0,9$	Baixo
$0,3 < x \leq 0,5$	Moderada	$3 < x \leq 5$	$0,9 < x \leq 2,5$	Médio
$0,5 < x \leq 0,7$	Alta	$5 < x \leq 7$	$2,5 < x \leq 4,9$	Alto
$0,7 < x \leq 1$	Extrema	$x > 7$	$x > 4,9$	Muito alto

O mapa de risco de contaminação depende essencialmente da presença de fontes potenciais de poluição e reflete a situação revelada pelo cadastro dessas fontes no ano de 2009.

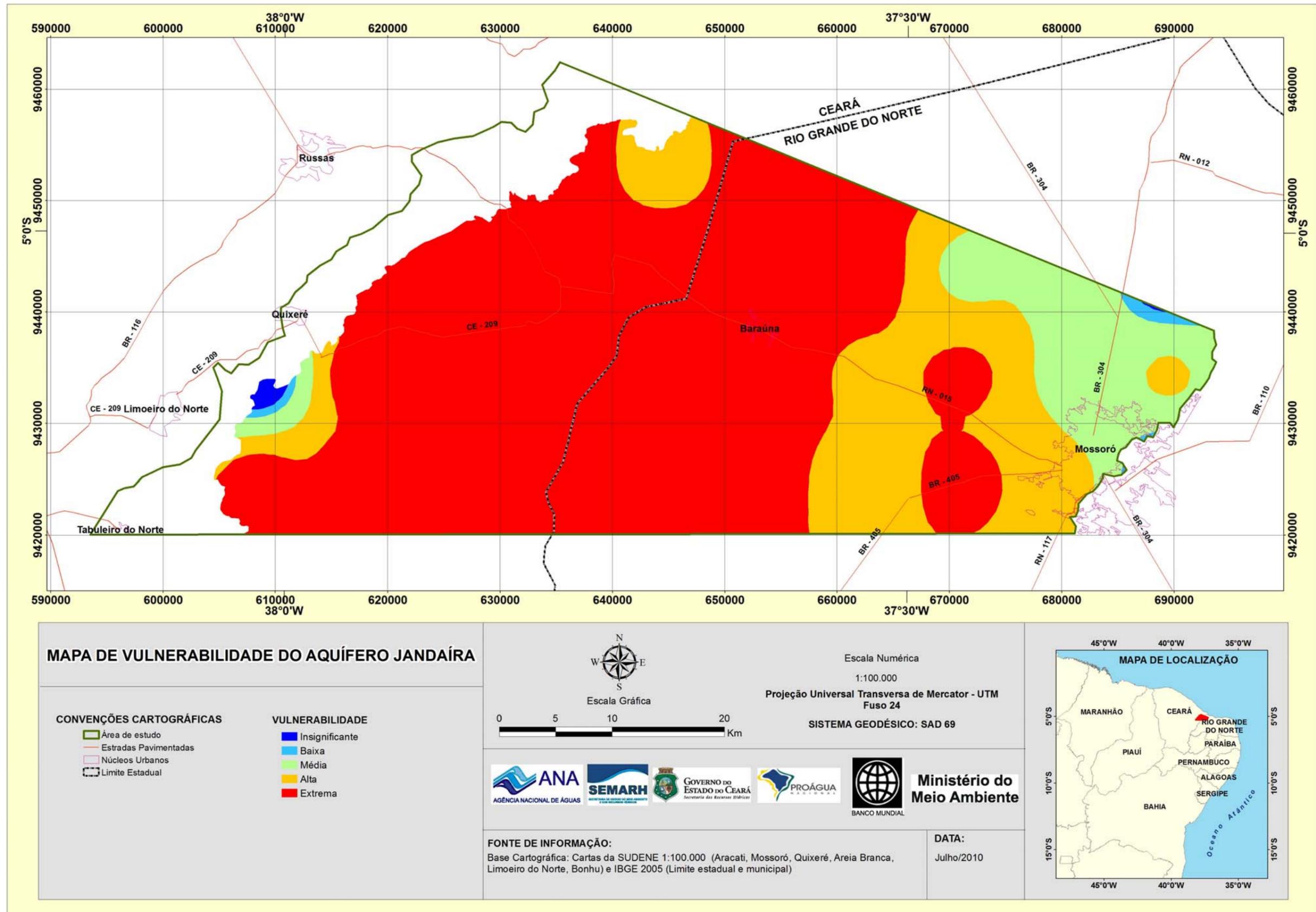


Figura 5.90 - Mapa de vulnerabilidade natural do aquífero Jandaíra à contaminação em 2009.

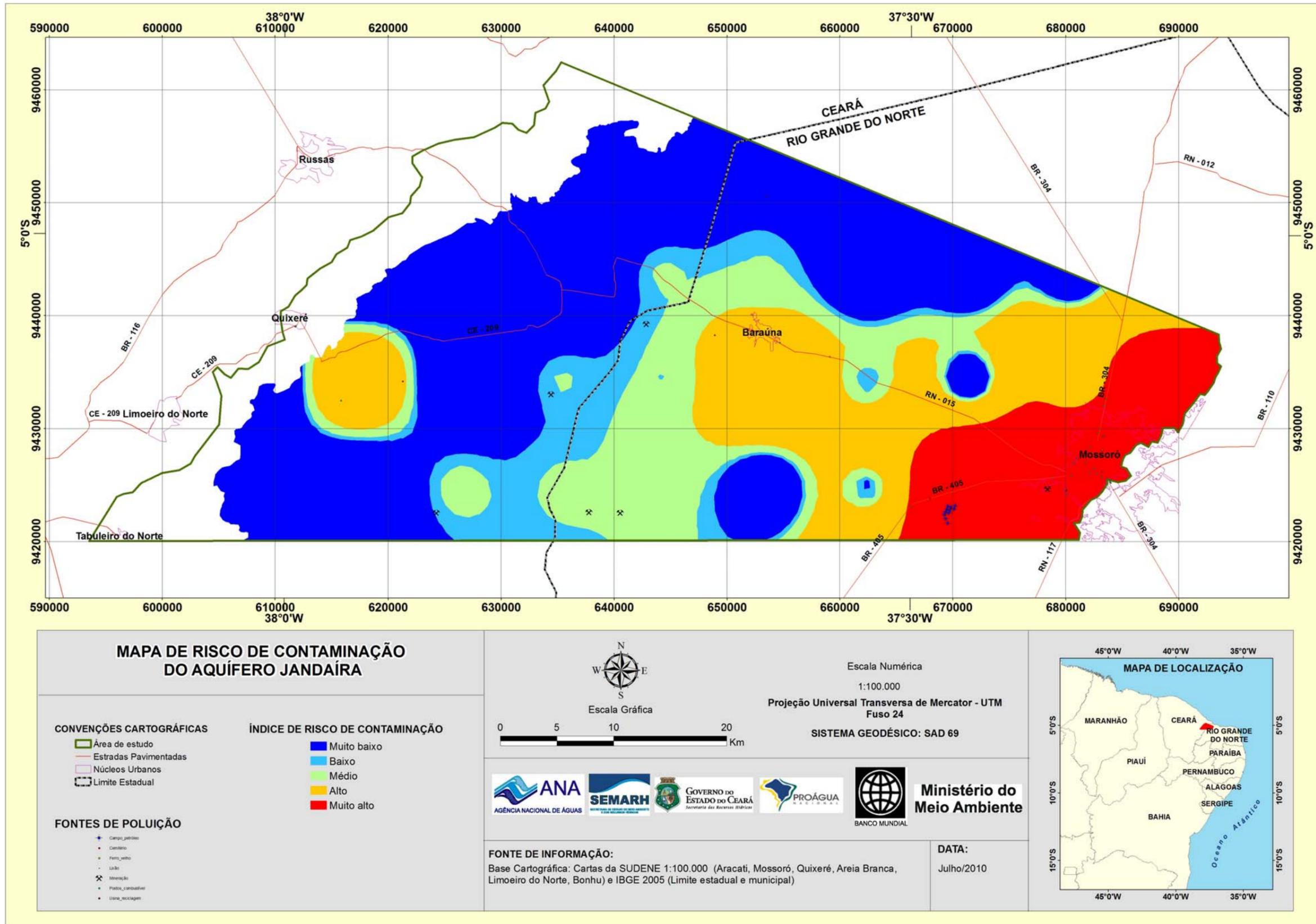


Figura 5.91 - Mapa do risco de contaminação no aquífero Jandaíra em 2009.

5.13 – Recomendações

É recomendável:

- Monitorar a presença de resíduos de agrotóxicos com mais de duas coletas anuais no aquífero Jandaíra na área irrigada.
- Datar as águas com carbono-14 as águas do aquífero Açú para identificar a velocidade de fluxo e a razão de mistura de água recente com paleoágua.
- Identificar a presença de folhelhos o que permitirá mais precisa determinação do índice de vulnerabilidade.
- Monitorar com sensor de nível e condutividade elétrica, a intrusão de água salgada produzida pela maré através do Vale do Apodi. O objetivo é caracterizar os mecanismos de variação de nível e de salinidade da água subterrânea e avaliar os parâmetros hidráulicos associados com fluxo e transporte de solutos no meio aquífero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appelo, C.A.J. & Postma, D. 1999. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Ed. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- APHA (American Public Health Association). 1992. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 18, ed, AWWA –WPCP.
- APHA (American Public Health Association). 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20, ed, AWWA –WPCP.
- APHA (American Public Health Association) 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21, ed, AWWA –WPCP.
- Araripe, P.T. & Feijó, F.P. 1994. Bacia Potiguar. *Boletim Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v.8,n.1, p.127-141.
- Barlow, P.M. & Reichard, E.G. 2010. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal*. 18 (1):247-260.
- Batu, V. 1998. *Aquifer Hydraulics. A comprehensive guide to hydrogeologic data analyses*. John Wiley & Sons, Inc. 727 p.
- Bezerra, M.A. 1980. Captação de Mossoró. Poço P12A – Hotel Thermas. PETROBRAS 9-MO-13-RN. PLANAT-CAERN. Relatório Técnico, 28p.
- Bevilaqua, G.A.P.; Silva Filho, P.M. & Possenti, J.C. 2002. Aplicação foliar de cálcio e boro e componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja. *Ciência. Rural*, vol.32 nº.1.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). 2005. *Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*, 4 p.
- COGERH. 2009. *Monitoramento e gestão dos aquíferos da Bacia Potiguar, Estado do Ceará*.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). 2005. Resolução 357 de 17/03/2005. *Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*, 23 p.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). 2008 Resolução 396 de 03/04/2008, *Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências*, 11 p.
- Corseuil, H.X. & Alvarez, P. 1996. Implications of the presence of ethanol on intrinsic bioremediation of BTEX plumes in Brazil. *Hazardous materials*, 13 (2): 213-221.
- Craig, H. 1961a. Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in natural Waters, *Science*. v,133 n. 3467, p.1633 – 1834.
- Craig, H. 1961b. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*. v.133, n.3465, p.1702 – 1703.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2010. *Toxicidade dos agrotóxicos*.

- FNS (Fundação Nacional de Saúde). 1999. Manual Técnico de Análise de Água para Consumo Humano. Brasília, 211p.
- Foster, S. & HIRATA, R. 1991. Determination del riesgo de contaminación de águas subterrâneas – Uma metodologia basada em dados existentes. 2ed. Lima, Peru CEPIS/OMS. 81p.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; Délia, M. & Paris, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: SERVIMAR (Serviços Técnicos Ambientais), 114p.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall. 604p.
- Frischkorn, H.; Santiago, M.F. & Torquato, J.R. 1988. Dados isotópicos e hidroquímicos da porção oriental da bacia Potiguar. IN: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 5. Anais. p.144-154.
- Hantush, M.S. & Jacob, C.E. 1955. Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions American Geophysical Union*, v.36, n.1, p.95-100.
- Hantush, M.S. 1960. Modification of the theory of leaky aquifer. *Journal of Geophysical Research* v.65,n.5,p.1627-1629.
- Hem, J.D. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *US Geological Survey Water Supply Paper* 2254, 263p.
- Hoekstra, E. J.; Deweerdt, H.; De Leer, W. B. & Brinkman, U.A.T. 1999. *Environmental Science Technology*, 33, 2543-2549.
- Hoffmann, F.L. 2001. Fatores limitantes à proliferação de microorganismos em alimentos. *Brasil Alimentos* - n° 9.
- ITAI – Estudos, Projetos e Perfurações Ltda. 2001. Perfuração e completação de um poço tubular profundo de 600 m, para o sistema de abastecimento de água da cidade de Baraúna – RN. CAERN.
- Krauskopf, K.B. 1972. Introdução à Geoquímica. Tradução de M. Lando e P.S.C. Bogus. Ed. USP, v.1, 94p.
- Landon, M.K.; Jurgens, B.C.; Katz, B.G.; Eberts, S.M.; Burow, K.R., & Krandal, C.A. 2010. Depth-dependent sampling to identify short-circuit pathways to public-supply wells in multiple aquifer settings in the United States. *Hydrogeology Journal* 18 (3): 577-593.
- Logan, J. 1965. Interpretação de análises químicas de água. USAID (US Agency for International Development). Recife.
- Manoel Filho, J. 1971. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste. Folha nº 10 Jaguaribe NE. SUDENE. DD. Série Hidrogeologia, 30. 342p. mapas.
- Manoel Filho, J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. Tese de doutoramento. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 218p.
- Manoel Filho, J.; Demetrio, J.G & Costa, W.D. 2003. Modelo numérico de fluxo do sistema aquífero Açú – Jandaíra. IN: “Diagnóstico da situação atual e possibilidades de ampliação da exploração de água subterrânea na zona oeste da Bacia Potiguar”. FUNCATE. FADE. UFPE. LABHID.

- Matias, G.D.V.; Silva, L.M.R., & Khan, A.S. 2003. Perfil dos produtores de frutas do município de Limoeiro do Norte – CE frente ao novo paradigma de desenvolvimento do setor. *Revista Ciência Agronômica*, v. 34, n.1.
- Matias, G.D.V.; Silva, L.M.R., & Khan, A.S. 2004. Reflexos de Políticas Públicas sobre a Fruticultura Cearense: o caso do Agropolo Baixo-Jaquaribe. *Revista de Economia e Agronegócios*, v. 2, n. 2.
- Metcalf & Eddy. 1991. *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal, Reuse*, 3rd Edition. Hill.
- MS (Ministério da Saúde). 2004. Portaria 518 de 25/03/2004, Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. 33p.
- OMS (Organização Mundial da Saúde). 1998. *Guias para a Calidad del Água Potable*. OMS, v3, 255p.
- Paradisi, S.; Simandi G.J.; MacIntyre, D. & Orris G.J. 1998. Sedimentary-Hosted, Stratiform Barite E17 Geological Fieldwork 1997, Paper 1998-I.
- Pessoa Neto, O.C. 2007. Litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.15, n.2, p.357-369.
- Pinheiro, J.C.V. & Lima, A.T. 2001. Valor econômico da água para irrigação: uma aplicação do método residual, Fortaleza/Ceará/Brasil.
- PLANAT – Consultoria em Recursos Naturais, 1979. Captação de Baraúna. Poço Tubular nº 2. CPRM 04 MO-15-RN. Relatório de Conclusão. CAERN.
- Poulsen, M.; Lemon, L. & Barker, J. 1992. Dissolution of Monoaromatic Hydrocarbons into Groudwater from Gasoline – Oxigente mistures. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 26, 2483-2489.
- Renard, P.; Glenz, D. & Mejias, M. 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal* **17**:589-600.
- Santiago, M.F.; Frischkorn, H.; Silva, C.M.S.V. 2008. Métodos Isotópicos, P, 255- 271, In: "Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações". CPRM.
- Schlag, S. & Mori, H. 2008. Minerais e produtos químicos de boro. <http://www.sriconsulting.com/CEH/Public/Reports/717.1000/> em 07.08.10.
- Suassuna, J. 1996. O processo de salinização das águas superficiais e subterrâneas no Nordeste do Brasil. Workshop "Impactos Ambientais Associados a Utilização de Águas Dessalinizadas no Semi-árido". Ministério do Meio Ambiente - Fortaleza, CE.
- USSLS (United States Salinity Laboratory Staff). 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Agriculture Handbook nº 60, L.A, Richards Edit, Washington, 159 p.
- www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.htm

