



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

MICHEL LOPES GRANJEIRO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA R-MODAL, Q-MODAL E *CLUSTER* NO ESTUDO DA
QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO AQUÍFERO JANDAÍRA NA
CHAPADA DO APODI**

FORTALEZA - CE

Março/2012

MICHEL LOPES GRANJEIRO

ANÁLISE ESTATÍSTICA R-MODAL, Q-MODAL E *CLUSTER* NO ESTUDO DA
QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO AQUÍFERO JANDAÍRA NA
CHAPADA DO APODI

Tese submetida à Coordenação do Curso de
Pós-Graduação em Física da Universidade
Federal do Ceará como requisito para a
obtenção de grau de Doutor em Física.

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria Marlúcia
Freitas Santiago

FORTALEZA-CE
Março/2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca do Curso de Física

-
- G788a Granjeiro, Michel Lopes
 Análise estatística R-modal, Q-modal e *cluster* no estudo da qualidade da
água
 subterrânea do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi ./ Michel Lopes
 Granjeiro – Fortaleza: [s.n], 2012.
 103 f. : Il.,color. , enc. ; 30 cm.

 Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
 Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação, Fortaleza, 2012.
 Área de Concentração: Física da Matéria Condensada.

 Orientação: Profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago

 1. Águas subterrâneas . 2. Aquífero --Jandaíra. I. Título.

CDD 531.49

Michel Lopes Granjeiro

**Análise estatística R-Modal, Q-Modal e Cluster no estudo da
qualidade da água subterrânea do aquífero Jandaíra na
Chapada do Apodi**

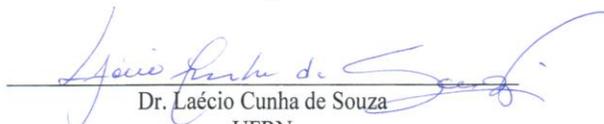
Tese submetida à Coordenação do Curso
de Pós-Graduação em Física, da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Doutor em Física.

Aprovada em 06/03/2012

BANCA EXAMINADORA


Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago - Orientadora
UFC


Dr. Plínio Barbosa de Camargo
ESALQ/USP


Dr. Laécio Cunha de Souza
UFRN


Dr. Horst Frischkorn
UFC


Dra. Carla Maria Salgado Vidal Silva
UFC

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Agradeço a Deus por ter me dado força para superar cada dificuldade que apareceu ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a. Dr.^a Maria Marlúcia Freitas Santiago, pela orientação segura e dedicada, pelo modo gentil e carismático com que sempre me tratou e pelo apoio incondicional durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Josué Mendes Filho, pela indispensável e valiosa colaboração para realização deste trabalho.

À coordenação de Pós-Graduação do Departamento de Física da UFC, na pessoa de seu coordenador, Prof. Paulo de Tarso Cavalcante Freire.

À Prof^a. Dr.^a Carla Maria Salgado Vidal Silva, pelo trabalho no Laboratório de Hidroquímica do Departamento de Física da UFC, onde foram efetuadas as análises químicas das amostras.

Ao Professor Dr. Horst Frischkorn pela disponibilidade que foi mostrada sempre que solicitado.

À técnica Maria do Carmo Germano (Carminha), do Laboratório de Carbono-14, pela convivência amigável e atenção demonstrada.

Aos professores do Departamento de Física que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial agradeço aos que de alguma maneira participaram na realização deste trabalho.

Às secretárias da Pós-Graduação Rejane Ramos Coelho e Ana Cleide Freire Sampaio pela presteza sempre que solicitadas.

Ao pessoal da Secretaria do Departamento de Física: Michele, Jailson, Creuza, Vera e Dona Luiza que sempre estiveram dispostos a me ajudar no que foi possível.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro através da bolsa a mim concedida.

À FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela disponibilidade de recursos financeiros para a infra-estrutura do Departamento de Física da UFC, utilizada neste trabalho.

Aos meus pais Orlaneudo e Jean Claudete, aos meus avôs paternos José e Maria e à minha avó materna Ana Granjeiro, principais responsáveis pela minha formação moral.

Aos meus tios Ozamy, Regino e Francisco e às minhas tias Neuza, Lina, Neuda, e em especial tia Meuda, pela ajuda financeira que me foi dada sempre que precisei.

Ao meu irmão Marcelo e à minha irmã Micheline que sempre estiveram ao meu lado nessa vitoriosa batalha. Aos meus primos Régis e Rafael e às minhas primas Kathleen, Ericka e Leila pelo carinho por mim demonstrado nas horas de lazer. À minha sobrinha, Ana Júlia e ao meu sobrinho João Pedro.

Aos meus eternos amigos da Graduação e da Pós Graduação: Damasceno, Júlio César, Rogelma, Sara, Luís Carlos, Erivelton, Luciana, Namor, Lucilene, Aparecida, José Silva, Nizomar. Minha sincera desculpa a quem eu tenha esquecido.

Aos amigos Evaldo, Wellington, Bastinho, Ricardo, Ronny, Airton, Denise Lorena, Janice, Kerlianne, Felipe. Perdão a quem tenha esquecido.

RESUMO

Análise de 15 parâmetros hidroquímicos em águas subterrâneas do aquífero Jandaíra, na Bacia Potiguar, foi realizada em dois conjuntos de poços amostrados, o primeiro com 97 amostras no período seco e o segundo com 80 no início do período chuvoso. Os poços estão localizados nos municípios de Baraúna e Mossoró, no Estado do Rio Grande do Norte e nos municípios de Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte, no Estado do Ceará. O tratamento estatístico dos dados de cada coleta feito com a Análise Fatorial R-modal permitiu identificar os processos responsáveis pela presença dos sais nas águas. No período seco, o Fator 1 indicou a importância dos aerossóis de origem marinha, principalmente pelas concentrações de cloretos e de sódio, e a influência litológica pela dureza. O Fator 2 indicou dissolução de rochas calcárias, mostrada pela presença do bicarbonato e do pH. No período chuvoso, o Fator 1 também reflete a influência dos aerossóis e da dureza, mas o Fator 2 considera somente o bicarbonato, indicando recarga no aquífero. Nas duas simulações, o domínio de uma única variável nos outros fatores indica mistura de diferentes tipos de água e revela uma leve ação antrópica. A Análise Q-modal feita com todos os poços, indicou como grupo melhor correlacionado o dos poços do município de Baraúna, representado pelo Fator 1, seguido pelos poços de Mossoró, representados pelo Fator 2. A Análise *Cluster* complementou a Análise Q-modal e permitiu associar os poços em grupos, indicando uma conectividade entre eles ou uma recarga por água semelhante. Essa análise mostrou equivalência entre o Primeiro Grupo e o Fator 1 da Análise Q-modal e o Segundo Grupo e o Fator 2 da Análise Q-modal. O Primeiro e o Segundo Grupo têm mais poços no período seco do que no chuvoso quando a recarga contribui para mistura com água de composição diferente da água do aquífero.

Palavras-chave: Análise estatística; Água subterrânea; Aquífero Jandaíra.

ABSTRACT

Analyses of 15 hydrochemical parameters in groundwater from the Jandaíra aquifer of the Potiguar Basin were performed on two sets of wells, one with 97 wells sampled in the dry season and the other one with 80 wells sampled at the beginning of the rainy season. The wells are located in the townships of Baraúna and Mossoró, in the State of Rio Grande do Norte, and in Jaguaruana, Quixeré, and Limoeiro do Norte, in the State of Ceará. Statistical treatment of data from each sampling applying R-modal Factor Analysis allowed to identify the processes responsible for the presence of minerals in the waters. During the dry season, Factor 1 indicates the importance of marine aerosol, mainly through the concentrations of chloride and sodium, and lithological influence through hardness. Factor 2 indicates dissolution of limestone, evidenced by the presence of bicarbonate and pH. In the rainy season, Factor 1 also reflects the influence of aerosol and hardness, but Factor 2 considers bicarbonate only, indicating recharge to the aquifer. In both simulations, the predominance of a single variable in the other factors indicates mixing of different water types and also reveals slight human impact. Q-modal Analysis done with all wells indicates as the group best correlated the wells of Baraúna, represented by Factor 1, followed by wells of Mossoró, represented by Factor 2. Cluster Analysis complemented Q-modal Analysis and allows to associate wells in groups, indicating a hydraulic connection between them or recharge through similar water. This analysis reveals equivalence between the First Group and Factor 1 of Q-modal Analysis and of the Second Group and Factor 2 of Q-modal Analysis. The First and Second Groups comprise more wells in the dry season than in the rainy one, when recharge contributes to mixing with water of different composition than that in the aquifer.

Keywords: Statistical analysis; Groundwater; Jandaíra Aquifer

SUMÁRIO

1– INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Relevância do tema.....	1
1.2 – Objetivos.....	1
1.2.1 – Objetivo Geral	1
1.2.2 – Objetivos Específicos.....	2
1.3 – Revisão bibliográfica.....	2
2– ÁREA DE ESTUDO.....	4
3– PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS.....	7
3.1 – Propriedades fisico-químicas.....	8
3.1.1 – Temperatura.....	9
3.1.2 – Condutividade elétrica.....	9
3.1.3 – Dureza.....	10
3.1.4 – pH.....	10
3.1.5 – Alcalinidade.....	11
3.1.6 – Sólidos totais dissolvidos.....	12
3.2 – Constituintes iônicos principais.....	12
3.2.1- Cálcio.....	12
3.2.2- Magnésio.....	13
3.2.3- Sódio.....	13
3.2.4- Potássio.....	14
3.2.5- Cloretos.....	14
3.2.6- Sulfatos.....	15

3.2.7- <i>Bicarbonatos e carbonatos</i>	15
3.2.8- <i>Amônio, nitrito e nitrato</i>	16
3.2.9- <i>Ferro</i>	17
3.3- <i>Tratamento dos dados hidroquímicos</i>	18
3.3.1- <i>Diagrama triangular de Piper</i>	18
3.3.2- <i>Classificação das águas</i>	19
4- <i>METODOLOGIA</i>	20
4.1 – <i>Análises Hidroquímicas</i>	20
4.2 – <i>Estatística básica</i>	21
4.3 – <i>Análise Fatorial</i>	24
4.4 – <i>Análise fatorial R-modal</i>	27
4.5 – <i>Análise fatorial Q-modal</i>	29
4.6 – <i>Análise Cluster</i>	30
5- <i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>	33
5.1 – <i>Análise fatorial R-modal</i>	51
5.2- <i>Análises gráficas</i>	63
5.3 – <i>Análise fatorial Q-modal</i>	70
5.4 - <i>Análise de Grupo (Cluster)</i>	79
6- <i>CONCLUSÕES</i>	93
7- <i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pluviometria do ano de 2008 nos municípios Baraúna, Mossoró, Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte.....	5
Figura 2.2 – Mapa de localização dos pontos de coleta de águas subterrâneas no calcário Jandaíra.....	6
Figura 3.1 – Esquema de um diagrama Piper para a classificação das águas.....	19
Figura 4.1 – Modelo de um dendograma com possíveis grupos.....	32
Figura 5.1 - Projeção dos centróides de cada parâmetro no espaço bidimensional dos fatores 1 e 2.....	56
Figura 5.2 - Contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores, Fator 1 e Fator 2.....	57
Figura 5.3 - Projeção dos centróides de cada parâmetro no espaço bidimensional dos fatores 1 e 2.....	62
Figura 5.4 - Contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores, Fator 1 e Fator 2.....	63
Figura 5.5 - Condutividade elétrica versus concentração de cálcio em amostras de água do calcário Jandaíra.....	64
Figura 5.6 - Condutividade elétrica versus concentração de magnésio em amostras de água do aquífero calcário Jandaíra.....	64
Figura 5.7 - Condutividade elétrica versus concentração de sódio em amostras de água do calcário Jandaíra.....	65
Figura 5.8 - Condutividade elétrica versus concentração de potássio em amostras de água do calcário Jandaíra.....	65
Figura 5.9 - Condutividade elétrica versus concentração de cloretos em amostras de água do calcário Jandaíra.....	66
Figura 5.10 - Concentração de bicarbonatos versus pH em amostras de água do calcário Jandaíra.....	67
Figura 5.11 - Concentração de cálcio versus concentração de bicarbonatos em amostras de água do calcário Jandaíra.....	67

Figura 5.12- Concentração de magnésio versus concentração de bicarbonatos em amostras de água do calcário Jandaíra.....	68
Figura 5.13- Concentração de sódio versus concentração de cloreto em amostras de água do calcário Jandaíra.....	69
Figura 5.14- Percentuais de poços que contribuem para a formação dos Fatores 1 e 2 da Análise Fatorial Q-Modal utilizada em amostras coletadas em setembro de 2009 e janeiro de 2010.....	78
Figura 5.15- Dendograma de dissimilaridade das águas do Aquífero Jandaíra com amostras coletadas em setembro de 2009.....	80
Figura 5.16- Principal Grupo (Grupo 1) e Segundo Grupo (Grupo 2) obtidos com a análise <i>Cluster</i> nas amostras coletadas em setembro de 2009.....	81
Figura 5.17- Diagrama de Piper para o Principal Grupo com amostras de setembro de 2009.....	83
Figura 5.18- Diagrama de Piper para o Segundo Grupo com amostras de setembro de 2009.....	84
Figura 5.19- Dendograma de dissimilaridade das águas do Aquífero Jandaíra para amostras coletadas em janeiro de 2010.....	85
Figura 5.20- Principal Grupo (Grupo 1) e Segundo Grupo (Grupo 2) obtidos com a análise <i>Cluster</i> nas amostras coletadas em janeiro de 2010.....	86
Figura 5.21- Diagrama de Piper para o Primeiro Grupo com amostras de janeiro de 2010.....	88
Figura 5.22- Diagrama de Piper para o Segundo Grupo com amostras de janeiro de 2010.....	89
Figura 5.23- Percentuais de poços que pertencem ao Primeiro Grupo e ao Segundo Grupo da Análise <i>Cluster</i> utilizada em amostras coletadas em setembro de 2009 e janeiro de 2010.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação das águas quanto ao grau de dureza.....	10
Tabela 3.2 – Valores máximos permitidos (VMP) de acordo com o Ministério da Saúde.....	19
Tabela 4.1 – Modelo de uma matriz de correlação entre variáveis.....	27
Tabela 4.2 – Exemplo de uma matriz com os dados no Excel para uma Análise Fatorial R- modal	30
Tabela 4.3 – Exemplo de uma matriz com os dados no Excel para uma Análise Fatorial Q-modal.....	30
Tabela 4.4 – Exemplo de uma matriz com os dados no Excel para uma Análise <i>Cluster</i>	31
Tabela 5.1 - Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Baraúna coletadas em setembro de 2009.....	33
Tabela 5.2 - Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Baraúna coletadas em janeiro de 2010.....	35
Tabela 5.3 - Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Mossoró coletadas em setembro de 2009.....	36
Tabela 5.4 - Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Mossoró coletadas em janeiro de 2010.....	37
Tabela 5.5 - Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Jaguaruana coletadas em setembro de 2009.....	38
Tabela 5.6 - Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Jaguaruana coletadas em janeiro de 2010.....	38

Tabela 5.7- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Quixeré e Limoeiro do Norte coletadas em setembro de 2009.....	39
Tabela 5.8- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Quixeré e Limoeiro do Norte coletadas em janeiro de 2010.....	40
Tabela 5.9- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Baraúna em setembro de 2009.....	41
Tabela 5.10- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Baraúna em janeiro de 2010.....	43
Tabela 5.11- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Mossoró em setembro de 2009.....	45
Tabela 5.12- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Mossoró em janeiro de 2010.....	47
Tabela 5.13- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Jaguaruana em setembro de 2009.....	48
Tabela 5.14- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Jaguaruana em janeiro de 2010.....	48
Tabela 5.15- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Quixeré e Limoeiro do Norte em setembro de 2009.....	49
Tabela 5.16- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Quixeré e Limoeiro do Norte em janeiro de 2010.....	50
Tabela 5.17- Matriz de correlação entre as variáveis estudadas, com amostras coletadas em setembro de 2009.....	52
Tabela 5.18- Fatores, autovalores, variância e percentual acumulativo da variância obtida para o conjunto de dados de setembro de 2009.....	53

Tabela 5.19- Matriz de cargas dos fatores extraídos após a rotação Varimax com amostras de setembro de 2009.....	54
Tabela 5.20- Matriz de correlação entre as variáveis estudadas, com amostras coletadas em janeiro de 2010.....	58
Tabela 5.21- Fatores, autovalores, variância e percentual acumulativo da variância obtida para o conjunto de dados de janeiro de 2010.....	59
Tabela 5.22- Matriz de cargas dos fatores extraídos após a rotação Varimax com amostras de janeiro de 2010.....	60
Tabela 5.23- Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de setembro de 2009.....	70
Tabela 5.24- Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de janeiro de 2010.....	73
Tabela 5.25- Resultados da Análise Fatorial Q-modal realizada em amostras de água do calcário Jandaíra.....	77
Tabela 5.26- Correspondência entre as amostras e os números mostrados no dendograma da figura 5.16.....	81
Tabela 5.27- Valores médios de nove parâmetros hidroquímicos com amostras do Primeiro Grupo e Segundo Grupo coletadas em setembro de 2009.....	82
Tabela 5.28- Correspondência entre as amostras e os números mostrados no dendograma da Figura 5.19.....	87
Tabela 5.29- Valores médios de nove parâmetros hidroquímicos com amostras do Primeiro Grupo e Segundo Grupo coletadas em janeiro de 2010.....	88
Tabela 5.30- Comparação entre a Análise Fatorial Q-modal e a Análise de Grupo (<i>Cluster</i>).....	90

1- INTRODUÇÃO

1.1- Relevância do tema

Devido à sua posição geográfica e ao clima semi-árido, as águas encontradas nos Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, em geral, têm problemas tanto de quantidade como de qualidade. As precipitações pluviométricas na região são praticamente limitadas aos cinco primeiros meses do ano e a chuva é distribuída de maneira irregular tanto em relação ao tempo quanto ao espaço.

Devido ao fenômeno das secas que assolam o Nordeste do Brasil, as águas subterrâneas são uma importante alternativa ao abastecimento da população, merecendo uma maior atenção no que se refere ao planejamento, uso e proteção desses importantes recursos.

Com este trabalho, pretende-se dar uma contribuição sobre a dinâmica da qualidade da água subterrânea na Chapada do Apodi, uma vez que a mesma é hoje um grande pólo de fruticultura irrigada, produzindo especialmente banana e melão para todo o Brasil, além de outros países.

Para alcançar os objetivos desse trabalho, foi realizada uma etapa de coleta de amostras no período seco, em setembro de 2009, e outra no início do período chuvoso, em janeiro de 2010. Em todas as amostras foram realizadas análises de parâmetros físico-químicos (condutividade elétrica, pH e dureza) e hidroquímicos (concentração dos íons de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- e Fe). O conjunto de dados obtido foi submetido às análises fatoriais R-modal, Q-modal e *Cluster*.

Para o estudo do comportamento do sistema aquífero, foi utilizado o programa computacional WinStat para Análise Fatorial, no tratamento de um grande volume de dados hidroquímicos, permitindo interpretar os processos hidrogeoquímicos.

Este trabalho, constituído por sete capítulos, foi desenvolvido com dados do Programa Nacional de Desenvolvimento dos Recursos Hídricos- Proágua Nacional: “Avaliação dos recursos hídricos e proposição de modelo de gestão compartilhada para os aquíferos da Chapada do Apodi entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará”.

1.2 - Objetivos

1.2.1 - Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral a avaliação hidrogeoquímica da água subterrânea da Chapada do Apodi através de duas coletas de água nos municípios de Quixeré, Limoeiro do Norte e Jaguaruana, localizados no Estado do Ceará e nos municípios de Mossoró e Baraúna, no Estado do Rio Grande do Norte, utilizando medidas hidroquímicas nas amostras de água subterrânea e técnicas estatísticas como as Análises Fatorial R-modal, Q-modal e *Cluster*, no grande conjunto de dados.

1.2.2 - Objetivos Específicos

São objetivos deste trabalho:

- Analisar os parâmetros hidroquímicos e físico-químicos a fim de identificar a qualidade das águas armazenadas na Chapada do Apodi;
- Avaliar o comportamento destes parâmetros em duas coletas (uma no período seco de 2009 e outra no início do período chuvoso de 2010) para identificar possíveis variações na qualidade das águas armazenadas.
- Utilizar técnicas estatísticas, Análises Fatorial R-Modal, Q-Modal e Análise de Grupo com a finalidade de identificar possíveis relações entre as diversas variáveis do sistema (parâmetros hidroquímicos e físico-químicos) e entre os objetos (poços) estudados para obter informação sobre o sistema aquífero estudado.

1.3- Revisão Bibliográfica

Análise fatorial está sendo aplicada em muitas áreas de pesquisa destacando-se na Hidrologia, dentre outros, os trabalhos com o objetivo de identificar:

- (a) Áreas de recarga no sistema aquífero Floridan, localizado na Flórida, Estados Unidos (Lawrence e Upchurch, 1982);
- (b) Contaminação do sistema aquífero Ayamonte-Huelva, na província Huelva, na Espanha (Grande et al., 1996); a influência de um aterro sanitário e de efluentes domésticos nas águas superficiais do Rio Tarumã e seus afluentes, localizados em Manaus, Brasil (Santos et al., 2006);
- (c) Evolução hidroquímica da água subterrânea da província de Karnataka, na Índia (Reghunath et al., 2002);
- (d) Qualidade da água subterrânea numa área contaminada de Taiwan (Liu et al., 2003); a concentração de metais pesados da lagoa Mirim, situada na fronteira entre Brasil e Uruguai (Santos et al., 2003); o nível de radioatividade natural ao longo da Bacia do rio Gediz, na Turquia (Bakaç e Kumru, 2001; Bakaç, 2004); a qualidade da

água subterrânea do aquífero Deltaic Plain Sands de Warry, localizado na Nigéria (Olobaniyi e Owoyemi, 2006);

A qualidade da água subterrânea na região compreendida pelo Graben do Crato-Juazeiro, na Bacia Sedimentar do Araripe, localizada no sul do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Machado, 2005); a qualidade das águas subterrâneas armazenadas em Dunas, Paleodunas, Formação Barreiras e Complexo Migmatítico em áreas da região metropolitana de Fortaleza, no Nordeste do Brasil (Fernandes, 2007);

(e) Efeitos das marés altas e de ações antrópicas na região costeira Cuddalore, Tamil Nadu, na Índia (Senthilkumar et al., 2008);

(f) Hidrogeoquímica do maior e mais importante sistema aquífero terciário português, o Tejo-Sado (Medonça et al., 2004); a hidrogeoquímica do sistema aquífero do Alto Cristalino de Salvador, Estado do Bahia (Nascimento et al., 2008); o comportamento hidrogeoquímico das águas subterrâneas do aquífero aluvionar da Bacia Hidrográfica do rio Macaé, no Estado do Rio de Janeiro (Bento, 2006); a utilidade destas técnicas, aplicando-as aos aquíferos Milk River, localizado em Alberta, no Canadá e São Pedro River, localizado no Arizona, Estados Unidos (Usunoff e Guzmán-Guzmán, 1989); o comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras localizado em Belém, no Estado do Pará, Norte do Brasil (Cabral e Lima, 2006); o Sistema Aquífero Guarani (SAG) e o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), localizados na região nordeste do Rio Grande do Sul (Betiollo, 2006).

(g) Fenômeno da intrusão marinha e seus impactos na qualidade da água em função da litologia e dos mecanismos presentes na restinga de Piratininga, no município de Niterói, Estado do Rio de Janeiro (Cruz et al., 2006);

2- ÁREA DE ESTUDO

Características da área estudada, a do aquífero Cárstico Jandaíra, localizado na Chapada do Apodi, estão descritas neste capítulo.

A segunda maior reserva de água subterrânea do Estado do Ceará encontra-se na Chapada do Apodi, na porção leste desse Estado, na divisa com o Rio Grande do Norte. Geograficamente, o aquífero Jandaíra se estende aos municípios de Limoeiro do Norte, Quixeré, Tabuleiro do Norte, e Alto Santo, no Ceará, e aos municípios de Baraúna, Dix-Sept Rosado, Felipe Guerra e Apodi, no Estado do Rio Grande do Norte.

A Chapada do Apodi pertence à Bacia Potiguar e dista cerca de 200 km de Fortaleza, estando quase totalmente inserida no Estado do Rio Grande do Norte, tendo uma pequena área no Estado do Ceará.

A estratigrafia da bacia, em sua porção emersa, é representada da seguinte maneira: na base pelo arenito Açú, e no topo, pelo calcário da Formação Jandaíra, ocorrendo em quase todo o domínio da Bacia Potiguar.

O tipo de solo encontrado na Chapada do Apodi torna a área potencialmente importante para atividade agrícola irrigada, sendo iniciada na área do Ceará utilizando água superficial do Rio Jaguaribe, perenizado pelas águas do açude Orós, e depois expandida com a captação das reservas subterrâneas armazenadas principalmente no calcário Jandaíra.

Esta atividade teve início no final da década de 1980 através de um projeto do Governo Federal, denominado Projeto Jaguaribe – Apodi, da FAPIJA (Federação das Associações do Perímetro Irrigado Jaguaribe-Apodi) e da Secretaria do Desenvolvimento Local e Industrial do Estado do Ceará, sendo a FAPIJA, com sede em Limoeiro do Norte, responsável pela administração, organização, operação e manutenção da infra-estrutura de irrigação do perímetro irrigado.

O Perímetro Irrigado Jaguaribe-Apodi foi implantado em 1987 e os serviços de administração, manutenção da infra-estrutura de uso comum começaram em 1989. Além do perímetro irrigado, outras atividades como fruticultura irrigada na região iniciaram a partir de 1996.

Além da boa qualidade do solo, a existência de sol o ano inteiro, a disponibilidade de água do Rio Jaguaribe e de água subterrânea e o uso de tecnologia adequada acabam por tornar a produção agrícola bastante satisfatória, sendo o

município de Limoeiro do Norte o maior exportador de melão e o segundo maior exportador de abacaxi (MATIAS et al., 2003).

A continuidade do Programa de Agricultura Irrigada depende fortemente dos recursos hídricos tanto em quantidade como em qualidade, que variam com as condições climáticas anuais e com o uso das reservas.

As condições climáticas anuais na área estudada são irregulares e se caracterizam pela ocorrência de dois períodos: um chuvoso com máximos nos meses de março e abril e um período de estiagem com mínimos nos meses de outubro e novembro.

Em 2008, o período chuvoso foi de 6 (seis) meses (de janeiro a junho) e o período de estiagem também de 6 (seis) meses (de julho a dezembro), como mostra a figura 2.1, comportamento repetido no ano de 2009 .

A figura 2.2 mostra a área em estudo, bem como a localização dos poços de acordo com o cadastro da ANA, Agência Nacional de Águas.

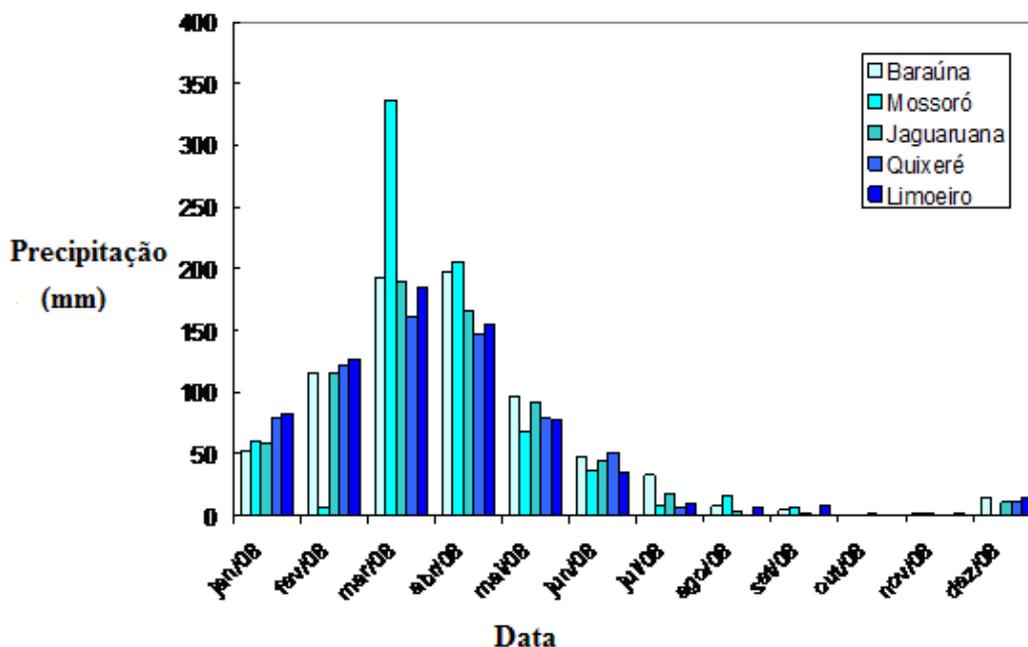


Figura 2.1- Pluviometria do ano de 2008 nos municípios Baraúna, Mossoró, Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte. (Fonte: FUNCEME, 2009).

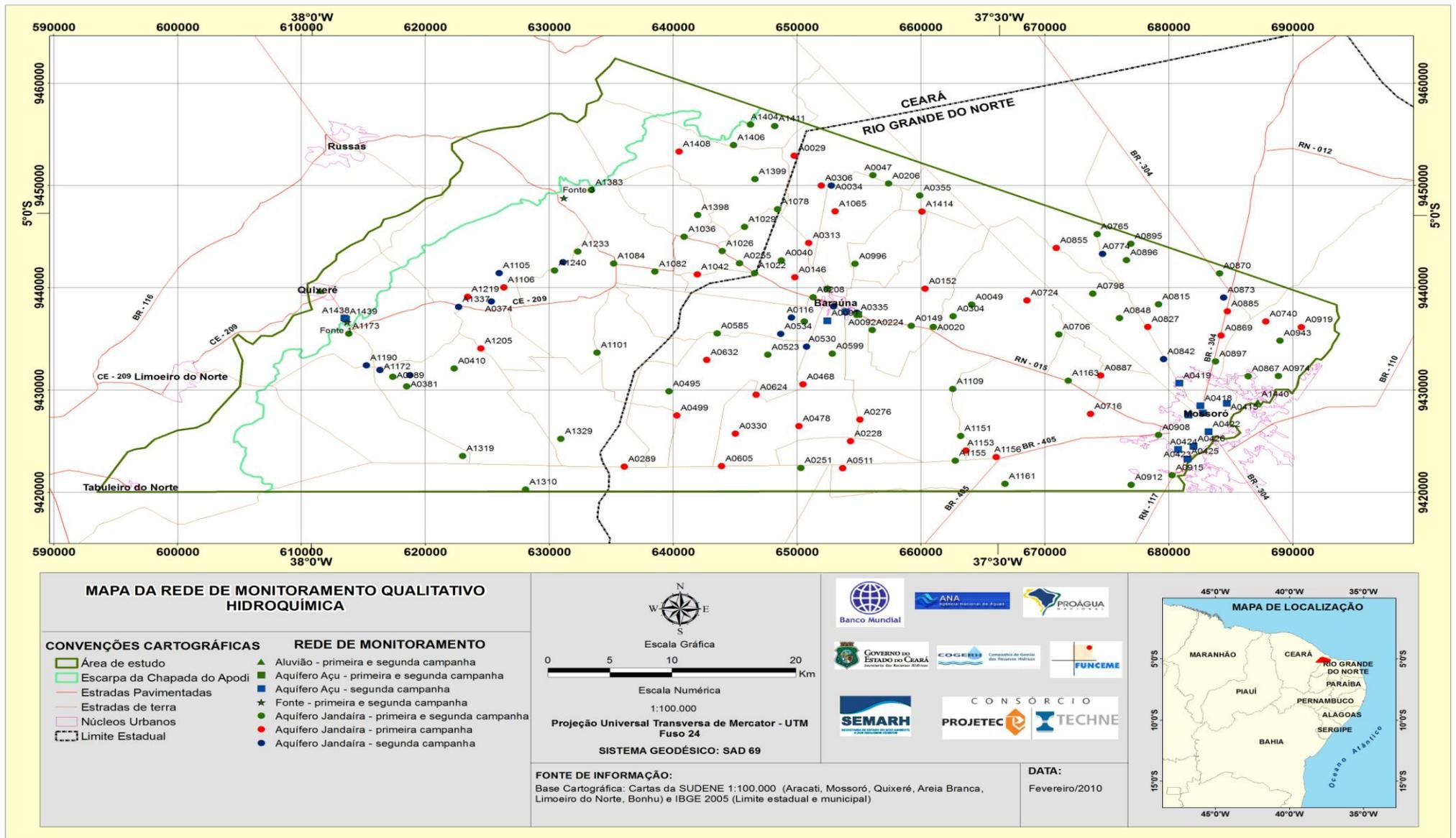


Figura 2.2- Mapa de localização dos pontos de coleta de águas subterrâneas no calcário Jandaíra (Proágua Nacional, 2010).

3. PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS

Neste capítulo é discutida a Hidrogeoquímica, sob aspectos das propriedades físico-químicas da água e os íons mais abundantes que nela podem estar dissolvidos. As discussões feitas aqui se baseiam principalmente nos trabalhos de Davis e De Wiest (1966), Richter e Netto (1991), Sales e Gouveia (1997), Logan (1965) e da FUNASA (2004).

A água é um solvente universal, capaz de incorporar grandes quantidades de substâncias ao entrar em contato com minerais constituintes dos solos e rochas nos quais circula. Por ser quimicamente muito ativa, tem grande facilidade de dissolver e reagir com outras substâncias orgânicas ou inorgânicas, que podem estar sob forma molecular ou iônica.

Ao se deslocar por entre os solos e as rochas, a água enriquece-se em sais minerais em solução, provenientes da dissolução das rochas, sendo esta uma das razões pelas quais as águas subterrâneas podem ter concentrações de sais superiores às das águas superficiais, sendo nestas a evaporação intensa o principal fator responsável pelo aumento da salinidade da água.

Em geral, a água subterrânea tende a apresentar aumento nas concentrações de substâncias dissolvidas à medida que percola os diferentes aquíferos. A qualidade da água é controlada por diversos fatores, tais como: clima da região, composição do solo, maneira como a água subterrânea circula entre os tipos de rochas, topografia da área, intrusão de água salina em zonas aquíferas costeiras, atividades humanas, interações do tipo água-solo e água-rocha, etc.

A partir desses fatores a interação entre a água superficial e a água subterrânea adjacente e a mistura de diferentes tipos de água subterrânea desempenham papel importante na determinação de sua qualidade (Reghunath et al. 2002).

A água contém naturalmente íons dissolvidos, sendo os mais abundantes: os cátions cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), sódio (Na^{+}) e potássio (K^{+}) e os ânions, cloreto (Cl^{-}), sulfato (SO_4^{-2}) e bicarbonato (HCO_3^{-}). Outros íons, como os de ferro e alumínio geralmente estão presentes naturalmente na água, mas em baixas concentrações.

A composição das rochas é um dos principais fatores responsáveis pela salinização das águas, mas existem processos que intervêm na concentração salina da água que são a evaporação, a dissolução, a troca de íons, a presença de aerossóis e a contaminação humana.

A evaporação atua principalmente em águas superficiais, que são a principal fonte de captação para uso domiciliar no Estado do Ceará. Elas têm como principal característica o aumento da concentração iônica por evaporação, mantendo a razão entre os íons.

Nas águas subterrâneas, as condições ambientais como clima, temperatura e pluviosidade são responsáveis pela dissolução das rochas, causando variação na concentração salina.

A adsorção química é fundamental para o processo de troca iônica quando um íon na rocha troca sua posição com outro íon dissolvido na água, modificando a razão entre os íons.

Os aerossóis também contribuem para a salinização das águas, sendo formados por poeiras continentais, exalações industriais e vulcânicas, poluição em geral e sais oceânicos constituídos principalmente pelos íons Cl^- e Na^+ (EISENREIZH, 1981).

Os aerossóis são transportados pelos ventos em altas regiões atmosféricas, sendo capazes de modificar a composição química das águas e regiões longe da costa. A composição varia rapidamente das áreas costeiras para o interior dos continentes, onde os elementos de origem marinha são substituídos por elementos de origem continental, dependendo de vários fatores, entre eles a interceptação pela vegetação, a intensidade e direção dos ventos.

3.1- Propriedades físico-químicas

As propriedades físico-químicas da água definem o comportamento e condições das águas subterrâneas. Os principais parâmetros físico-químicos, discutidos a seguir são a temperatura, a condutividade elétrica (CE), a dureza, o pH, a alcalinidade e os sólidos totais dissolvidos (STD).

3.1.1- Temperatura

A variação anual de temperatura das águas subterrâneas é em geral baixa e independe da temperatura atmosférica, com exceção de aquíferos freáticos pouco profundos, onde a temperatura é pouco superior à da superfície.

Em relação à profundidade, a temperatura depende do grau geotérmico, aumentando, em média, 1°C a cada 30 m, podendo ainda sofrer maiores variações provocadas por vulcanismos, decaimento radioativo, gêiseres, etc.

Em geral, a temperatura das águas subterrâneas reflete a temperatura ambiente média anual ou a temperatura da formação, no caso de uma circulação mais profunda. Uma variação significativa da temperatura, ao longo do ano, pode representar uma água jovem, com pequeno tempo de residência e provavelmente mais vulnerável à contaminação. Temperatura mais constante, ao longo do ano, representa água com circulação mais lenta e mais profunda.

3.1.2- Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE), também chamada de condutância específica, é uma medida indireta dos sólidos totais dissolvidos (STD) de uma amostra de água, estando diretamente ligada à concentração de sais dissolvidos sob a forma de íons expressando, quantitativamente, a capacidade da água conduzir corrente elétrica.

A condutividade 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. Como depende de todos os íons presentes na solução, ela não é uma medida qualitativa, mas quantitativa.

A condutividade elétrica é definida como o inverso da resistência específica de um eletrólito, sendo especificada em Siemens por centímetro (S/cm), a uma temperatura padrão de 25°C.

Geralmente os valores da condutividade elétrica são muito pequenos. Por isso, usa-se os submúltiplos $\mu\text{S/cm}$ (10^{-6}S/cm) ou mS/cm (10^{-3}S/cm). Para o consumo humano, é importante que a água tenha uma condutividade entre 50 e 1500 $\mu\text{S/cm}$ (FUNASA, 2004).

A determinação da condutividade elétrica dá uma estimativa do conteúdo de sólidos totais dissolvidos em mg/L, utilizando a equação seguinte (Suassuna, 2007):

$$\text{STD} = 0,65 \text{ CE} \quad (3.1)$$

3.1.3- Dureza

A dureza da água mede o grau de impedimento da ação do sabão, ou seja, é a capacidade da água neutralizar o sabão pelo efeito do cálcio, magnésio ou outros elementos como o ferro, manganês, cobre, etc. A dureza de uma amostra de água pode ser classificada como temporária, permanente e 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. Ela 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 termos de carbonato de cálcio (CaCO_3) equivalente.

As águas podem ser classificadas em termos do grau de dureza de acordo com a tabela 3.1, quando a dureza é expressa em CaCO_3 .

Tabela 3.1 - Classificação das águas quanto ao grau de dureza.

(Fonte: FNS, 1999).

Dureza de CaCO_3 (mg/L)	Classificação
0 a 50	Mole
>50 a 150	Moderadamente dura
>150 a 300	Dura
> 300	Muito dura

3.1.4- pH

A concentração de íons de hidrogênio (H^+) poderia ser expressa nas mesmas unidades que as outras espécies dissolvidas, em mg/L ou em mol/L, no entanto, ela é tão baixa em solução aquosa, que é conveniente expressá-la em unidades logarítmicas, chamado de potencial hidrogeniônico, com abreviação pH.

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

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (3.2)$$

O pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. Por causa da concentração iônica das águas, o pH se encontra na faixa de 1 a 14. O pH determina a capacidade da água atacar os minerais e rochas por hidrólise e hidratação. O seu valor na água pura a 25°C é 7,0 e nas chuvas de regiões sem poluição é cerca de 5,6.

A classificação da água quanto ao pH é feita utilizando o seguinte critério:

$\text{pH} < 7 \rightarrow$ água ácida

$\text{pH} = 7 \rightarrow$ água neutra (3.3)

$\text{pH} > 7 \rightarrow$ água básica.

De um modo geral, águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais, paredes de concreto e superfícies de cimento-amianto, enquanto que águas de alto pH tendem a formar incrustações. Na maior parte das águas naturais, o pH é controlado pelo equilíbrio do sistema gás carbônico – bicarbonatos – carbonatos.

3.1.5- Alcalinidade

É definida como equilíbrio carbonático ou simplesmente como a capacidade de uma determinada água neutralizar ácidos. Em outras palavras é a quantidade de substâncias presentes na água que atuam como tampão (uma solução que atenua a variação dos valores de pH, mantendo-o aproximadamente constante, mesmo com a adição de pequenas quantidades de ácidos ou bases).

A alcalinidade é uma consequência direta da presença e/ou da ausência de carbonatos e bicarbonatos (equação 3.4) e é geralmente expressa em mg/L de CaCO_3 .

$$[\text{Alcalinidade}] = [\text{HCO}_3^-] + 2 \cdot [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad (3.4)$$

Em águas subterrâneas, a alcalinidade se deve principalmente aos carbonatos e bicarbonatos e, secundariamente, aos íons hidróxidos, silicatos, boratos, fosfatos e amônia.

Águas que percolam rochas calcárias (como a calcita, CaCO_3) geralmente têm alcalinidade elevada. Granitos e gnaisses têm poucos minerais que contribuem para a alcalinidade das águas subterrâneas.

3.1.6- Sólidos Totais Dissolvidos

É o peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume, representando a concentração de todo o material dissolvido na água, seja ou não volátil.

Na maioria das águas subterrâneas naturais, a condutividade elétrica da água multiplicada por um fator, que varia de 0,55 a 0,75 (ver equação 3.1) gera uma boa estimativa dos Sólidos Totais Dissolvidos na água.

3.2- Constituintes iônicos principais

Nas águas subterrâneas, a maioria das substâncias dissolvidas encontra-se no estado iônico. Alguns destes constituintes iônicos estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e a sua soma representa a quase totalidade dos íons presentes.

3.2.1 - Cálcio

O cálcio é o metal alcalino terroso mais abundante na natureza apresentando o estado de oxidação Ca^{+2} , estando presente nos principais formadores das rochas. É essencial para todas as formas de vida animal e vegetal, sendo também um dos componentes mais abundantes nas águas naturais em regiões semi-áridas.

É encontrado em sistemas aquosos naturais por ser um dos íons mais solúveis, sendo o principal responsável pela dureza, apresentando-se, em geral, sob a forma de bicarbonato e raramente como carbonato.

O processo de troca de cátions nos aquíferos foi observado por Renick (1925). O autor frizou o abrandamento natural das águas salinas no solo através da troca de cátions; a troca ocorrendo entre cálcio e sódio, mas o processo inverso também pode acontecer.

Os íons de cálcio 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, sendo muito fáceis de precipitar como carbonato de cálcio (CaCO_3). A solubilidade do bicarbonato aumenta com a presença de sais de Na^+ e K^+ .

Grandes quantidades de cálcio podem provocar litíase renal (formação de pedras nos rins). No uso industrial, nos sistemas de refrigeração o cálcio pode produzir entupimento através da produção de incrustações.

3.2.2 - Magnésio

O magnésio tem grande importância na química das águas, pois é essencial à nutrição das plantas. Sob alguns aspectos, como na dureza, o íon magnésio tem propriedades similares às do íon cálcio, entretanto, sendo mais solúvel e de difícil precipitação. Embora o íon magnésio, com estado de oxidação Mg^{+2} , seja a forma predominante encontrada em solução na água natural, outras formas complexas podem ser encontradas, tais como $MgOH^+$ e $MgSO_4(aq)$ (Sillen e Martell, 1964).

Os principais minerais-fontes de magnésio mais frequentes são: magnesita, biotita, granada, hornblenda, clorita, alanita e olivina. Juntamente com o cálcio é o responsável pela dureza das águas produzindo nelas um gosto salobro.

3.2.3 - Sódio

O sódio é o mais abundante dos metais alcalinos, apresentando o estado de oxidação Na^+ , sendo o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais sob o ponto de vista catiônico.

A grande quantidade de sódio se deve principalmente à ampla distribuição nos seus minerais-fontes, baixa estabilidade química dos minerais que o contém, solubilidade elevada e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução. O sódio é retirado em sedimentos, resultantes da evaporação, e em solução nos oceanos.

Ele é retido por adsorção na superfície dos minerais, especialmente por aqueles com alta capacidade de troca de cátions, como as argilas. O sódio é facilmente encontrado no solo, onde existe abundância de feldspatos (plagioclásios) e em águas superficiais e subterrâneas que estejam em contato direto com rochas portadoras destes minerais.

A concentração de sódio precisa ser determinada na água a ser utilizada tanto na indústria como na agricultura e também no uso doméstico, isso porque o sódio em grandes quantidades torna-se prejudicial.

3.2.4 - Potássio

O potássio pertence ao mesmo grupo de metais alcalinos que o sódio, mas o seu comportamento no processo de solubilidade não é parecido. Seus sais são altamente solúveis, mas ele raramente ocorre em alta concentração nas águas naturais, onde geralmente sua concentração é muito menor que a do sódio.

Em geral, a concentração de potássio é baixa devido a alta estabilidade do potássio nos minerais aluminossilicatos. Como esse íon é substancialmente maior que o íon de sódio, ele normalmente é adsorvido menos fortemente nas reações de troca iônica.

Ao contrário do sódio, o potássio é um elemento vital para o crescimento das plantas e é um dos constituintes de fertilizantes agrícolas. Íons de potássio assimilados por plantas, tornam-se disponíveis quando as plantas morrem, perdem suas folhas ou outras partes. É o que ocorre na reciclagem natural nas florestas, sendo o potássio incorporado ao solo pelas chuvas (HEM, 1985).

3.2.5 - Cloretos

Do grupo dos halogênios, o cloro é o elemento mais abundante e mais de três quartos da quantidade total de cloro presente na crosta terrestre, atmosfera e hidrosfera estão em solução no oceano. Embora ocorra em vários graus de oxidação, a forma mais significativa é o íon Cl^- .

Os íons de cloro movem-se na água através da maioria dos solos com menos atraso ou perdas que qualquer outro traçador. A concentração de cloretos nas águas naturais é, na maioria das vezes, baixa, com exceção em regiões semi-áridas ou em rios que recebem influência de rejeitos industriais ou são afetados por marés oceânicas.

Os cloretos são muito solúveis, estáveis em solução e de difícil precipitação. Não sofrem oxidação ou redução em águas naturais e estão, em geral, associados aos íons de sódio, na proporção molar 1:1, principalmente em águas salinas.

A alta solubilidade e o lento movimento da água no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas.

Águas das chuvas próximas ao oceano contêm dezenas de miligramas de cloreto por litro, mas a concentração diminui drasticamente à medida que ocorre a interiorização no continente. A presença de alta concentração de cloreto no interior dos continentes em parte é devido à atividade humana (FISHER, 1968).

SANTIAGO (1984), analisando água de chuva de quatro postos meteorológicos em Fortaleza, na costa, e os demais adentrando o continente até 90 km, encontrou uma relação entre a concentração de cloretos nas chuvas e a distância (x) à costa:

$$\text{Cl}^- (\text{mg/L}) = 5,29 \exp. (- 0,019 x/\text{km}) \quad (3.5)$$

Os padrões de potabilidade 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, sendo corrosivas e atacando estruturas e recipientes metálicos.

3.2.6 - Sulfatos

A concentração de sulfatos nas chuvas continentais, geralmente excede 1 mg/L, sendo as vezes maior que a dos cloretos. Este comportamento se deve ao efeito da poluição do ar, especialmente à contribuição da queima de combustíveis que é responsável por 30% do sulfato contido nas chuvas (JUNGE, 1960).

O sulfato também vem da oxidação do enxofre das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, sendo reduzido pelas bactérias, em ambientes com abundância de matéria orgânica precipitando-se frequentemente como CaSO_4 .

Os sulfatos 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 ternadita.

3.2.7 - Bicarbonatos e Carbonatos

A maioria dos íons bicarbonatos (HCO_3^-) e carbonatos (CO_3^{2-}) em águas subterrâneas são derivados do dióxido de carbono na atmosfera, no solo e de

dissoluções de rochas carbonatadas. Águas bicarbonatadas sódicas podem ser encontradas nos solos produzidos por evaporação. Se muito cálcio estiver presente, o bicarbonato é retirado da água através da precipitação de carbonato de cálcio. Outra fonte importante de bicarbonato é o metamorfismo das rochas carbonatadas.

Existe uma forte relação entre o pH da água e as concentrações do gás carbônico (CO_2), dos bicarbonatos (HCO_3^-) e dos carbonatos (CO_3^{2-}). Estes íons definem a alcalinidade das águas.

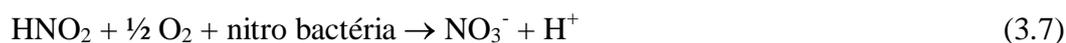
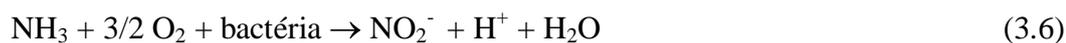
3.2.8 – Amônio, Nitrito e Nitrato

Amônio (NH_4^+) e nitrito (NO_2^-) são produzidos por microorganismos quando estes estão presentes na água. Estes dois íons juntamente com o nitrato (NO_3^-), quando presentes em uma amostra de água, exigem uma análise bacteriológica, pois são indicativos de contaminação.

A quantidade de nitrogênio na água pode indicar uma poluição recente ou remota. O nitrogênio pode estar presente sob as formas compostas: orgânica, amoniacal, nitrito e nitrato. Ele segue um ciclo desde o organismo vivo até a mineralização total, onde está presente sob a forma de nitrato (NaNO_3 : soda-niter, KNO_3 : fertilizante).

É possível avaliar o grau e a distância a uma fonte de poluição através das concentrações e das formas dos compostos nitrogenados presentes. Águas com predominância de nitrogênio orgânico e amoniacal são poluídas por descargas de esgotos próximos e com concentrações de nitrato predominante sobre nitrito e amônia indicam uma poluição remota, porque íons nitratos 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 a amônia (NH_3^+) pode transformar-se em parte para 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.



3.2.9- Ferro

As informações abaixo sobre o elemento ferro foram retiradas do site Wikipédia.

O ferro (do latim *ferrum*) é um elemento químico, símbolo **Fe**, de número atômico 26 (26 prótons e 26 elétrons) e massa atômica 56 u. À temperatura ambiente, o ferro encontra-se no estado sólido.

É extraído da natureza sob a forma de minério de ferro que, depois de passado para o estágio de ferro-gusa, através de processos de transformação, é usado na forma de lingotes. Adicionando-se carbono dá-se origem a várias formas de aço. É um metal maleável, tenaz, de coloração cinza prateado apresentando propriedades magnéticas; é ferromagnético a temperatura ambiente, assim como o Níquel e o Cobalto.

É encontrado na natureza fazendo parte da composição de diversos minerais, entre eles muitos óxidos, como o FeO (óxido de ferro II, ou óxido ferroso) ou como Fe₂O₃ (óxido de ferro III, ou óxido férrico).

Os números que acompanham o íon ferro dizem respeito aos estados de oxidação apresentados pelo ferro, que são +2 e +3, e é raramente encontrado livre. Para obter-se ferro no estado elementar, os óxidos são reduzidos com carbono, e imediatamente são submetidos a um processo de refinação para retirar as impurezas presentes.

É o metal de transição mais abundante da crosta terrestre, e quarto de todos os elementos. Também é abundante no Universo, havendo-se encontrados meteoritos que contêm este elemento. O ferro é encontrado em numerosos minerais, destacando-se: A hematita (Fe₂O₃), a magnetita (Fe₃O₄), a limonita (FeO(OH)), a siderita (FeCO₃), a pirita (FeS₂) e a ilmenita (FeTiO₃).

Pode-se obter o ferro a partir dos óxidos com maior ou menor teor de impurezas. Muitos dos minerais de ferro são óxidos. O ferro obtido pode conter muitas impurezas não desejáveis, sendo necessário submetê-lo a um processo de refinação que pode ser realizado em fornos chamados *convertedores*. Em 2004, os cinco maiores países produtores de ferro eram a China, o Brasil, a Austrália, a África e a Rússia, com 74% da produção mundial.

3.3 – Tratamento dos Dados Hidroquímicos

3.3.1 - Diagrama triangular de Piper

O estudo dos dados das análises químicas pode ser simplificado com a utilização de diagramas, hidrogramas e mapas hidroquímicos. As representações gráficas servem para destacar relações entre íons de uma mesma amostra, entre amostras de diferentes áreas ou entre amostras de diferentes épocas.

O diagrama triangular de Piper é uma das representações gráficas mais utilizadas por permitir comparar, no mesmo gráfico, um elevado número de amostras. Este tipo de diagrama foi proposto por Piper em 1944 e constitui um método que trabalha com oito variáveis em meq/L, quatro catiônicas (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ e K^+) e outras quatro aniônicas (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{-2} e SO_4^{-2}).

Neste diagrama, os valores dos cátions e dos ânions são representados em dois triângulos separados por um losango entre eles, onde são representados pontos que são obtidos a partir da projeção dos pontos obtidos nos dois triângulos.

Os valores das concentrações são expressos em miliequivalente por litro (meq/L), em percentuais de cátions e ânions. Cada vértice de um triângulo corresponde a 100% de um cátion ou de um ânion.

A figura 3.1 mostra um diagrama Piper e como é feita a classificação das águas através dos triângulos. O triângulo da esquerda diz respeito aos cátions; assim, as águas localizadas nos triângulos 5, 6 e 7 são classificadas, respectivamente, como magnesianas, cálcicas e sódicas e no triângulo 8 as águas são ditas mistas. O triângulo da direita diz respeito aos ânions e as águas localizadas nos triângulos 9, 10 e 11 são classificadas, respectivamente, como sulfatadas, bicarbonatadas e cloretadas. No triângulo 12 as águas também são ditas mistas.

A classificação das águas através do losango é feita da seguinte maneira: águas pertencentes ao losango 1 são classificadas como sulfatadas e/ou cloretadas, cálcicas e/ou magnesianas; águas situadas no losango 2 são classificadas como bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas; no losango 3 são classificadas como sulfatadas ou cloretadas sódicas e no losango 4 como bicarbonatadas sódicas.

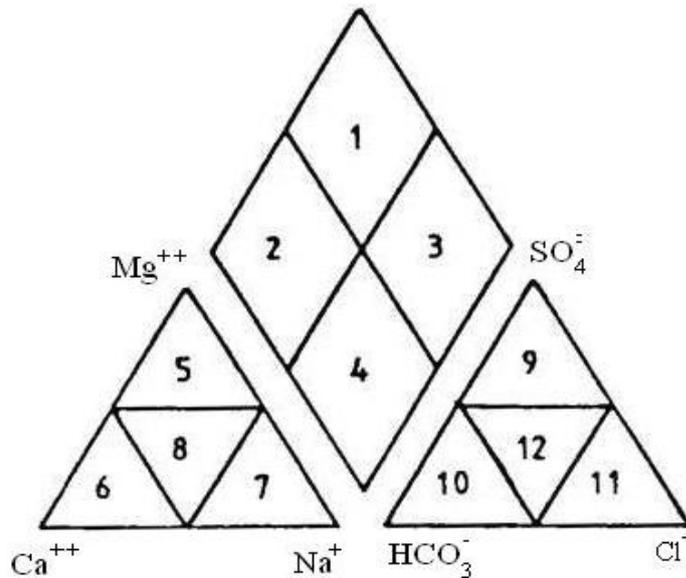


Figura 3.1 - Esquema de um diagrama Piper para a classificação das águas.

3.3.2- Classificação das águas

A adequação ao consumo humano das águas aqui estudadas foi feita com base nas normas do Ministério da Saúde que coloca limites para os valores de concentração e de parâmetros hidroquímicos. Estes limites estão indicados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores máximos permitidos (VMP) de acordo com o Ministério da Saúde.

(Fonte: FUNASA, 2004).

Parâmetro	VMP (mg/L)	Parâmetro	VMP (mg/L)
Sódio	200	Cloreto	250
Nitrato	45	Sulfato	250
Alumínio	0,2	STD	1000

4- METODOLOGIA

4.1- Análises Hidroquímicas

Para análise dos íons maiores Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , CO_3^{-2} 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 e condutividade elétrica (CE), as águas foram coletadas em garrafas de 2L, lavadas com água do próprio poço e armazenadas sob refrigeração. A coleta da água foi feita diretamente dos poços após serem bombeados por, no mínimo, cinco minutos.

Os parâmetros Ca^{+2} , dureza total (conseqüentemente Mg^{+2}), HCO_3^- , CO_3^{-2} e Cl^- são medidos por titulometria, condutividade elétrica e NO_3^- foram determinadas no mesmo dia da coleta em laboratório improvisado na sede em Mossoró. As medidas de condutividade elétrica e pH foram feitas “in loco”. 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 nas 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_4^+ - 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 $\lambda = 510 \text{ nm}$.

SO_4^{-2} - Determinação por turbidimetria e leitura em espectrômetro em

$$\lambda = 420 \text{ nm.}$$

pH – Medida feita no campo com pH-metro portátil.

CE – condutividade elétrica – medida feita no campo com condutivímetro portátil.

As curvas de calibração, 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 a 5%. Os resultados das análises tiveram erros de balanço iônico abaixo daqueles admissíveis pela literatura e indicam, assim, que as análises físico-químicas e químicas têm características de alta precisão, estando de acordo com o perfil de qualidade exigida pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 1998).

4.2- Estatística Básica

Existem várias maneiras nas quais uma grande quantidade de dados pode ser apresentada. Em geral, trabalha-se com medidas de tendência central e de dispersão para fornecer sentido a um grande número de amostras.

As medidas de tendência central são usadas para indicar um valor que tende a representar melhor um conjunto de números. As mais utilizadas são a média (m), a mediana (md) e a moda (mo) (Cerqueira et al. 2006).

Para uma série de dados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, onde n é o número de observações na série, define-se a média aritmética (m) como a soma dos valores do conjunto dividida pelo número de valores do conjunto:

$$m = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (4.1)$$

A mediana (md) é o ponto médio da série, ou seja, divide a amostra ou população em duas partes iguais. Metade dos dados na série é maior do que a mediana e a outra metade é menor. A moda (mo) é definida como o valor que aparece mais vezes na série, isto é, que possui maior frequência.

As medidas de dispersão são usadas para indicar o grau no qual os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio, indicam se os valores estão relativamente próximos um dos outros, ou separados. As mais usadas são a amplitude (A), a variância (σ), o desvio padrão (S) e o coeficiente de variação de Pearson (CVP).

A amplitude é a diferença entre o maior e o menor valor observado em um conjunto de dados numéricos, tem a vantagem de ser de fácil obtenção, mesmo para grande quantidade de dados.

$$A = x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}} \quad (4.2)$$

O desvio padrão (S) é uma medida do espalhamento da distribuição ao redor da média, sendo calculado pela soma dos desvios quadráticos da média, dividida pelo número de observações (se os dados representarem a população toda) ou pelo número de observações reduzido por um (se os dados representarem uma amostra). Matematicamente, tem-se:

$$S = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

ou

$$S = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

A grande vantagem do desvio padrão está em apresentar a mesma unidade de medida dos dados (amostras) em estudo.

A variância σ , é definida como o quadrado do desvio padrão:

$$\sigma = S^2 \quad (4.5)$$

O Coeficiente de Variação de Pearson (CVP) relaciona o desvio padrão (S) e a média (m). É uma medida relativa de variabilidade expressa em percentual, mas pode ser expressa também através de um fator decimal, desprezando-se o valor 100 na fórmula:

$$CVP = \frac{S}{m} (.100) \quad (4.6)$$

Quando existem duas séries de dados, várias medidas estatísticas podem ser usadas para informar como as duas séries mudam juntas com o tempo. As duas medidas estatísticas mais largamente usadas são a covariância e a correlação. Para duas séries de dados, X (X_1, X_2, X_3, \dots) e Y (Y_1, Y_2, Y_3, \dots) a covariância fornece uma medida não padronizada do grau no qual elas se movem juntas, sendo estimada tomando o produto dos desvios da média (m) para cada variável em cada período.

$$Cov(x, y) = \sigma_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y) \quad (4.7)$$

A covariância é uma medida de associação (relação) linear entre duas variáveis aleatórias. É na realidade uma medida de como essas variáveis variam conjuntamente. Se X e Y são duas variáveis aleatórias, a covariância entre elas é definida pela expressão:

$$Cov(x, y) = E(xy) - E(x).E(y) \quad (4.8)$$

onde, E é o valor esperado.

A covariância serve para verificar se duas variáveis aleatórias mudam ou não no mesmo sentido. Por exemplo, se a variável X aumentar a variável Y também aumentar ou se X diminuir e Y também diminuir, as variáveis mudam, ou melhor, covariam no mesmo sentido, sendo assim uma covariância entre elas positiva. Ao contrário, quando X aumenta e Y diminui ou quando X diminui e Y aumenta, as variáveis covariam em sentidos opostos a covariância é negativa.

Se X e Y são duas variáveis aleatórias independentes, então a covariância entre elas é dita nula, isto é:

$$Cov(x, y) = 0 \quad (4.9)$$

A recíproca, no entanto, não é verdadeira; é possível que X e Y não sejam independentes e tenham covariância zero, ou seja, o fato de $Cov(X, Y) = 0$ não implica necessariamente que X e Y sejam independentes.

A covariância de uma variável X com ela própria é chamada de variância, e escreve-se como:

$$Cov(x, x) = Var(x) = \sigma \quad (4.10)$$

Embora a covariância cresça com o nível de relação, ainda é relativamente difícil julgar este nível de relação entre as duas variáveis observando somente a covariância, pois ela não é padronizada.

A correlação é uma medida padronizada da relação entre duas variáveis e é usada para medir o grau de dependência linear entre essas variáveis. Geralmente é mais usada que a covariância e é calculada por:

$$Corr = \frac{Cov(x, y)}{\sqrt{\sigma_x} \sqrt{\sigma_y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2}} \quad (4.11)$$

A vantagem da correlação é que ela é independente de escala, ou seja, quando muda a escala das variáveis não muda o valor da correlação entre elas. Por este motivo, a correlação é mais usada do que a covariância como medida de associação entre variáveis.

A correlação nunca pode ser maior do que 1 ou menor do que -1. Uma correlação próxima de zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis se movem juntas e a relação é forte quanto mais a correlação se aproxima de 1. Correlação negativa indica que as duas variáveis se movem em direções opostas, e que a relação também se torna mais forte quanto mais próxima de -1. Dessa maneira, duas variáveis que estão perfeitamente correlacionadas positivamente ($r = 1$) movem-se essencialmente em perfeita proporção na mesma direção, enquanto dois conjuntos que estão perfeitamente correlacionados negativamente ($r = -1$) movem-se em perfeita proporção em direções opostas.

Se x e y forem variáveis independentes, segue da definição de covariância que:

$$Corr(x, y) = Cov(x, y) = 0 \quad (4.12)$$

4.3- Análise Fatorial

Técnicas estatísticas podem nos ajudar a simplificar e organizar grandes conjuntos de dados e fazer generalizações valiosas. A Análise Fatorial é uma ferramenta matemática útil para observar relações lineares não observáveis entre as grandezas estudadas ou entre os objetos estudados.

A principal característica desse tipo de tratamento matemático é a capacidade de redução de dados, o que facilita muito a interpretação dos resultados. Essa propriedade a torna tão usual no meio científico atual.

Uma das vantagens de utilizar a análise fatorial para descrever um grande conjunto de dados hidroquímicos é que o efeito de íons menores (geralmente com menor concentração) sobre o sistema, como por exemplo, os íons de ferro ou alumínio, não é mascarado pela presença dos íons maiores, como do cálcio ou magnésio.

DALTON e UPCHURCH (1978) tiraram conclusões importantes com o uso da análise fatorial, mostrando que a carga dos fatores pode ser relacionada com a intensidade dos processos químicos descritos pelo fator. Os valores negativos para cargas refletem áreas essencialmente não afetadas pelos processos e os valores positivos para as cargas refletem áreas mais afetadas. Valores próximos de zero correspondem a áreas afetadas a um grau médio pelo processo químico descrito por esse fator particular.

No campo da análise fatorial, as possíveis relações encontradas entre as variáveis do sistema podem ser estudadas através da chamada análise R-modal. Já as relações existentes entre os objetos do sistema são estudadas através da chamada análise Q-modal. A análise R-modal deve ser feita independentemente da análise Q-modal porque elas fornecem interpretações diferentes.

O objetivo da análise fatorial é explicar o resultado de p variáveis em uma matriz \mathbf{X} com todos os dados, usando poucas variáveis, os chamados fatores. A idéia é que toda a informação contida em \mathbf{X} possa ser explicada por um pequeno número de fatores. Esses fatores são ortogonais entre si em um espaço abstrato R^p e são interpretados como características comuns não observadas entre as variáveis originais.

Então, um conjunto de dados com N objetos estudados e p grandezas (as variáveis) medidas, pode ser organizado numa matriz \mathbf{X} , que pode ser escrita como:

$$\mathbf{X} = \mathbf{QF} + \boldsymbol{\mu} \quad (4.13)$$

onde nesta expressão,

\mathbf{X} é a matriz de dados;

\mathbf{Q} é a matriz de cargas fatoriais dos fatores comuns;

\mathbf{F} é a matriz k -dimensional dos k fatores

$\boldsymbol{\mu}$ é a matriz de resíduos.

Esta equação matricial pode ser representada por:

$$x_j = \sum_{l=1}^k q_{jl}f_l + \mu_j \quad (4.14)$$

com $j = 1, 2, \dots, p$ e $l = 1, 2, \dots, k$.

Nesta equação, f_l representa os fatores e q_{jl} as cargas fatoriais, que refletem a importância de cada variável p nos fatores. Dessa maneira, onde a carga fatorial for alta significa que a variável contribui de maneira significativa para aquele fator.

Na análise fatorial do tipo R-modal utilizada neste trabalho, N representa a quantidade de poços amostrados (os objetos) e p representa 15 grandezas que foram

medidas na água coletada em cada um dos poços (três parâmetros físico-químicos: condutividade elétrica, o pH e a dureza; e doze parâmetros hidroquímicos: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , CO_3^{-2} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Fe).

Outra maneira de trabalhar com a matriz de dados \mathbf{X} é considerar o modelo da análise fatorial em termos da matriz de covariância (Σ) ou da matriz de correlação (\mathbf{R}).

Quando se trabalha com um conjunto de variáveis costuma-se usar a matriz de covariância que é simétrica, sumarizando a covariância entre as N variáveis estudadas e sendo escrita na forma de desvio da média. Se os elementos de um vetor coluna,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

forem variáveis aleatórias, cada uma com uma variância finita, então a matriz de covariância entre todos os elementos será dada por:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{Cov}(x_1, x_1) & \cdots & \text{Cov}(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(x_n, x_1) & \cdots & \text{Cov}(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

A covariância entre um elemento x_i e ele mesmo é a sua variância e forma a diagonal principal da matriz de covariância.

A matriz de correlação deve ser escrita com os dados padronizados. Para o vetor coluna (4.15) a matriz de correlação pode ser representada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \text{Corr}(x_1, x_1) & \cdots & \text{Corr}(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Corr}(x_n, x_1) & \cdots & \text{Corr}(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

A tabela 4.1 exibe um modelo de uma matriz de correlação entre 10 variáveis (Var) quaisquer. Os valores da diagonal principal dessa matriz são iguais a 1 devido a perfeita correlação entre as mesmas variáveis.

A partir dessa matriz, é explorada a possibilidade de redução dos dados, com a construção de um conjunto de novas variáveis (os fatores comuns) com base nas inter-relações dos dados originais.

Tabela 4.1- Modelo de uma matriz de correlação entre variáveis.

Var.: variável

	Var. 1	Var.2	Var. 3	Var. 4	Var. 5
Var. 1	1				
Var. 2		1			
Var. 3			1		
Var. 4				1	
Var. 5					1

4.4- Análise Fatorial R-modal

A análise fatorial R-modal pode ser usada para fazer comparações entre os dados de diferentes parâmetros químicos de análise de água com a finalidade de determinar possíveis relações entre eles.

O objetivo dessa análise é descrever como é a estrutura de relação entre as variáveis em termos de um número menor de variáveis (não observadas), chamada de fatores, sendo cada fator uma combinação linear das variáveis originais em um espaço vetorial ortogonal abstrato. Esse conjunto de fatores deve expressar o que as variáveis originais partilham em comum.

A análise fatorial R-modal é então uma técnica estatística usada para identificar um número relativamente pequeno de fatores que podem ser usados para identificar relacionamentos entre um conjunto de muitas variáveis interligadas entre si.

Antes de fazer uma análise fatorial, os dados devem ser normalizados de acordo com certos critérios. Isto é necessário porque o primeiro passo na análise fatorial é a obtenção dos coeficientes da matriz de correlação e esta requer uma distribuição normal em todas as variáveis.

A análise fatorial R-modal feita neste trabalho pelo método do centróide e com rotação do tipo Varimax seguiu os passos (Bakaç, 2004):

- 1- Padronização dos dados, que resulta em novos valores para todas as variáveis, que não somente tem média zero, mas que são medidas em unidades de desvio padrão.
- 2- Cálculo da matriz de correlação;
- 3- Extração de uma matriz de fatores pelo método do centróide considerando os fatores significantes;

- 4- Rotação da matriz dos fatores pelo método normalizado de Rotação Varimax que é o método mais usado;
- 5- Interpretação dos fatores dominantes;
- 6- Cálculo dos escores de cada fator;
- 7- Interpretação dos processos.

A padronização dos dados é feita através da média da distribuição de cada medida dividida pelo desvio padrão da distribuição. Dessa maneira, as novas variáveis tem uma forma padrão normal.

A matriz de correlação representa as possíveis correlações de Pearson entre as variáveis estudadas.

A variância informa a parcela de explicação dos dados pelos fatores. A soma do quadrado da carga fatorial para cada variável reflete a proporção da variabilidade total daquela variável descrita pela carga.

O autovalor de um determinado fator é a soma dos quadrados das cargas fatoriais de cada fator antes de uma rotação ou de qualquer outro método para maximizar a carga.

Os fatores são obtidos após ser efetuado algum tipo de rotação, tendo o primeiro fator obtido sempre o máximo valor da variância. Os fatores seguintes mostram, progressivamente, porções menores da variância, sendo todos não-relacionados uns com os outros.

A rotação do tipo Varimax é um dos métodos mais usados para rotação ortogonal e resulta em fatores que não são correlacionados. A estrutura que se obtêm com esse método de rotação inclui fatores dominantes, variáveis e fatores de comunalidade (que é a proporção da variância de cada variável explicada pelos fatores comuns).

O critério Kaiser é utilizado na quantificação dos fatores que devem ser extraídos quando se tem interesse apenas nos fatores com autovalores maiores do que 1 (um). Isso limita a quantidade de fatores que podem ser obtidos.

Para entender a estrutura e dependência dos dados, a interpretação dos resultados é feita com o auxílio de tabelas de valores e com gráficos que mostram a projeção dos centróides de cada parâmetro no espaço bidimensional dos dois principais fatores.

Esse gráfico indica o percentual de contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores. Assim, quanto mais próximo de 1 (um) for a carga

da variável no fator, mais próximo de 100% é a sua contribuição para a formação daquele fator.

Outros tipos de rotações podem ser feitas, a rotação do tipo oblíqua resulta em fatores correlacionados, mas não ortogonais e a do tipo Quartimax minimiza o número de fatores necessários para explicar cada variável e simplifica a interpretação das variáveis obtidas.

A análise fatorial R-modal é uma técnica estatística muito usada na hidrogeoquímica quando se tem um grande conjunto de dados e pretende-se tirar alguma informação desse conjunto.

4.5- Análise Fatorial Q-Modal

A análise fatorial do tipo Q-modal busca as inter-relações entre os objetos estudados. Nesse trabalho, procurou-se encontrar semelhanças entre os poços da Chapada do Apodi.

Essa análise gera um novo espaço vetorial ortogonal abstrato de objetos, com número de elementos bem menor que o inicial e mostra que determinados objetos possuem características semelhantes entre si, de modo que pode-se agrupá-los em classes ou grupos.

Para realizar esse tipo de Análise Fatorial, os dados foram inseridos no programa Microsoft Office Excel de maneira diferente da Análise Fatorial R-modal. Enquanto na Análise R-modal as variáveis são colocadas na primeira linha da matriz de dados e os valores para essas variáveis (correspondentes a um determinado objeto) nas colunas, na Análise Q-modal os objetos são colocados na primeira linha e os valores das variáveis nas colunas.

Em outras palavras, para realizar uma análise Q-modal, trabalha-se com uma espécie de matriz transposta da matriz utilizada na análise R-modal.

A tabela 4.2 ilustra uma matriz para o caso de uma análise R-modal feita com 100 objetos e 10 variáveis e a tabela 4.3 ilustra o mesmo exemplo, para uma análise Q-modal.

Tabela 4.2- Exemplo de uma matriz com os dados no Excel para uma Análise Fatorial R-modal. OBJ.: objetos e VAR.: variável.

	VAR.01	VAR.02	VAR.03	VAR.04	. . .	VAR.10
OBJ.01						
OBJ.02						
OBJ.03						
OBJ.04						
.						
.						
.						
OBJ.100						

Tabela 4.3- Exemplo de uma matriz com os dados no Excel para uma Análise Fatorial Q-modal. OBJ.: objetos e VAR.: variável.

	OBJ.01	OBJ.02	OBJ.03	OBJ.04	. . .	OBJ.100
VAR.01						
VAR.02						
VAR.03						
VAR.04						
.						
.						
.						
VAR.10						

4.6- Análise Cluster

A estatística multivariada é uma ferramenta bastante útil quando o número de variáveis envolvidas é grande e deseja-se resumir as observações em uma ou mais características que simplifiquem o volume de informações (Hair et al., 2005).

A análise de agrupamento, também conhecida como *cluster analysis*, tem como objetivo dividir os elementos da amostra, ou população, em grupos de tal forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com respeito às características, que são as variáveis de cada elemento (Mingoti, 2005).

A análise *cluster* gera um novo espaço vetorial ortogonal abstrato de objetos que mostra que determinado conjunto de objetos possui características semelhantes entre si.

Esse tipo de análise torna-se muito útil quando se faz uma visualização gráfica de separação relativa entre os elementos de determinado conjunto amostral.

Para realizar esse tipo de análise os dados são colocados numa planilha do Microsoft Office Excel e o software WinStat cria uma coluna, onde enumera seus objetos, de maneira implícita, isto é, sem expor essa coluna, como na Tabela 4.4 mostrada abaixo.

A visualização gráfica dos elementos (objetos) é realizada de acordo com as distâncias de dissimilaridade, produzindo um dendograma onde as amostras semelhantes são agrupadas entre si. É justamente a coluna inserida pelo WinStat que aparece no dendograma; daí a necessidade de voltar aos dados para identificar o objeto mostrado por determinado número no dendograma.

Tabela 4.4- Exemplo de uma matriz com os dados no Excel para uma análise *Cluster*. A coluna da esquerda não é mostrada na planilha. OBJ.: objetos e VAR.: variável.

		VAR.01	VAR.02	VAR.03	VAR.04	. . .	VAR.10
1	OBJ.01						
2	OBJ.02						
3	OBJ.03						
4	OBJ.04						
.	.						
.	.						
.	.						
100	OBJ.100						

A figura 4.1 ilustra um modelo de dendograma para os dados da Tabela 4.4 com um possível agrupamento para alguns dos objetos, por exemplo, para os elementos 1, 2, 4, 5, 6 e 100 da referida tabela, onde os objetos 4, 2, 6 formam um possível grupo e os objetos 1, 5 e 100 formam outro possível grupo.

A interpretação do dendograma indica que quanto menor for a distância entre os elementos, ou seja, quanto menor for a dissimilaridade, maior será a semelhança entre eles. Os dendogramas são especialmente úteis na visualização de elementos semelhantes que possuem dimensão maior do que três, onde a representação em gráficos convencionais não é possível.

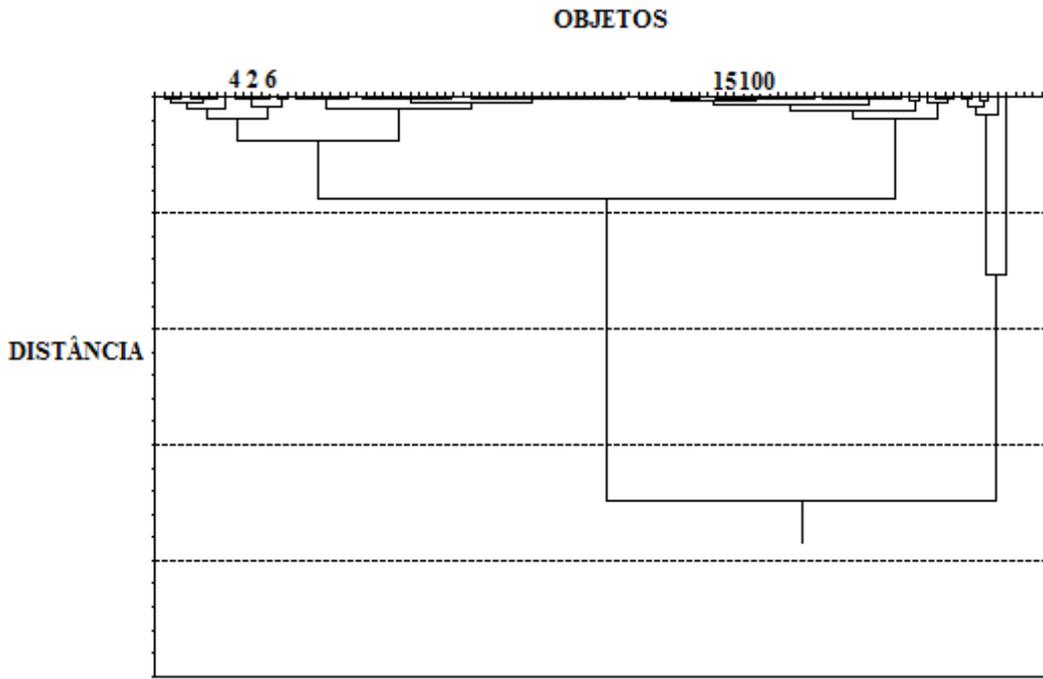


Figura 4.1- Modelo de um dendograma com possíveis grupos.

Existem diferentes maneiras de medir a dissimilaridade entre elementos. Uma das técnicas mais utilizadas em análises de agrupamento é a distância euclidiana, DE, que num espaço n-dimensional é obtida pela equação (ALMEIDA, 2009):

$$DE = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} \quad (4.18)$$

onde $P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ e $Q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ são os elementos.

Existem diversos softwares estatísticos disponíveis para a elaboração de análises multivariadas. Para a realização deste trabalho foi utilizado o WinStat (R. Fitch Software), que foi adicionado como suplemento da barra de ferramentas do Microsoft Office Excel.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentadas em tabelas, as medidas físico-químicas e hidroquímicas feitas nas amostras de água coletadas nos meses de setembro 2009 e janeiro de 2010, nos municípios de Baraúna e Mossoró, no Estado do Rio Grande do Norte e nos municípios de Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte, no Estado do Ceará. Aqui estão também apresentados e discutidos os resultados obtidos com as análises fatorial R-modal, Q-modal e Análise de Grupo (*Cluster*) aplicada aos dados.

Os resultados das análises de condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, dureza e pH estão apresentados nas tabelas de 5.1 a 5.8, separados por município.

Os resultados dos parâmetros hidroquímicos, as concentrações iônicas de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- e Fe, estão apresentados nas tabelas de 5.9 a 5.16, separados também por município.

Para a realização deste trabalho foram feitas simulações, usando o software WinStat: duas simulações para cada tipo de Análise Fatorial, R-modal e Q-modal, e duas utilizando análise de grupo (uma simulação para cada período de coleta).

Embora nas simulações realizadas já se tenha colocado a concentração de cálcio e de magnésio (e, de maneira implícita, representando a dureza das amostras), achou-se conveniente acrescentar a dureza das águas na realização das simulações, pelo fato dos poços amostrados estarem localizados em áreas onde a dureza excessiva das águas, em alguns casos, provoca incrustações em canos e tubulações.

Tabela 5.1- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Baraúna coletadas em setembro de 2009. ANA: número da Agência Nacional de Águas.

B: Baraúna. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica.

STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	STD (mg/L)
Recreio	A0511	B1	1474	760	1975	6,9	1167,4
Assentamento Santa Clara	A0251	B2	1475	1520	5270	7,2	2857,0
Veneza	A0605	B3	1476	450	1116	6,8	871,6
Baixa Branca	A0289	B4	1477	420	950	6,8	834,7
Meia Légua	A0330	B5	1478	420	1333	6,8	1009,7
Lajedo Do Sebo	A0624	B6	1479	450	1391	6,9	1007,4
Ass. Formosa	A0478	B7	1480	520	1725	6,7	1136,0
Boa Água	A0468	B8	1481	480	1911	6,6	1232,6

Continuação da **Tabela 5.1**- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Baraúna coletadas em setembro de 2009. ANA: número da Agência Nacional de Águas. B: Baraúna. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	STD (mg/L)
Caatingueira	A0523	B9	1482	500	1412	6,8	1037,0
Catingueira	A0632	B10	1483	310	885	6,7	551,5
Olho D'água Da Escada	A0499	B11	1484	410	1247	6,6	870,1
Olho D'água Da Escada	A0495	B12	1485	440	1185	6,9	918,2
Mato Alto	A0585	B13	1486	470	1157	6,9	913,6
Faz. Encerado	A0146	B14	1487	440	1319	6,9	926,5
Juremal	A0020	B15	1488	440	1683	6,9	971,9
Campestre	A0149	B16	1489	580	2060	6,9	1269,6
Oiticica	A0049	B17	1490	1630	6870	6,9	3810,7
Juremal	A0304	B18	1491	580	2340	6,8	1459,8
São Raimundo	A0023	B19	1492	540	1258	6,8	1031,1
Furna de Pedra	A0313	B20	1493	500	1170	6,7	927,6
Florência	A1065	B21	1494	390	945	6,9	738,3
Sítio Currais	A1022	B22	1495	440	1062	7,0	877,6
Baixa São Francisco	A0085	B23	1521	960	3330	7,0	2089,7
Primavera	A0224	B24	1522	620	2000	6,7	1286,8
Mata Burro	A0208	B25	1523	480	1345	6,7	918,0
Currais	A0040	B26	1524	470	1087	6,8	856,2
Lajedo do Ouro	A1078	B27	1525	680	3460	7,1	1897,5
Florência	A0306	B28	1526	300	715	6,9	610,8
Serrote	A0029	B29	1527	260	1248	7,1	891,0
Moinho Novo	A0335	B30	1529	560	1627	6,7	1135,1
Toca da Raposa	A0996	B31	1530	450	1338	6,9	884,8
Pico Estreito	A0355	B32	1531	410	1231	6,8	809,9
Favela da Fumaça	A0908	B33	1535	780	2700	6,8	1627,8
Boa Água	A0599	B34	1541	710	2330	6,8	1493,1
Campestre	A0152	B35	1542	480	966	6,7	899,1
Poço Perdido	A0228	B36	1543	700	2360	6,8	1585,2
Pico Estreito	A1414	B37	1544	400	1221	6,6	774,2
Pico Estreito	A0206	B38	1545	350	902	6,9	688,9
Pico Estreito	A0047	B39	1546	390	943	6,9	736,1
Corrego de Pedra	A0255	B40	1547	420	963	6,9	778,3
Assent.Rancho do Pereiro	A0276	B41	1548	620	1738	6,7	1211,1
Córrego de Pedra	A1026	B42	1549	400	1300	6,7	928,8

Tabela 5.2- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Baraúna coletadas em janeiro de 2010. ANA: número da Agência Nacional de Águas. B: Baraúna. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	STD (mg/L)
Assentamento Sta. Clara	A0251	B2	1635	1200	4300	6,9	2664,3
Boa Água	A0599	B8	1641	780	2360	6,6	1602,3
Caatingueira	A0523	B9	1640	530	1300	6,6	1105,2
Olho d'água da Estrada	A0495	B12	1642	520	1192	6,8	996,8
Mato Alto	A0585	B13	1644	360	1116	6,9	911,5
Juremal	A0020	B15	1596	570	1712	6,8	1232,8
Campestre	A0149	B16	1579	500	1780	6,9	1080,4
Oiticica	A0049	B17	1582	2480	9590	6,9	5312,2
Juremal	A0304	B18	1580	570	2260	6,8	1270,8
São Raimundo	A0023	B19	1603	460	1338	6,8	910,0
Sítio Currais	A1022	B22	1637	470	1150	6,8	914,5
Baixa São Francisco	A0085	B23	1599	440	1260	6,8	945,2
Mata Burro	A0208	B25	1581	380	1285	6,8	781,9
Currais	A0040	B26	1602	370	1042	6,7	735,9
Lajedo de Ouro	A1078	B27	1639	480	2460	7,5	1746,5
Moinho Novo	A0335	B30	1633	590	1689	6,7	1195,0
Toca da Raposa	A0996	B31	1600	470	1407	6,6	946,6
Pico Estreito	A0355	B32	1629	410	1254	6,7	924,4
Pico Estreito	A0206	B38	1628	320	1009	6,7	816,2
Córrego de Pedra	A0255	B40	1634	440	1072	6,8	892,0
Córrego de Pedra	A1026	B42	1636	390	1009	6,9	852,5
Pico Estreito	A0047	B43	1627	190	878	6,9	665,3
Ass.Tiradentes	A0034	B44	1638	330	760	7,1	696,1
St. Facheiro	A0060	B45	1597	490	1376	6,6	1017,1
MoinhoNovo	A0019	B46	1598	540	1635	6,6	1155,8
Velame I	A0116	B47	1601	440	1227	6,7	817,9
Quatro Bocas	A0530	B48	1643	560	1372	6,7	1100,5
Sumidouro	A0534	B49	1645	470	1154	6,7	907,9
Primavera	A0224	B50	1572	620	2040	6,9	1299,4

Tabela 5.3- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Mossoró coletadas em setembro de 2009. ANA: número da Agência Nacional de Águas. M: Mossoró. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	STD (mg/L)
Canto do Junco	A0897	M1	1459	1340	4790	6,7	2575,5
Estrada da Raíz	A0740	M2	1460	1360	6870	6,5	3657,5
PA Boa Fé	A0870	M3	1461	1900	7620	6,6	4010,0
Coqueiro	A0855	M4	1462	550	1557	6,8	1123,4
Lajedo	A0765	M5	1463	460	1039	6,9	889,5
Arisco	A0895	M6	1464	870	3320	6,7	2124,5
Arisco	A0896	M7	1465	570	2120	7,0	1513,0
Oiticica	A0848	M8	1466	490	1524	6,8	1105,5
Senegal	A0815	M9	1467	470	1211	6,8	863,0
Fazenda Aquarium	A0919	M10	1468	5760	29100	6,6	16517,0
Sítio Sto Antônio	A0974	M11	1469	2080	13120	6,8	7015,3
Pau D'Arco	A0867	M12	1470	1860	9490	6,6	4838,8
Barrinha	A0716	M13	1472	230	630	6,2	510,2
Riachinho	A0887	M14	1473	490	1653	6,9	1125,5
São José	A1109	M15	1519	530	1535	6,9	1009,1
Barreira Vermelha	A1153	M16	1520	740	2190	6,6	1362,8
Sítio Estreito	A0915	M17	1532	740	3610	6,6	2089,5
Santa Delmira	A0869	M18	1533	620	3430	6,6	1735,8
Serra Mossoró	A0706	M19	1534	920	4990	6,5	2295,6
PA. Lagoa de Xavier	A0724	M20	1536	1480	4070	6,6	2314,6
Bom Destino	A0798	M21	1537	820	2210	6,8	1496,9
Riacho Grande	A1163	M22	1538	460	1620	6,9	1042,4
Panela do Amaro	A0912	M23	1539	730	2810	6,7	1602,9
A. Sta Rita de Cassia	A1151	M24	1540	510	1807	6,7	1117,9
Barreira Vermelha	A1155	M25	1552	1180	3810	6,5	2403,9
Jucuri/ PA Solidão	A1161	M26	1553	710	2130	7,1	1410,5
Jucuri	A1156	M27	1554	690	2200	6,7	1385,7
Oiticica	A0827	M28	1556	440	1571	6,7	1138,5
Puxa Boi	A0885	M29	1557	2280	7760	6,0	3977,8
Sítio da Ema	A0943	M30	1558	2620	9670	5,1	4894,3

Tabela 5.4- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Mossoró coletadas em janeiro de 2010. ANA: número da Agência Nacional de Águas. M: Mossoró. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE (μS/cm)	pH	STD (mg/L)
Canto do Junco	A0897	M1	1575	1240	4880	6,7	2400,3
PA Boa Fé	A0870	M3	1562	2200	7760	6,5	3666,4
Lajedo	A0765	M5	1564	470	1022	7,2	882,7
Arisco	A0895	M6	1565	620	3490	6,6	1541,2
Arisco	A0896	M7	1560	600	2110	6,6	1390,4
Oiticica	A0848	M8	1559	470	1444	6,9	1090,9
Senegal	A0815	M9	1561	460	1163	7,9	821,8
Sítio Sto. Antônio	A0974	M11	1579	1420	10490	7,2	5328,0
Pau D'Arco	A0867	M12	1566	1680	8530	6,6	4579,6
São José	A1109	M15	1576	540	1802	6,9	1139,0
Sítio Estreito	A0915	M17	1568	1140	4800	6,7	2586,6
Serra Mossoró	A0706	M19	1630	670	2720	7,2	1591,0
Bom Destino	A0798	M21	1563	870	2230	6,7	1711,7
Riacho Grande	A1163	M22	1577	430	1456	6,9	1054,7
Panela do Amaro	A0912	M23	1567	850	2710	6,6	1735,5
A.Sta. Rita de Cássia	A1151	M24	1570	630	1522	6,7	1190,7
Jucuri	A1161	M26	1632	480	1354	7,2	980,7
Sítio da Ema	A0943	M30	1574	100	2080	6,1	1002,0
Favela da Fumaça	A0908	M31	1571	630	2510	6,7	1552,9
Barreira Vermelha	A1155	M32	1569	1080	3880	6,4	2185,6
Puxa Boi	A0873	M33	1631	1380	6160	6,6	3219,0
Lajedo	A0774	M34	1605	620	2410	6,6	1415,7
Oiticica	A0842	M35	1606	700	2610	6,8	1436,1

Tabela 5.5- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Jaguaruana coletadas em setembro de 2009. ANA: número da Agência Nacional de Águas. J: Jaguaruana. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	STD (mg/L)
Formigueiro	A1029	J1	1496	540	2960	7,1	1894,3
Lajedo do Mel	A1042	J2	1497	420	1104	6,6	832,7
Lagoa da Salsa	A1408	J3	1498	480	2520	6,0	1530,4
Caiçara	A1399	J4	1499	900	3510	6,1	1845,7
Aroeira	A1398	J5	1500	740	3050	6,3	1569,2
Carrapateiras	A1383	J6	1501	410	1207	7,1	871,0
Sítio Gurgel	A1406	J7	1502	280	1325	6,1	778,2
Serra Dantas	A1411	J8	1503	330	735	7,1	650,7
Sítio Pacatã	A1404	J9	1550	880	2780	6,8	1906,2

Tabela 5.6- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Jaguaruana coletadas em janeiro de 2010. ANA: número da Agência Nacional de Águas. J: Jaguaruana. RG: Registro Geral do laboratório. CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Nº	RG	Dureza (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	STD (mg/L)
Formigueiro	A1029	J1	1587	370	2690	7,2	1775,7
Caiçara	A1399	J4	1589	1100	3670	6,9	2007,4
Aroeira	A1398	J5	1588	1280	4580	6,6	2435,3
Carrapateiras	A1383	J6	1591	370	1155	6,9	866,4
Sítio Gurgel	A1406	J7	1586	1360	4660	6,8	2565,9
Serra Dantas	A1411	J8	1590	250	863	6,9	568,2
Sítio Pacatã	A1404	J9	1584	610	1980	7,3	1220,9
Peroba	A1036	J10	1607	60	216	7,6	190,9

Tabela 5.7- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Quixeré e Limoeiro do Norte coletadas em setembro de 2009. ANA: número da Agência Nacional de Águas. Q: Quixeré. LM: Limoeiro do Norte RG: Registro Geral do laboratório.

CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Poço	RG	Dureza (mg/L)	CE (μS/cm)	pH	STD (mg/L)
Bom Sucesso	A1082	Q1	1504	400	1032	6,7	833,1
Bom Sucesso	A1084	Q2	1505	550	1607	6,9	1086,2
Sítio Jucá	A0389	Q3	1506	450	1524	6,8	991,4
Sítio das Carnaúbas	A0410	Q4	1507	270	1126	6,5	791,3
Boa Esperança	A1233	Q5	1508	440	1132	6,7	848,7
Boa Esperança	A1240	Q6	1509	530	1453	6,7	1050,7
Cabeça Santa Cruz	A1173	Q7	1510	350	1175	6,9	772,7
Ubaia	A1101	Q8	1511	460	1150	6,6	902,0
Queimadas	A1205	Q9	1512	390	1447	6,5	851,9
Maria Preta	A1219	Q10	1513	410	1691	6,7	1009,0
Mato Alto	A1329	Q11	1514	380	980	6,9	825,3
Sítio Jucá	A0381	Q12	1515	500	1605	6,8	1031,7
Boa Esperança	A1106	Q13	1555	320	1100	7,2	811,5
Peroba	A1036	Q14	1551	30	177	5,0	139,0
Rancho Da Casca	A1310	LM15	1516	470	1305	6,9	927,9
Km 60	A1319	LM16	1518	380	1012	6,0	587,0

Tabela 5.8- Localidade e parâmetros físico-químicos de amostras de Quixeré e Limoeiro do Norte coletadas em janeiro de 2010. ANA: número da Agência Nacional de Águas. Q: Quixeré. LM: Limoeiro do Norte RG: Registro Geral do laboratório.

CE: Condutividade Elétrica. STD: Sólidos Totais Dissolvidos.

Localidade	ANA	Nº	RG	Dureza (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	STD (mg/L)
Bom Sucesso	A1082	Q1	1583	400	1149	6,8	932,4
Bom Sucesso	A1084	Q2	1585	450	1469	7,1	861,9
Sítio das Carnaúbas	A0410	Q4	1618	270	837	6,9	624,0
Boa Esperança	A1233	Q5	1593	420	1216	6,7	857,4
Boa Esperança	A1240	Q6	1592	630	1659	6,6	1136,9
Cabeça Santa Cruz	A1173	Q7	1613	470	1225	7,3	913,2
Ubaia	A1101	Q8	1609	420	1161	6,8	888,5
Mato Alto	A1329	Q11	1616	420	993	6,9	910,3
Sítio Jucá	A0381	Q12	1622	510	1633	6,9	1095,2
Rancho da casca	A1310	LM15	1611	710	2130	6,7	1584,7
Km 60	A1319	LM16	1615	360	1036	7,1	784,9
Boa Esperança	A1239	Q17	1594	540	1490	6,5	1074,2
Boa Esperança	A1105	Q18	1595	490	1517	6,7	1045,5
St. Maria Preta	A0379	Q19	1610	560	1827	6,9	1204,5
LixãoCab. Sta Cruz		Q20	1621	500	1242	7,7	942,7
St. Jucá	A0387	Q21	1623	600	1886	7,1	1219,1
Itaitinga	A1337	Q22	1625	510	1797	6,9	1174,1
Sítio Jucá	A0389	Q23	1624	500	1812	9,9	1127,8
Tomé	A1172	LM24	1612	440	1546	7,0	1053,7
St Ipú	A1190	LM25	1614	450	1504	7,1	1048,4

Tabela 5.9- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Baraúna em setembro de 2009.

B: Baraúna. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
B1	264,0	24,3	68,2	3,5	429,1	26,1	ND	320,7	2,5	3,3	25,5	0,16
B2	128,0	291,6	463,8	10,1	1340,3	81,5	ND	408,2	1,3	60,8	71,5	ND
B3	104,0	46,2	43,1	6,8	82,0	48,9	ND	539,4	0,9	0,4	ND	0,01
B4	144,0	14,6	39,8	3,5	53,0	23,2	ND	539,4	1,4	0,4	15,4	0,02
B5	160,0	4,9	78,1	3,5	130,2	28,2	ND	583,2	1,2	0,4	20,2	0,06
B6	144,0	21,9	82,2	3,5	149,5	44,2	ND	524,8	1,7	0,6	34,3	0,7
B7	108,0	60,8	120,1	5,1	245,9	46,6	ND	510,3	1,5	0,4	37,3	0,03
B8	148,0	26,7	125,0	3,5	303,7	45,1	ND	539,4	0,9	0,9	39,3	0,09
B9	132,0	41,3	82,2	5,1	163,9	39,2	ND	539,4	2,3	0,7	30,9	0,01
B10	80,0	26,7	30,4	3,5	38,6	21,0	ND	335,3	1,3	0,8	14,0	0,05
B11	120,0	26,7	64,6	3,5	106,1	20,9	ND	495,7	1,9	1,6	29,4	0,07
B12	120,0	34,0	66,3	3,5	106,1	41,5	ND	524,8	2,1	0,2	19,7	0,11
B13	132,0	34,0	60,6	3,5	115,7	30,1	ND	510,3	1,0	0,3	26,0	0,12
B14	144,0	19,4	70,1	3,5	159,1	29,9	ND	466,5	0,9	0,5	32,4	0,26
B15	64,0	68,0	122,5	6,8	236,2	54,9	ND	393,6	0,4	2,6	22,6	0,10
B16	88,0	87,5	156,2	6,8	279,6	72,6	ND	495,7	1,7	0,3	81,2	0,04
B17	116,0	325,6	780,8	3,5	1697,1	150,6	ND	685,2	2,6	13,0	36,3	0,04
B18	148,0	51,0	194,2	5,1	414,6	73,1	ND	539,4	2,4	2,1	29,4	0,30
B19	148,0	41,3	84,3	3,5	197,7	35,1	ND	495,7	1,2	0,5	26,0	0,04
B20	164,0	21,9	55,1	3,5	130,2	25,7	ND	495,7	0,8	0,4	30,4	ND
B21	28,0	77,8	49,9	3,5	77,1	25,8	ND	452,0	1,2	1,5	21,6	0,07

Continuação da **Tabela 5.9**. Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Baraúna em setembro de 2009. Concentrações em mg/L. B: Baraúna. ND: não detectado.

Poço	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
B22	120,0	34,0	76,1	3,5	130,2	27,4	ND	466,5	0,9	0,3	18,7	0,06
B23	104,0	170,1	321,8	5,1	559,3	175,9	ND	699,8	7,9	17,7	33,9	0,20
B24	136,0	68,0	136,4	10,1	327,8	46,7	ND	539,4	1,8	0,4	20,2	0,01
B25	136,0	34,0	70,1	5,1	173,6	31,0	ND	437,4	1,6	1,8	27,5	0,03
B26	84,0	63,2	57,0	3,5	110,9	27,9	ND	481,1	1,6	2,6	24,5	0,01
B27	88,0	111,8	370,3	3,5	703,9	156,1	ND	379,1	2,1	2,1	78,5	2,29
B28	68,0	31,6	35,0	6,8	53,0	23,8	ND	364,5	2,4	4,7	20,7	0,33
B29	64,0	24,3	128,7	16,3	173,6	41,5	ND	437,4	2,0	1,9	1,4	ND
B30	152,0	43,7	106,1	6,8	245,9	44,8	ND	481,1	2,1	8,3	44,4	0,02
B31	112,0	41,3	76,1	3,5	154,3	33,7	ND	422,8	1,8	1,5	37,8	0,10
B32	108,0	34,0	76,1	5,1	135,0	29,2	ND	393,6	2,0	0,5	26,5	0,01
B33	200,0	68,0	210,4	6,8	554,4	71,2	ND	481,1	1,4	1,6	32,9	ND
B34	188,0	58,3	164,3	13,2	462,8	46,7	ND	524,8	1,6	0,5	32,9	ND
B35	68,0	75,3	33,5	6,8	62,7	27,4	ND	539,4	2,1	47,0	36,8	0,12
B36	132,0	89,9	210,4	19,2	467,7	94,8	ND	568,6	1,8	0,9	ND	0,02
B37	92,0	41,3	46,4	10,1	135,0	40,2	ND	379,1	1,2	2,6	26,5	0,01
B38	120,0	12,1	28,9	2,9	77,1	17,5	ND	408,2	0,8	1,2	20,2	0,03
B39	116,0	24,3	31,9	5,1	86,8	33,3	ND	408,2	1,4	1,2	27,9	ND
B40	120,0	29,2	30,4	6,8	96,4	27,4	ND	437,4	1,1	8,3	20,7	0,70
B41	152,0	58,3	106,1	6,8	279,6	29,1	ND	554,0	1,5	2,6	21,1	ND
B42	116,0	26,7	72,1	6,8	86,8	19,0	ND	466,5	2,5	67,0	65,1	0,30

Tabela 5.10- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Baraúna em janeiro de 2010.

B: Baraúna. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
B2	136,0	208,9	400,6	6,8	1031,7	249,7	602,5	ND	0,9	0,5	26,5	0,32
B8	184,0	77,7	187,4	6,8	477,3	78,7	554,9	ND	1,7	0,4	33,4	ND
B9	140,0	43,7	80,1	6,8	134,9	38,0	634,2	ND	1,6	0,3	25,5	ND
B12	132,0	46,2	64,4	6,8	120,5	35,7	570,7	ND	1,8	0,4	18,3	ND
B13	132,0	7,3	56,9	6,8	91,6	26,9	570,7	ND	1,4	0,5	17,3	0,10
B15	132,0	58,3	110,7	6,8	245,9	80,9	570,7	ND	2,1	0,4	25,0	0,01
B16	76,0	75,33	117,7	6,8	226,6	85,3	364,6	62,4	1,6	0,8	63,0	0,09
B17	120,0	529,4	884,6	6,8	2584,2	740,2	253,7	155,9	1,6	2,6	32,9	ND
B18	96,0	80,2	168,5	6,8	379,1	121,0	364,6	31,2	2,1	5,6	18,7	ND
B19	140,0	26,8	72,1	6,8	173,6	31,5	428,1	ND	ND	0,4	30,9	ND
B22	136,0	31,6	64,4	6,8	134,9	25,6	491,5	ND	1,5	0,5	21,6	ND
B23	136,0	24,3	68,2	6,8	168,7	32,4	475,6	ND	3,8	0,4	28,9	ND
B25	132,0	12,2	66,3	6,8	139,8	29,2	317,1	46,8	2,4	0,5	28,9	0,03
B26	132,0	9,7	53,4	6,8	106,1	28,7	396,4	ND	2,0	9,1	9,7	ND
B27	72,0	72,9	331,3	6,8	429,1	187,9	586,6	ND	1,3	1,3	56,2	1,13
B30	152,0	51,0	108,4	6,8	260,3	57,8	523,2	ND	1,3	0,4	33,9	ND
B31	156,0	19,4	80,11	6,8	173,6	38,0	364,6	46,8	2,2	17,7	41,4	0,08
B32	148,0	9,7	72,9	6,8	125,4	27,1	507,3	ND	1,7	0,6	25,5	ND
B38	120,0	4,9	56,9	6,8	86,8	27,9	491,5	ND	1,8	0,8	18,7	0,01
B40	144,0	19,4	49,9	6,8	120,5	56,1	475,6	ND	1,2	0,7	17,8	0,07

Continuação da **Tabela 5.10-** Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Baraúna em janeiro de 2010. Concentrações em mg/L. B: Baraúna. ND: não detectado.

Poço	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
B42	116,0	24,3	72,1	6,8	120,5	30,3	859,8	ND	0,7	0,6	21,2	0,29
B43	76,0	ND	56,9	6,8	67,5	34,4	380,5	ND	0,9	0,4	38,8	3,00
B44	92,0	24,3	46,4	6,8	62,7	25,2	412,2	ND	1,5	1,5	23,6	ND
B45	148,0	29,2	80,1	6,8	173,6	39,2	507,3	ND	2,1	0,4	30,4	0,05
B46	152,0	38,9	106,1	6,8	255,5	53,7	507,3	ND	1,6	0,4	33,4	ND
B47	140,0	21,9	56,95	6,8	149,5	30,3	348,7	ND	1,7	0,4	30,4	ND
B48	152,0	43,7	76,1	6,8	159,1	36,3	602,5	ND	1,6	0,4	22,1	ND
B49	132,0	34,0	51,6	6,8	144,6	32,3	475,6	ND	1,6	0,4	28,9	ND
B50	164,0	51,0	134,9	10,1	366,4	41,9	491,5	ND	1,7	0,6	37,3	ND

Tabela 5.11- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Mossoró em setembro de 2009.

M: Mossoró. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
M1	304,0	140,9	380,3	10,1	1263,2	63,9	ND	379,0	0,7	0,6	32,9	ND
M2	200,0	209,0	821,7	20,7	1976,7	76,8	ND	349,9	1,6	1,1	ND	0,02
M3	424,0	204,1	760,6	22,1	2198,5	48,1	ND	320,7	1,4	0,6	29,9	0,04
M4	120,0	60,8	97,1	5,1	202,5	49,2	ND	583,2	1,1	0,4	3,7	0,01
M5	88,0	58,3	44,7	6,8	72,3	49,5	ND	568,6	0,6	0,6	ND	0,06
M6	252,0	58,3	321,8	5,1	737,6	52,7	ND	670,6	0,9	1,7	23,6	0,14
M7	188,0	24,3	207,6	5,1	356,8	150,9	ND	554,0	1,1	0,6	24,5	0,05
M8	136,0	36,5	108,4	5,1	192,9	30,1	ND	583,2	1,1	2,6	9,7	0,04
M9	76,0	68,0	66,3	10,1	1263,2	63,9	ND	379,1	0,7	0,6	32,9	ND
M10	888,0	860,2	4108,6	111,3	9931,7	144,1	ND	466,5	6,0	0,6	ND	0,04
M11	336,0	301,3	1726,9	46,9	3895,5	177,3	ND	524,8	2,0	1,4	3,2	ND
M12	432,0	189,5	1060,9	19,2	2680,6	54,6	ND	379,1	1,8	0,5	20,7	ND
M13	48,0	26,7	31,9	24,8	57,9	15,0	ND	291,6	1,1	2,6	10,7	ND
M14	124,0	43,7	120,1	10,1	231,4	32,6	ND	554,0	0,6	0,6	8,3	0,03
M15	100,0	68,0	94,9	5,1	212,1	33,8	14,3	437,4	1,6	0,5	27,0	ND
M16	168,0	77,8	164,3	5,1	400,2	59,8	14,3	422,8	1,6	0,2	34,3	ND
M17	128,0	102,1	360,4	6,8	732,8	140,8	ND	554,0	2,1	6,3	56,2	0,01
M18	96,0	92,3	350,6	10,1	732,8	48,4	ND	379,1	2,2	0,7	23,6	0,03
M19	200,0	102,1	370,3	10,1	935,3	115,8	ND	524,8	2,5	0,7	33,9	0,21
M20	136,0	277,0	210,4	16,3	1137,8	128,1	14,3	349,9	1,5	0,4	ND	ND
M21	60,0	162,8	128,7	19,2	255,5	182,9	ND	685,2	2,1	0,4	ND	0,03

Continuação da **Tabela 5.11-** Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Mossoró em setembro de 2009. Concentrações em mg/L. M: Mossoró. ND: não detectado.

Poço	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻ ₂	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
M22	60,0	75,3	99,3	16,3	207,3	1,4	ND	554,0	1,1	1,6	24,5	1,6
M23	136,0	94,8	198,8	10,1	607,5	1,0	ND	524,8	1,5	0,5	27,9	0,04
M24	80,0	75,3	76,1	27,5	303,7	34,5	ND	495,7	1,4	2,5	21,1	0,23
M25	360,0	68,0	258,0	13,2	896,7	63,9	ND	524,8	2,2	120,7	94,5	1,9
M26	100,0	111,8	160,2	16,3	395,3	75,0	ND	539,4	2,3	0,9	8,8	0,53
M27	180,0	58,3	144,2	11,6	400,2	50,8	ND	510,3	2,1	0,4	27,9	0,01
M28	168,0	4,9	115,4	17,0	265,2	29,5	0,0	524,8	2,2	1,3	10,2	0,04
M29	456,0	277,0	576,9	41,3	2420,2	20,5	0,0	175,0	3,1	0,4	7,4	0,0
M30	336,0	432,5	821,7	55,6	2757,7	93,3	0,0	58,3	4,3	3,4	330,8	0,01

Tabela 5.12- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Mossoró em janeiro de 2010.

M: Mossoró. STD: Sólidos Totais Dissolvidos. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
M1	304,0	116,6	339,1	13,2	1224,6	109,9	190,3	62,4	1,8	0,7	37,8	0,01
M3	472,0	247,9	426,9	24,8	2294,9	40,9	63,4	62,4	1,2	1,1	30,9	0,21
M5	96,0	55,9	39,8	6,8	67,5	45,1	570,7	ND	0,7	0,3	ND	ND
M6	176,0	43,7	320,5	6,8	781,1	85,3	ND	93,6	0,9	0,5	32,9	ND
M7	196,0	26,7	160,2	6,8	356,8	61,6	554,9	ND	0,2	0,6	26,5	ND
M8	128,0	36,5	103,8	6,8	197,7	66,2	539,1	ND	1,9	1,6	9,3	0,12
M9	64,0	72,9	58,8	13,2	168,7	46,9	364,6	14,3	0,5	0,5	0,5	ND
M11	216,0	213,8	1323,7	45,1	3114,5	89,5	222,0	93,6	2,4	1,3	6,5	ND
M12	392,0	170,1	927,5	22,1	2555,2	166,5	253,7	14,3	1,3	0,4	28,4	0,03
M15	148,0	41,3	84,3	6,8	274,8	67,1	491,7	ND	1,9	0,8	22,6	0,04
M17	224,0	140,9	442,3	10,1	1205,3	217,8	222,0	93,6	1,1	0,7	28,9	ND
M19	180,0	53,5	232,1	6,8	472,5	140,2	443,9	31,2	1,8	1,3	27,9	ND
M21	132,0	131,2	125,0	22,1	241,1	313,5	745,1	ND	0,6	1,2	ND	ND
M22	124,0	29,2	97,1	19,2	173,6	71,4	507,3	ND	1,5	3,9	27,5	ND
M23	212,0	77,8	187,4	6,8	568,9	109,9	539,1	ND	1,4	0,4	31,9	0,07
M24	152,0	60,8	76,1	6,8	303,7	63,3	507,3	ND	1,2	0,9	18,7	ND
M26	96,0	58,3	78,1	10,1	154,8	97,8	443,9	31,2	3,2	1,1	5,1	1,73
M30	20,0	12,2	331,3	16,3	520,7	10,2	79,3	ND	2,9	0,5	8,8	ND
M31	188,0	38,9	206,4	6,8	424,3	82,4	570,7	ND	1,1	2,6	30,9	0,07
M32	360,0	43,7	272,7	10,1	887,1	144,8	221,9	62,4	2,2	111,1	69,9	ND
M33	304,0	150,7	576,9	19,2	1812,8	73,6	158,5	93,6	1,6	0,8	27,5	ND
M34	188,0	36,5	175,1	6,8	433,9	99,0	428,1	15,6	1,9	0,4	30,4	ND
M35	192,0	53,5	190,9	6,8	559,3	55,2	317,1	31,2	1,7	0,6	27,9	ND

Tabela 5.13- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Jaguaruana em setembro de 2009.

J: Jaguaruana. STD: Sólidos Totais Dissolvidos. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
J1	148,0	41,3	353,8	6,8	482,1	156,1	28,7	568,6	1,1	1,3	129,2	6,11
J2	116,0	31,6	60,6	3,5	125,4	36,5	ND	437,4	1,3	0,4	20,2	ND
J3	136,0	34,0	303,1	3,5	520,7	76,8	14,3	233,3	1,3	131,9	32,4	0,09
J4	200,0	97,2	266,8	27,5	829,3	144,8	14,3	233,3	1,5	0,5	16,3	0,01
J5	200,0	58,3	232,1	10,1	684,6	64,8	14,3	262,4	1,4	9,3	17,3	0,21
J6	120,0	26,7	92,8	3,5	149,5	44,1	ND	408,2	1,4	1,3	23,6	ND
J7	72,0	24,3	122,5	22,1	188,0	63,9	14,3	247,8	1,4	6,4	14,4	0,05
J8	100,0	19,4	35,0	6,8	38,6	18,5	14,3	408,2	1,1	4,9	17,3	0,85
J9	48,0	184,7	266,8	10,1	491,8	110,1	ND	758,1	1,5	2,2	32,9	0,18

Tabela 5.14- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Jaguaruana em janeiro de 2010.

J: Jaguaruana. STD: Sólidos Totais Dissolvidos. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
J1	128,00	12,2	340,90	6,8	443,6	46,6	792,7	ND	2,2	1,9	ND	0,96
J4	208,0	140,9	257,97	34,8	896,7	300,1	63,4	93,6	1,5	1,5	8,8	0,01
J5	336,0	106,9	331,29	16,3	1205,3	217,1	95,2	93,6	1,8	11,1	20,7	0,19
J6	116,0	19,4	90,60	134,9	134,9	52,5	428,1	ND	2,8	1,3	13,9	ND
J7	248,0	179,8	331,29	39,3	1147,5	364,5	190,3	62,4	1,9	1,1	ND	ND
J8	80,0	12,2	51,59	6,8	72,3	35,1	269,5	15,6	2,3	1,7	21,1	ND
J9	92,0	92,3	160,07	6,8	361,6	95,0	332,9	46,8	1,4	2,6	29,4	ND
J10	20,0	2,4	6,55	22,1	24,1	3,6	79,3	ND	3,2	8,3	12,6	8,81

Tabela 5.15- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Quixeré e Limoeiro do Norte em setembro de 2009.

Q: Quixeré. LM: Limoeiro do Norte. STD: Sólidos Totais Dissolvidos. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
Q1	120,0	24,3	60,6	5,1	130,2	31,8	ND	437,4	0,7	5,1	17,8	0,19
Q2	152,0	41,3	94,9	6,8	260,3	26,6	ND	452,0	10,5	20,9	18,3	2,60
Q3	84,0	58,3	120,1	3,5	236,2	29,9	ND	437,4	1,1	0,3	20,7	ND
Q4	60,6	29,2	90,6	17,8	188,0	29,5	ND	306,2	40,2	2,0	27,5	0,49
Q5	132,0	26,7	49,9	3,5	144,6	33,4	ND	437,4	1,4	2,6	17,3	ND
Q6	160,0	31,6	74,1	3,5	221,8	37,0	ND	495,7	1,3	0,3	25,5	0,01
Q7	80,0	36,5	70,1	5,1	173,6	39,9	ND	364,5	1,1	0,6	1,4	ND
Q8	132,0	31,6	66,3	3,5	125,4	44,0	ND	481,1	1,6	0,3	16,3	ND
Q9	140,0	9,7	80,1	6,8	221,8	31,9	ND	291,6	1,5	0,3	68,3	ND
Q10	132,0	19,4	125,0	5,1	279,6	42,5	ND	364,5	1,2	0,4	39,3	0,01
Q11	100,0	31,6	76,1	3,5	86,8	29,6	ND	466,5	1,8	16,9	12,6	0,09
Q12	144,0	34,0	117,7	6,8	274,8	35,8	ND	379,1	1,9	0,6	36,8	0,19
Q13	92,0	21,9	49,9	61,3	86,8	23,2	ND	422,8	18,7	22,7	12,1	0,22
Q14	4,0	4,9	12,6	22,1	24,1	3,6	ND	58,3	3,1	1,3	4,6	0,50
LM15	104,0	51,0	80,1	3,5	144,6	65,7	14,3	452,0	1,6	2,2	8,8	0,13
LM16	100,0	31,6	49,9	3,5	101,3	40,6	28,7	204,1	1,4	0,5	25,5	ND

Tabela 5.16- Hidroquímica de águas subterrâneas amostradas em Quixeré e Limoeiro do Norte em janeiro de 2010.

Q: Quixeré. LM: Limoeiro do Norte. STD: Sólidos Totais Dissolvidos. ND: não detectado.

Poço	Concentrações (mg/L)											
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
Q1	132,0	17,0	78,1	10,1	149,5	33,4	317,1	15,6	2,4	140,4	36,8	ND
Q2	136,0	26,7	80,1	6,9	265,2	48,1	237,8	46,8	2,1	2,1	10,2	0,01
Q4	72,0	21,9	56,9	13,2	110,9	45,2	206,1	ND	2,3	46,1	48,9	0,44
Q5	132,0	21,9	60,6	6,8	173,6	34,1	412,2	ND	0,9	0,5	14,9	ND
Q6	204,0	29,2	76,1	6,8	284,5	38,9	475,6	ND	0,9	0,4	20,7	ND
Q7	100,0	53,5	66,3	6,8	183,2	46,9	443,9	ND	0,9	1,7	10,2	ND
Q8	132,0	21,9	62,5	6,8	120,5	30,7	491,5	ND	1,6	0,4	20,7	ND
Q11	120,0	29,2	53,4	10,1	627,0	26,6	586,6	ND	1,2	9,2	11,6	ND
Q12	168,0	21,9	115,4	10,1	265,2	72,5	412,2	ND	1,3	0,6	27,9	0,17
LM15	208,0	46,2	132,4	6,8	289,3	156,1	729,3	ND	1,5	4,9	10,2	0,1
LM16	120,0	14,6	53,4	6,8	67,5	38,4	443,9	ND	1,1	8,6	30,4	0,3
Q17	180,0	21,9	72,1	6,9	241,1	40,3	491,5	ND	2,3	0,5	17,8	0,02
Q18	168,0	17,1	86,4	10,1	255,5	38,4	443,9	ND	1,9	0,7	23,6	ND
Q19	164,0	36,5	120,2	6,8	306,6	75,4	459,8	ND	2,1	0,4	30,4	ND
Q20	88,0	68,1	74,7	6,8	130,2	182,2	348,8	ND	1,4	1,4	40,9	ND
Q21	156,0	51,4	129,9	16,3	308,6	129,9	412,2	ND	1,8	0,8	75,3	0,18
Q22	132,0	43,8	129,8	6,8	327,8	83,8	412,2	ND	2,1	0,8	34,8	0,03
Q23	108,0	55,9	120,2	10,1	279,6	66,8	459,8	ND	1,7	1,3	24,5	ND
LM24	116,0	36,5	115,4	6,8	245,9	59,8	443,9	ND	1,2	0,39	27,9	ND
LM25	104,0	46,2	115,4	6,8	250,7	58,2	443,9	ND	1,2	0,43	21,6	ND

5.1- Análise Fatorial R-Modal

Para a realização deste tipo de análise foram feitas simulações usando dois conjuntos de dados. O primeiro conjunto com amostras coletadas em setembro de 2009 (97 amostras) e o segundo com dados da coleta de janeiro de 2010 (80 amostras).

Em cada uma das duas análises R-modal realizadas, cada amostra teve 15 parâmetros associados; três físico-químicos (CE, pH e dureza) e doze hidroquímicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- e Fe).

Na primeira simulação realizada, as 97 amostras com os 15 parâmetros geraram uma matriz de correlação com 15 linhas e 15 colunas, cujos dados estão apresentados na tabela 5.17. Com base nessa matriz tem-se que a condutividade elétrica está bem relacionada com a dureza ($r = 0,973$) e as concentrações de cloretos ($r = 0,989$), de sódio ($r = 0,984$), de magnésio ($r = 0,929$), de cálcio ($r = 0,873$) e de potássio ($r = 0,789$). Essa tabela mostra também que o pH está melhor correlacionado com a concentração de bicarbonato ($r = 0,649$), que o sulfato está melhor correlacionado com a concentração de magnésio ($r = 0,524$) e que a melhor (ainda que baixa) correlação do ferro é com a concentração de carbonatos ($r = 0,366$).

Na análise fatorial R-modal para a obtenção das cargas fatoriais, utilizou-se a rotação do tipo Varimax que define bem as cargas dos fatores que serão extraídos. Para obter a máxima explicação possível da variância dos dados, não foi adotado o critério Kaiser na quantificação dos fatores que devem ser extraídos; em outras palavras, foram escolhidos também fatores com autovalores menores do que 1 (um). Utilizando esse procedimento, foram encontrados quinze fatores que juntos explicavam 77,034% da variância dos dados.

A tabela 5.18 apresenta os resultados dessa primeira análise nos dados da coleta de setembro de 2009. Nessa tabela tem-se um resultado esperado: quanto maior é o autovalor de um fator, maior é a parcela de explicação da variância daquele fator. Observa-se assim que fatores com autovalor pequeno contribuem pouco para a explicação dos dados.

Tabela 5.17- Matriz de correlação entre as variáveis estudadas, com amostras coletadas em setembro de 2009.

	CE	pH	Dureza	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe
CE	1														
pH	-0,170	1													
Dureza	0,973	-0,195	1												
Ca⁺²	0,873	-0,188	0,887	1											
Mg⁺²	0,929	-0,179	0,960	0,725	1										
Na⁺	0,984	-0,120	0,933	0,831	0,894	1									
K⁺	0,789	-0,307	0,773	0,664	0,757	0,780	1								
Cl⁻	0,989	-0,181	0,966	0,869	0,921	0,983	0,806	1							
SO₄⁻²	0,487	0,034	0,452	0,255	0,524	0,460	0,276	0,428	1						
CO₃⁻²	-0,043	-0,185	-0,052	-0,051	-0,046	-0,036	-0,044	-0,047	0,206	1					
HCO₃⁻	-0,057	0,649	-0,071	-0,108	-0,040	-0,022	-0,237	-0,100	0,241	-0,271	1				
NH₄⁺	0,051	-0,035	0,033	-0,003	0,052	0,063	0,273	0,057	-0,012	-0,074	-0,116	1			
NO₂⁻	0,011	-0,106	0,025	0,054	0,005	0,002	-0,022	-0,001	0,037	0,091	-0,058	0,044	1		
NO₃⁻	0,136	-0,331	0,198	0,130	0,217	0,059	0,117	0,102	0,179	0,067	-0,225	0,022	0,082	1	
Fe	-0,022	0,157	-0,055	-0,019	-0,071	-0,009	-0,046	-0,042	0,203	0,366	0,089	0,090	0,143	0,288	1

Tabela 5.18- Fatores, autovalores, variância e percentual acumulativo da variância obtida para o conjunto de dados de setembro de 2009.

Fator	Autovalor	Variância (%)	Variância (% acumulativo)
1	6,524	43,495	43,495
2	1,713	11,422	54,918
3	1,267	8,451	63,370
4	0,569	3,793	67,163
5	0,539	3,598	70,762
6	0,426	2,846	73,608
7	0,155	1,039	74,648
8	0,108	0,725	75,374
9	0,087	0,581	75,955
10	0,081	0,540	76,495
11	0,044	0,294	76,790
12	0,018	0,122	76,913
13	0,011	0,075	76,988
14	0,006	0,043	77,032
15	0,0003	0,002	77,034

O percentual acumulativo de variância mostra que todos os fatores juntos explicam cerca de 77% da variância do sistema. Esta é a máxima variância que pode ser explicada por este conjunto amostral.

Adotando-se o critério Kaiser na interpretação dos fatores obtidos, ou, em outras palavras, escolhendo apenas os fatores com autovalor maior ou igual a 1 (um), os três primeiros fatores explicam 63,37% da variância dos dados. Isso significa que esses três fatores juntos explicam cerca de 82% do máximo de explicação possível, ou seja, $\{[63,37 : 77,034] \times 100\}$.

A tabela 5.19 mostra a carga fatorial de cada fator, a comunalidade e a soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Tabela 5.19- Matriz de cargas dos fatores extraídos após a rotação Varimax com amostras de setembro de 2009.

Var. = Variável; F. = Fator; Com. = Comunalidade; Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Var.	F. 1	F. 2	F. 3	F. 4	F. 5	F. 6	F. 7	F. 8	F. 9	F. 10	F. 11	F. 12	F. 13	F. 14	F. 15	Com.
Cl ⁻	0,995	-0,047	-0,013	0,016	-0,001	0,003	0,021	-0,018	-0,033	-0,041	0,001	-0,010	-0,035	0,071	0,000	1
CE	0,994	-0,017	0,000	0,017	0,028	0,083	0,015	-0,011	0,006	-0,077	-0,016	-0,057	0,000	-0,014	0,017	1
Dureza	0,982	-0,046	-0,018	-0,028	0,093	0,063	-0,036	0,021	0,049	0,074	0,009	0,008	0,143	-0,029	-0,008	1
Na ⁺	0,980	0,027	0,018	0,032	-0,061	0,045	0,033	0,019	-0,068	-0,088	-0,012	0,008	-0,137	-0,027	-0,009	1
Mg ⁺²	0,928	-0,028	-0,065	-0,026	0,131	0,224	0,019	-0,019	-0,118	0,238	0,030	0,011	0,028	-0,002	0,000	1
Ca ²⁺	0,882	-0,073	0,056	-0,031	0,014	-0,178	-0,109	0,075	0,305	-0,045	-0,015	0,001	0,014	-0,001	0,000	0,934
K ⁺	0,790	-0,235	0,017	-0,060	-0,044	0,022	0,370	-0,103	0,000	0,017	-0,054	0,204	0,000	-0,001	0,000	0,879
HCO ₃ ⁻	-0,047	0,864	-0,022	-0,101	0,007	0,156	-0,061	0,028	0,025	-0,033	-0,150	0,030	-0,006	-0,001	0,000	0,815
pH	-0,142	0,806	0,122	-0,038	-0,180	-0,091	0,014	-0,052	-0,042	0,038	0,199	-0,047	0,005	0,000	0,000	0,777
Fe	-0,040	0,109	0,755	0,215	0,155	0,071	0,049	0,023	0,005	-0,003	0,004	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,622
CO ₃ ⁻²	-0,053	-0,217	0,253	0,715	-0,006	0,107	-0,052	0,005	-0,003	-0,002	0,000	-0,002	-0,001	0,000	0,000	0,641
NO ₃ ⁻	0,113	-0,244	0,227	-0,003	0,672	0,079	-0,006	0,030	0,001	0,008	-0,004	-0,002	0,004	0,000	0,000	0,583
SO ₄ ⁻²	0,429	0,197	0,155	0,200	0,110	0,598	-0,027	0,007	-0,022	0,008	-0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,659
NH ₄ ⁺	0,051	-0,069	0,096	-0,078	0,001	-0,034	0,579	0,026	-0,021	-0,002	0,015	-0,028	-0,002	0,000	0,000	0,361
NO ₂ ⁻	0,002	-0,088	0,156	0,029	0,155	0,020	0,016	0,378	0,040	-0,005	-0,011	-0,015	0,000	0,000	0,000	0,203
Σ :	6,399	1,635	0,768	0,625	0,578	0,510	0,498	0,166	0,120	0,083	0,067	0,049	0,041	0,007	0,0004	11,555

O primeiro fator, Fator 1, permite definir boa associação entre a condutividade elétrica, a dureza e as concentrações de cloretos, sódio, magnésio, cálcio e potássio. Esse fator representa os aerossóis de origem marinha que são carregados do litoral para o interior dos Estados, onde estão os poços amostrados, pela ação das correntes de vento, sendo compostos principalmente por cloretos de sódio e de potássio. A boa correlação entre a condutividade elétrica e as concentrações de cloretos e de sódio é mostrada na tabela 5.17. A presença da dureza no Fator 1 revela influência litológica do Calcário Jandaíra. Tem-se então no primeiro fator:

$$\text{Fator 1: Cl}^-, \text{CE, Dureza, Na}^+, \text{Mg}^{+2}, \text{Ca}^{+2} \text{ e K}^+ \quad (5.1)$$

As maiores cargas no segundo fator, Fator 2, são obtidas com os parâmetros bicarbonato e no pH. Essa relação mostra traços de dissolução de rochas constituídas por carbonatos de cálcio, como a calcita, CaCO_3 , presente nas rochas da região estudada, o calcário Jandaíra. Tem-se então no segundo fator:

$$\text{Fator 2: HCO}_3^- \text{ e pH} \quad (5.2)$$

Poucas rochas na região são sulfatadas, por isso o íon sulfato teve carga significativa em um fator que explica pouco da variância dos dados (Fator 6). Os íons nitrogenados, amônio NH_4^+ , nitrito NO_2^- e nitrato NO_3^- , apresentaram carga significativa em alguns dos fatores.

Dos fatores 3 a 7 ocorre o domínio de uma só variável em cada um deles: o ferro no Fator 3, o carbonato no Fator 4, o nitrato no Fator 5, o sulfato no Fator 6 e o amônio no Fator 7. Juntos, esses cinco fatores respondem por 19,72% da variância dos dados (tabela 5.18). Essa característica de domínio de uma só variável em cada fator indica uma mistura parcial de diferentes tipos de água (Reghunath et al. (2002).

Os fatores onde os íons nitrogenados tiveram carga fatorial significativa (nitrato no Fator 5, amônio no Fator 7 e nitrito no fator 8) explicam pouco da variância, (o Fator 5 explica 3,6%, o Fator 7 responde por 1,04%, e o Fator 8 explica 0,725%) indicando que existe uma leve ação antrópica nas águas da região.

Os fatores restantes, do 8 ao 15, tem, em geral, baixa ou muito baixa carga fatorial em todas as variáveis, podendo ser desprezados em relação aos demais; todos esses fatores juntos respondem por apenas 2,38% da variância (tabela 5.18). Os sete primeiros fatores podem ser considerados como representantes do modelo fatorial, pois explicam 74,65% da variância.

A figura 5.1 obtida com o software WinStat, mostra a projeção dos centróides de cada parâmetro representado graficamente no espaço bidimensional dos dois principais fatores obtidos, o Fator 1 e o Fator 2. Quanto mais próximo de 1 (um) for a carga da variável no fator, mais próxima de 100% é a sua contribuição para a formação daquele fator. Da figura é fácil ver que quem mais contribuiu para a formação do Fator 2 foram os parâmetros bicarbonatos e pH.

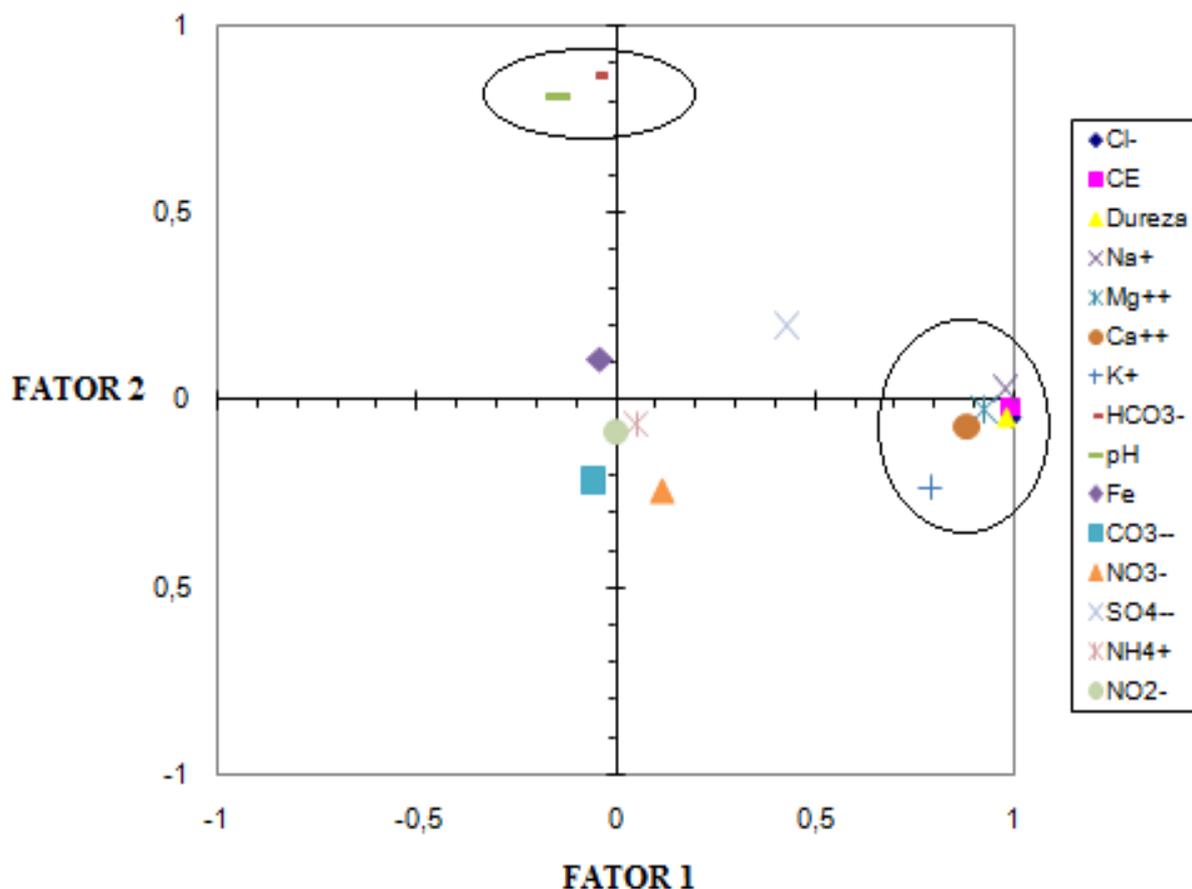


Figura 5.1- Projeção dos centróides de cada parâmetro no espaço bidimensional dos fatores 1 e 2.

A figura 5.2 é um gráfico de barras que indica o percentual de contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores. De maneira semelhante, quanto mais próximo de 1 (um) for a carga da variável no fator, mais próxima de 100% é a sua contribuição para a formação daquele fator. Na figura, vê-se claramente que as maiores contribuições para a formação do Fator 1 vieram da condutividade elétrica, da dureza e das concentrações de cloretos, sódio, magnésio, cálcio e potássio.

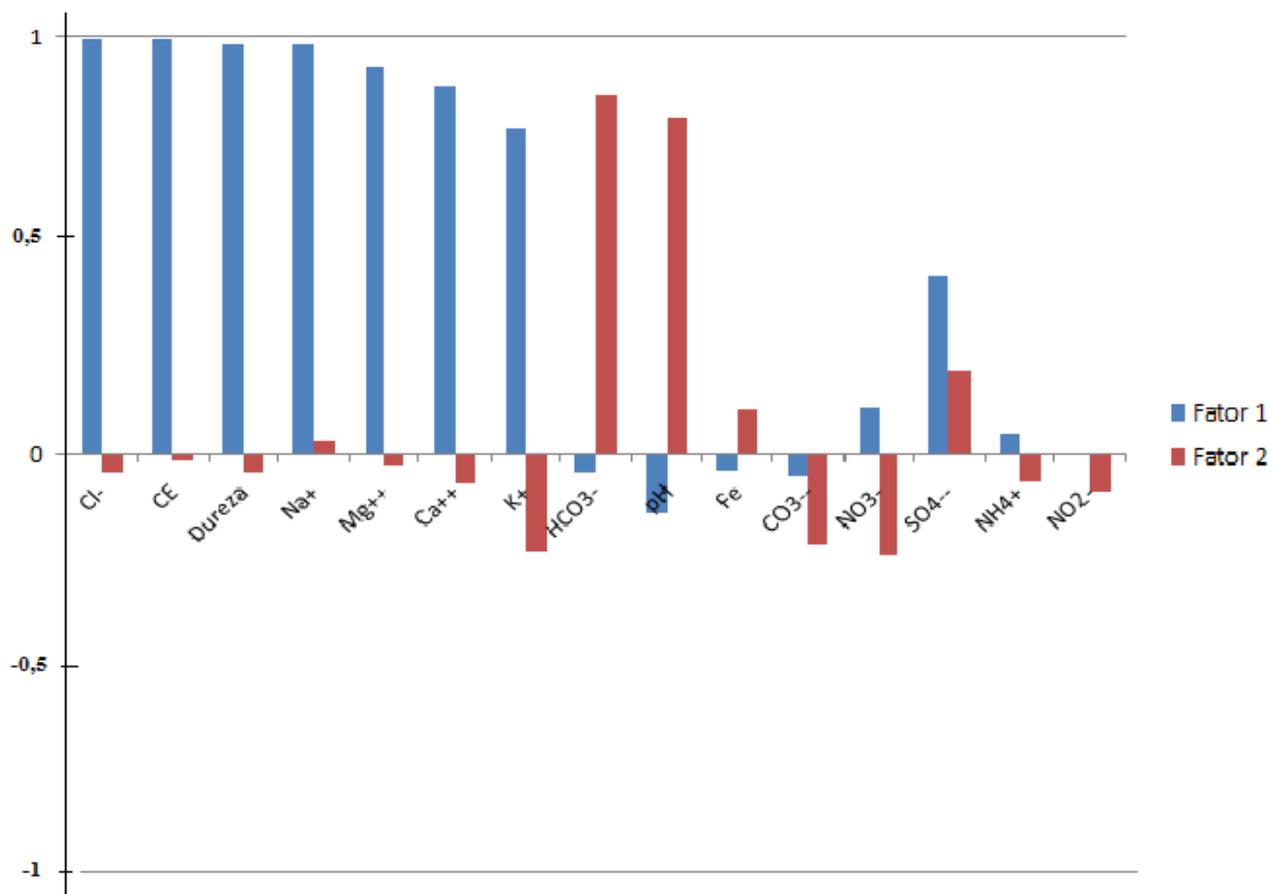


Figura 5.2- Contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores, Fator 1 e Fator 2.

A segunda simulação foi realizada com dados da coleta de janeiro de 2010, com 80 amostras, cada uma delas com 15 parâmetros associados. A tabela 5.20 mostra a matriz de correlação para esses dados com 15 linhas e 15 colunas. Esta matriz mostra que a condutividade elétrica está bem relacionada com a dureza ($r = 0,914$) e com as concentrações de cloreto ($r = 0,986$), sódio ($r = 0,954$), magnésio ($r = 0,837$) e carbonatos ($r = 0,722$), mostrando também que o pH não exibe correlação com nenhuma variável.

Para obtenção das cargas fatoriais utilizou-se novamente a rotação do tipo Varimax. Para obter a máxima explicação possível da variância dos dados, não foi adotado o critério Kaiser na quantificação dos fatores que devem ser extraídos. Dessa forma, foram escolhidos os fatores com autovalores menores do que 1 (um). Com este procedimento, foram encontrados quinze fatores que juntos explicam 75,107% da variância dos dados.

Tabela 5.20- Matriz de correlação entre as variáveis estudadas, com amostras coletadas em janeiro de 2010.

	CE	pH	Dureza	Ca⁺²	Mg⁺²	Na⁺	K⁺	Cl⁻	SO₄⁻²	CO₃⁻²	HCO₃⁻	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	Fe
CE	1														
pH	-0,120	1													
Dureza	0,914	-0,139	1												
Ca⁺²	0,615	-0,266	0,729	1											
Mg⁺²	0,837	-0,024	0,906	0,365	1										
Na⁺	0,954	-0,070	0,780	0,494	0,753	1									
K⁺	0,210	0,051	0,156	0,122	0,133	0,222	1								
Cl⁻	0,986	-0,111	0,896	0,653	0,812	0,949	0,227	1							
SO₄⁻²	0,591	0,020	0,701	0,193	0,832	0,531	0,103	0,531	1						
CO₃⁻²	0,722	-0,097	0,706	0,431	0,691	0,644	0,142	0,704	0,600	1					
HCO₃⁻	-0,435	0,045	-0,354	-0,304	-0,298	-0,371	-0,213	-0,461	-0,177	-0,651	1				
NH₄⁺	-0,050	0,020	-0,157	-0,116	-0,157	0,002	0,238	-0,037	-0,127	0,054	-0,264	1			
NO₂⁻	-0,091	-0,039	-0,095	-0,059	-0,094	-0,076	-0,001	-0,077	-0,067	-0,003	-0,119	0,184	1		
NO₃⁻	0,078	0,204	0,116	0,165	0,063	0,033	-0,163	0,021	0,158	0,087	-0,065	-0,035	0,159	1	
Fe	-0,139	0,216	-0,199	-0,253	-0,090	-0,096	0,045	-0,107	-0,093	-0,085	-0,175	0,259	-0,009	-0,065	1

Na tabela 5.21 estão os resultados com os dados da coleta de janeiro de 2010, apresentando os fatores, o autovalor correspondente a cada fator, a variância e o percentual acumulativo de explicação da variância. Essa tabela mostra também que quanto maior é o autovalor de um fator, maior é a parcela de explicação da variância correspondente aquele fator. Fatores com pequeno autovalor contribuem pouco para a explicação dos dados. O percentual acumulativo de variância mostra que todos os fatores juntos explicam cerca de 75% da variância do sistema; esta é a máxima variância que pode ser explicada por este conjunto amostral.

Tabela 5.21- Fatores, autovalores, variância e percentual acumulativo da variância obtida para o conjunto de dados de janeiro de 2010.

Fator	Autovalor	Variância (%)	Variância (% acumulativo)
1	6,284	41,896	41,896
2	1,379	9,193	51,090
3	1,055	7,036	58,127
4	0,773	5,159	63,286
5	0,551	3,678	66,964
6	0,381	2,545	69,510
7	0,282	1,880	71,391
8	0,258	1,726	73,117
9	0,118	0,788	73,905
10	0,092	0,617	74,523
11	0,030	0,204	74,728
12	0,028	0,187	74,916
13	0,013	0,089	75,005
14	0,012	0,082	75,087
15	0,003	0,020	75,107

Tabela 5.22- Matriz de cargas dos fatores extraídos após a rotação Varimax com amostras de janeiro de 2010.

Var. = Variável; F. = Fator; Com. = Comunalidade; Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Var.	F. 1	F. 2	F. 3	F. 4	F. 5	F. 6	F. 7	F. 8	F. 9	F. 10	F. 11	F. 12	F. 13	F. 14	F. 15	Com.
Cl ⁻	0,972	-0,160	0,013	0,152	-0,024	-0,026	-0,022	0,010	0,050	0,012	0,026	-0,007	-0,014	-0,067	-0,039	1
Na ⁺	0,969	-0,095	0,006	-0,023	0,001	0,063	0,005	-0,053	0,032	-0,040	-0,136	-0,088	-0,004	-0,017	0,042	0,988
CE	0,967	-0,148	0,085	0,169	0,021	0,004	-0,022	-0,036	0,013	-0,035	-0,015	-0,016	0,020	0,095	-0,010	1
Dureza	0,852	-0,081	0,325	0,357	0,052	-0,097	-0,056	-0,002	0,013	0,003	0,190	0,039	-0,018	-0,010	0,011	1
Mg ⁺²	0,829	-0,054	0,511	-0,026	-0,031	-0,084	0,029	0,029	-0,017	0,071	0,052	0,197	0,008	-0,003	0,001	1
CO ₃ ⁻²	0,601	-0,600	0,332	0,057	0,053	-0,048	-0,091	-0,076	0,025	-0,069	-0,022	0,014	0,163	0,005	0,000	0,888
HCO ₃ ⁻	-0,341	0,789	0,024	-0,076	-0,012	-0,149	-0,026	-0,123	-0,038	-0,049	-0,010	0,004	0,058	0,002	0,000	0,792
SO ₄ ⁻²	0,560	-0,062	0,737	-0,085	0,087	-0,017	0,054	-0,035	-0,046	-0,026	-0,014	-0,046	-0,003	0,002	-0,001	0,886
Ca ²⁺	0,516	-0,093	-0,088	0,706	0,084	-0,052	-0,104	-0,094	-0,003	-0,010	-0,005	-0,003	0,002	0,001	-0,001	0,891
NO ₃ ⁻	0,040	-0,038	0,093	0,120	0,684	-0,013	0,137	-0,042	-0,077	0,033	0,001	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,522
NH ₄ ⁺	-0,100	-0,237	-0,067	-0,103	-0,013	0,611	0,005	0,179	0,157	0,046	-0,007	-0,006	-0,002	0,000	0,000	0,515
pH	-0,076	0,016	0,066	-0,164	0,154	0,003	0,652	0,121	0,045	-0,020	-0,002	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,504
Fe	-0,095	-0,170	-0,043	-0,168	-0,060	0,170	0,149	0,611	0,031	-0,021	0,002	0,002	-0,003	0,000	0,000	0,499
K ⁺	0,176	-0,100	-0,082	-0,001	-0,130	0,194	0,066	0,038	0,566	-0,004	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,430
NO ₂ ⁻	-0,098	-0,138	-0,040	-0,058	0,238	0,224	-0,095	-0,079	-0,011	0,377	0,003	0,012	-0,007	-0,001	0,000	0,299
Σ :	5,363	1,180	1,066	0,859	0,592	0,540	0,508	0,467	0,363	0,162	0,059	0,051	0,031	0,014	0,003	11,266

Adotando novamente o critério Kaiser na interpretação dos fatores obtidos, isto é, escolhendo fatores com autovalor maior ou igual a 1 (um), os três primeiros fatores explicam 58,12% da variância dos dados. Isto quer dizer que esses três fatores explicam cerca de 77,5% do máximo de explicação possível, isto é, $[(58,127 : 75) \times 100]$.

A tabela 5.22 mostra a carga fatorial de cada fator, a comunalidade e a soma dos quadrados das cargas fatoriais.

O primeiro fator, Fator 1, permite definir boa associação entre a condutividade elétrica e as concentrações de cloretos, sódio e magnésio. Esse fator representa os aerossóis de origem marinha, sendo carregados do litoral para o interior dos Estados, onde estão os poços amostrados, pela ação das correntes de vento, sendo compostos principalmente por cloreto de sódio. A presença da dureza novamente no Fator 1 reforça a idéia de influência do calcário Jandaíra. Tem-se então no primeiro fator:

Fator 1: Cl^- , Na^+ , CE, Dureza e Mg^{+2}

(5.3)

A maior carga no segundo fator, Fator 2, foi obtida com o parâmetro bicarbonato, representando a recarga do aquífero com água de chuva. Tem-se então no segundo fator:

Fator 2: HCO_3^-

(5.4)

Observa-se que dos fatores 3 a 8 ocorre novamente o domínio de uma só variável em cada fator: o sulfato no Fator 3, o cálcio no Fator 4, o nitrato no Fator 5, o amônio no Fator 6, o pH no Fator 7 e o ferro no Fator 8. Juntos, esses seis fatores respondem por cerca de 22 % da variância dos dados (ver tabela 5.21). Essa característica de domínio de uma só variável em cada fator indica novamente que há mistura parcial de diferentes tipos de água no mês de janeiro de 2010, início do período de recarga do aquífero.

Os fatores restantes, do 9 ao 15, tem, em geral, baixa ou muito baixa carga fatorial em todas as variáveis, podendo ser desprezados em relação aos demais. Todos esses fatores juntos respondem por apenas 1,98% da variância (tabela 5.18). Os oito primeiros fatores podem ser considerados como representantes do modelo fatorial, pois explicam 73,11% da variância.

A figura 5.3 mostra a projeção dos centróides de cada parâmetro representado graficamente no espaço bidimensional dos dois principais fatores fornecidos pelo programa WinStat, o Fator 1 e o Fator 2. Esse gráfico mostra que as variáveis condutividade elétrica, cloreto, sódio, dureza e magnésio foram as que mais contribuíram para a formação do primeiro fator, Fator 1.

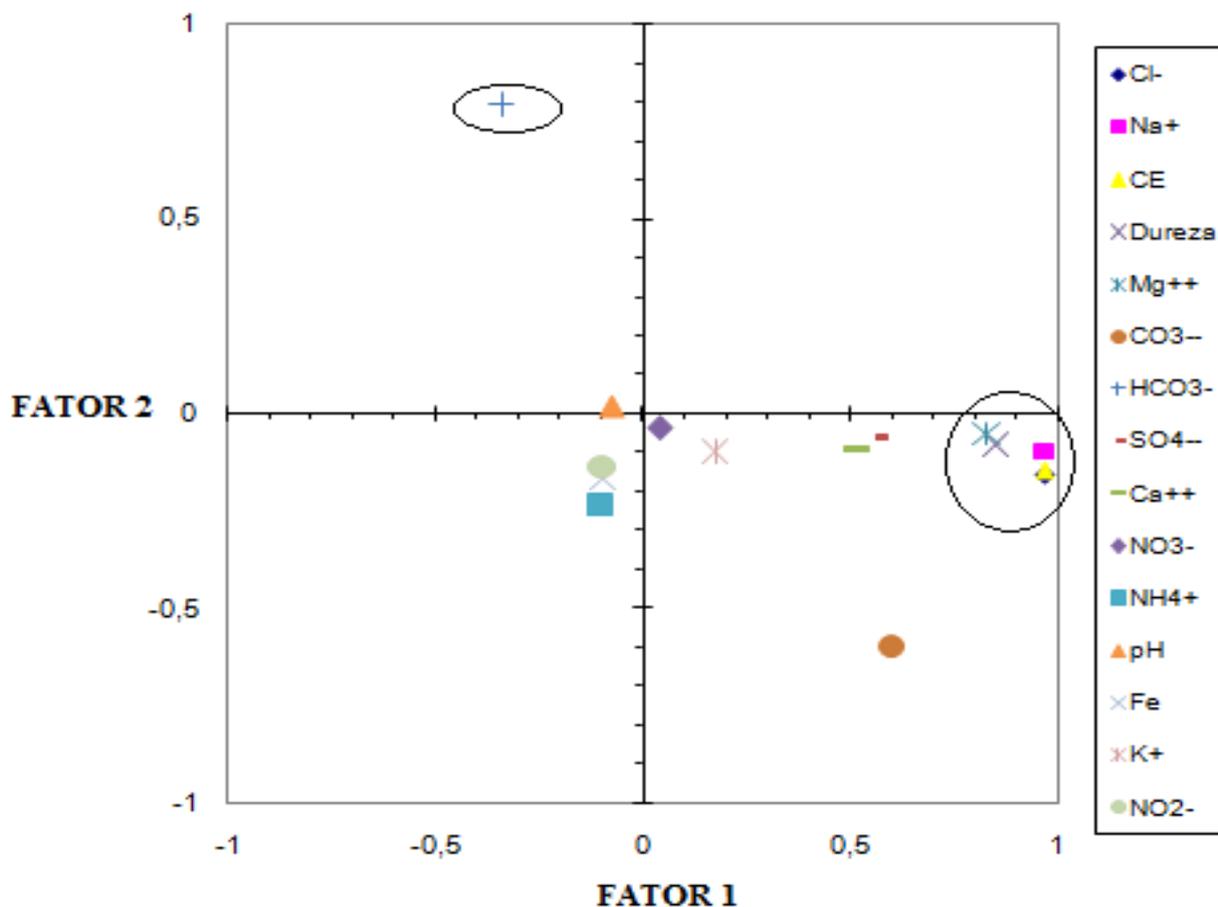


Figura 5.3- Projeção dos centróides de cada parâmetro no espaço bidimensional dos fatores 1 e 2.

A figura 5.4 é um gráfico de barras que indica o percentual de contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores. De maneira semelhante, quanto mais próximo de 1 (um) for a carga da variável no fator, mais próxima de 100% é a sua contribuição para a formação daquele fator. Na figura, vê-se claramente que as maiores contribuições para a formação do Fator 2 veio apenas do parâmetro bicarbonato.

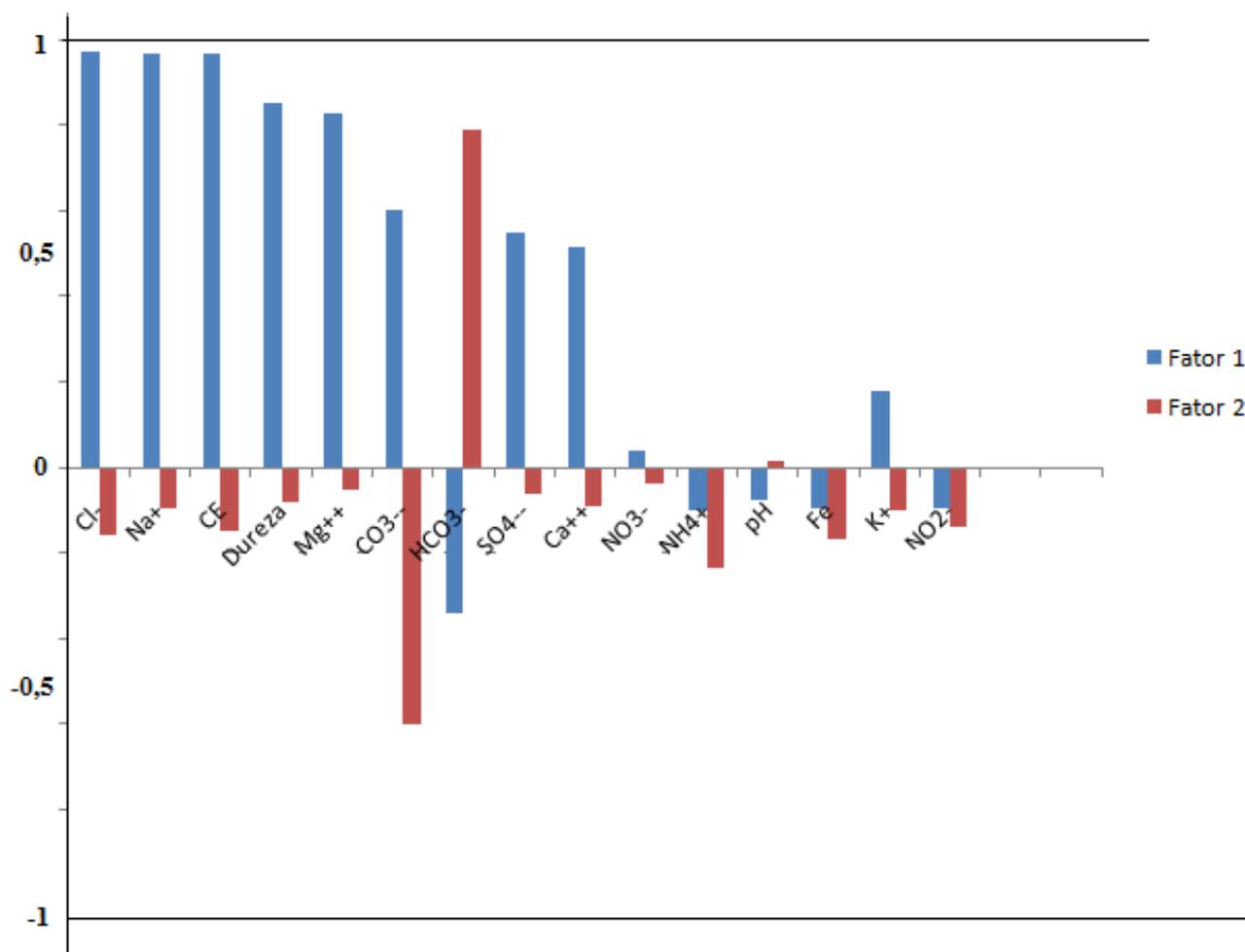


Figura 5.4- Contribuição de cada variável para a formação dos dois principais fatores, Fator 1 e Fator 2.

5.2- Análises gráficas

Na construção dos gráficos mostrados nas figuras 5.5 a 5.14, não foram incluídas amostras do poço M10, porque esse poço está localizado próximo de uma salina, e devido a isso, não é uma amostra representativa do aquífero.

As figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram, respectivamente, a relação entre a condutividade elétrica e as concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloreto nas duas coletas realizadas.

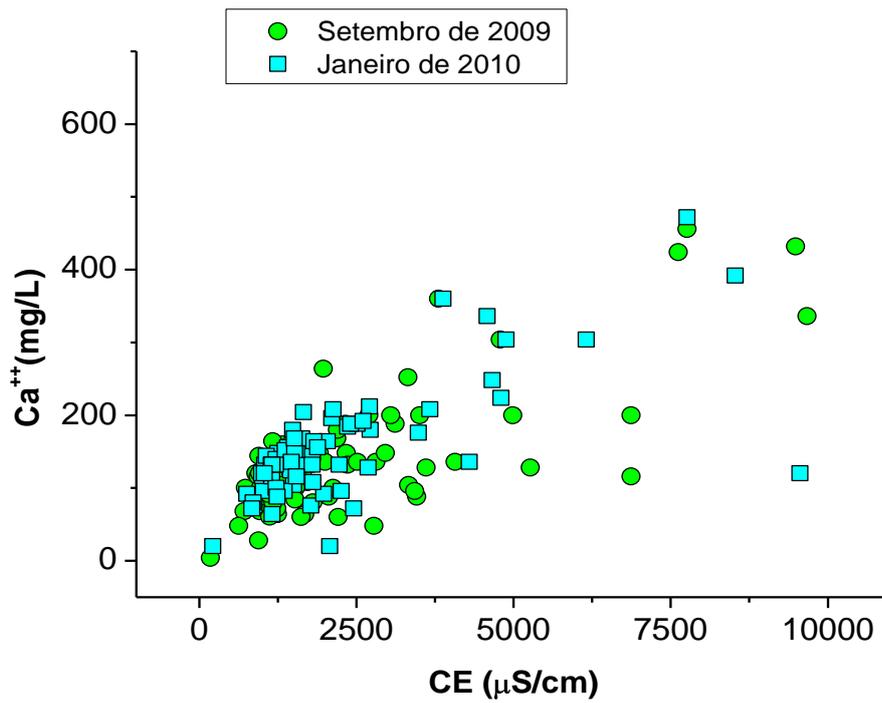


Figura 5.5- Condutividade elétrica versus concentração de cálcio em amostras de água do calcário Jandaíra.

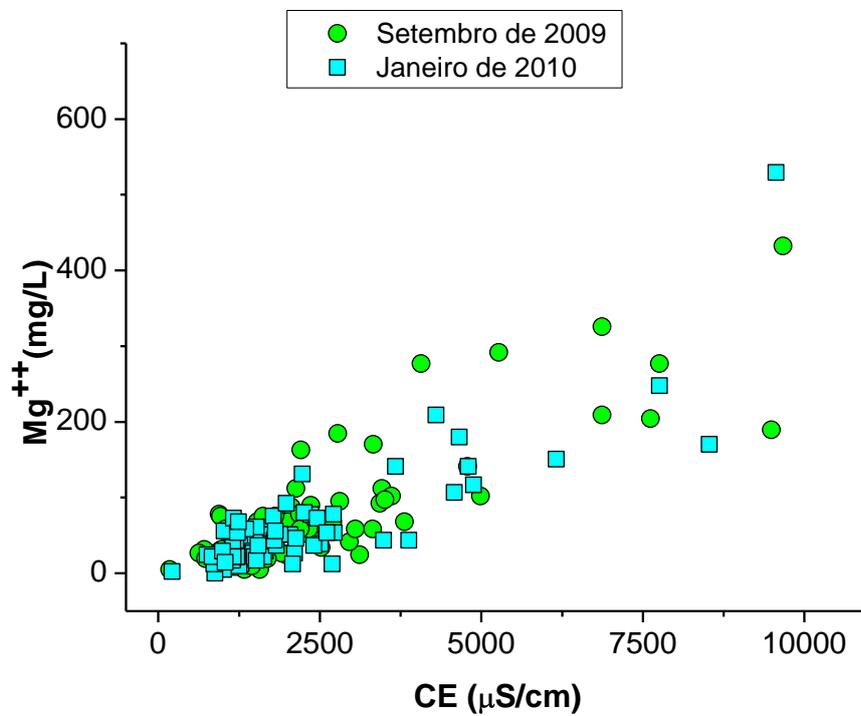


Figura 5.6- Condutividade elétrica versus concentração de magnésio em amostras de água do calcário Jandaíra.

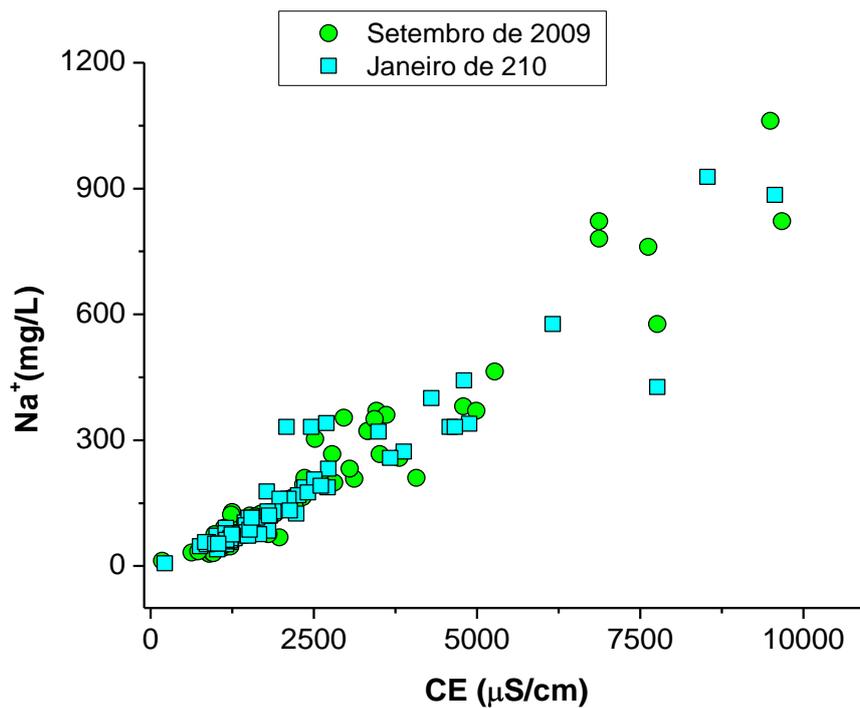


Figura 5.7- Condutividade elétrica versus concentração de sódio em amostras de água do calcário Jandaíra.

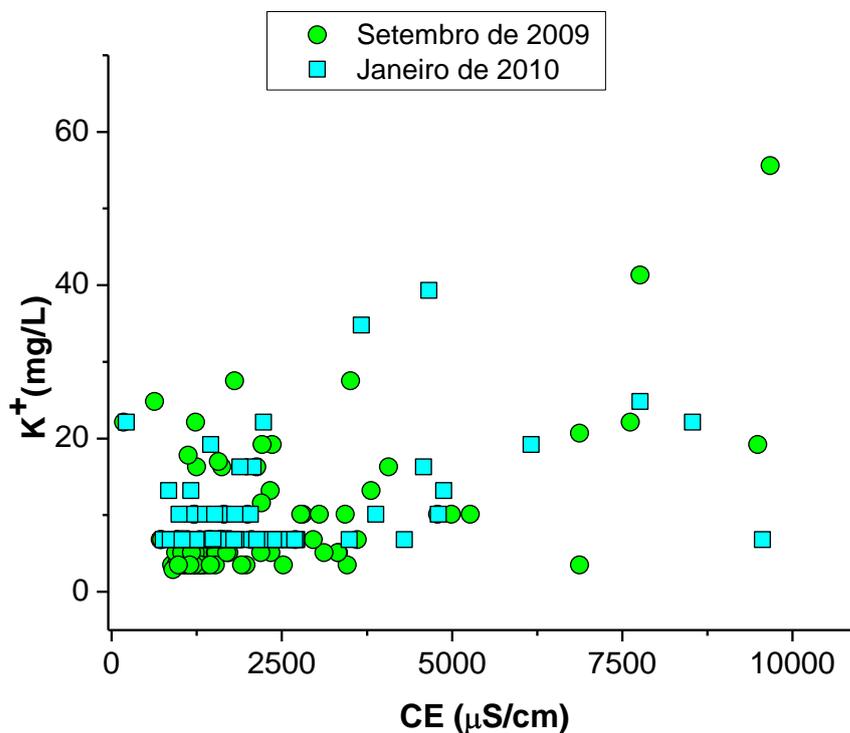


Figura 5.8- Condutividade elétrica versus concentração de potássio em amostras de água do calcário Jandaíra.

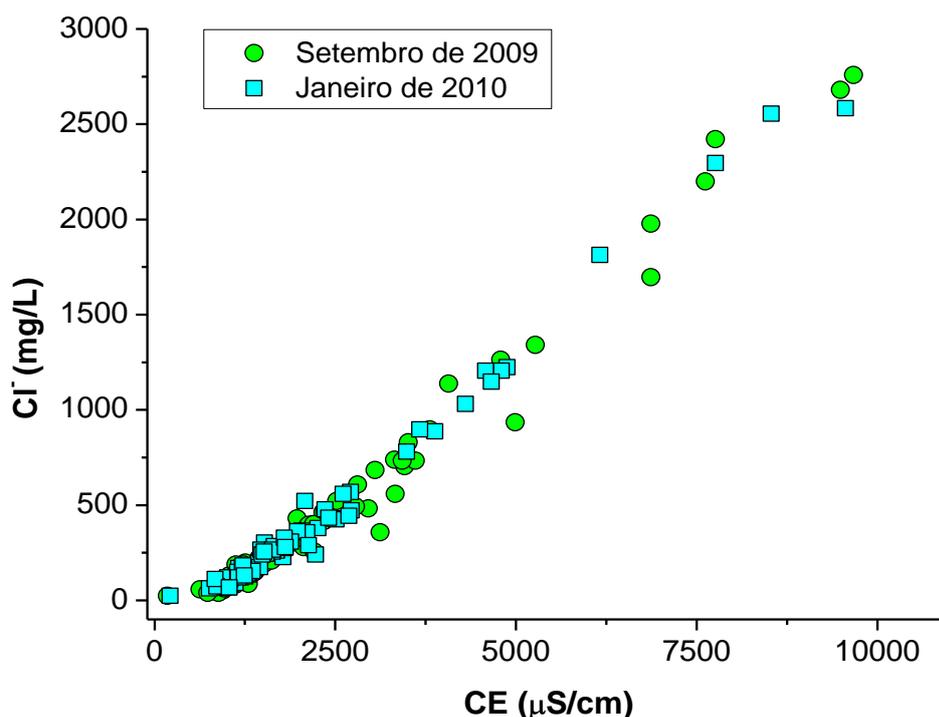


Figura 5.9- Condutividade elétrica versus concentração de cloretos em amostras de água do calcário Jandaíra.

Os gráficos 5.5 a 5.9 mostram que, excluindo os poços com $CE > 7300 \mu S/cm$, as concentrações de todos os parâmetros crescem com a condutividade elétrica. A concentração de cloreto é a que apresenta a maior correlação e a menor correlação é com a concentração de potássio. A boa correlação entre a concentração de cloretos e a condutividade elétrica mostrada nas matrizes de correlação (tabela 5.17 e 5.20) é evidenciada no gráfico da Figura 5.9.

A figura 5.10 mostra a relação entre o pH e a concentração de bicarbonato. Os valores de pH nas duas coletas estão na faixa 5 a 8, indicando águas que variam de ácidas a ligeiramente básicas, com predominância de águas com pH pouco abaixo de 7 característico de águas ligeiramente ácidas, não sendo influenciado pela variação do bicarbonato. Talvez a renovação de água tenha mantido o pH aproximadamente constante.

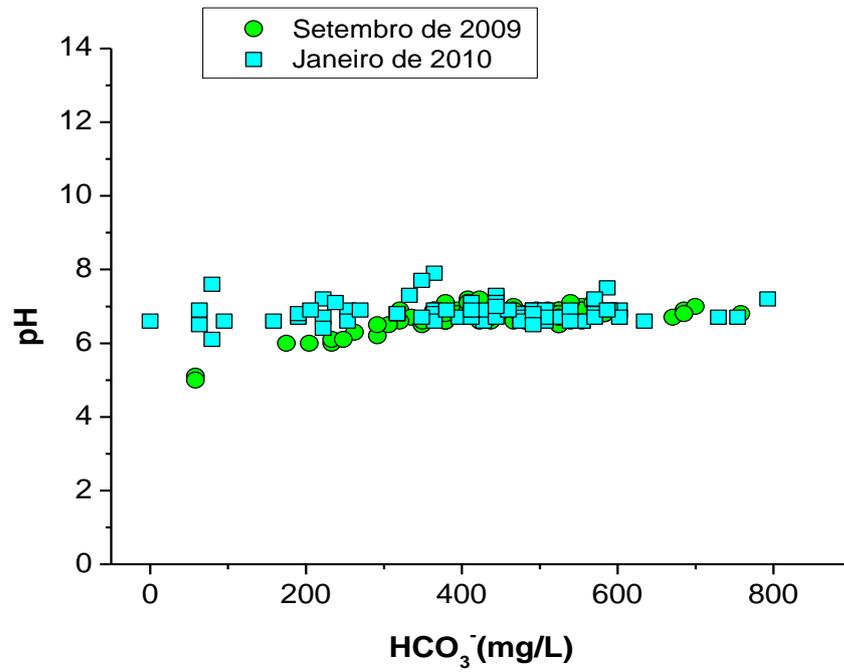


Figura 5.10- Concentração de bicarbonatos versus pH em amostras de água do calcário Jandaíra.

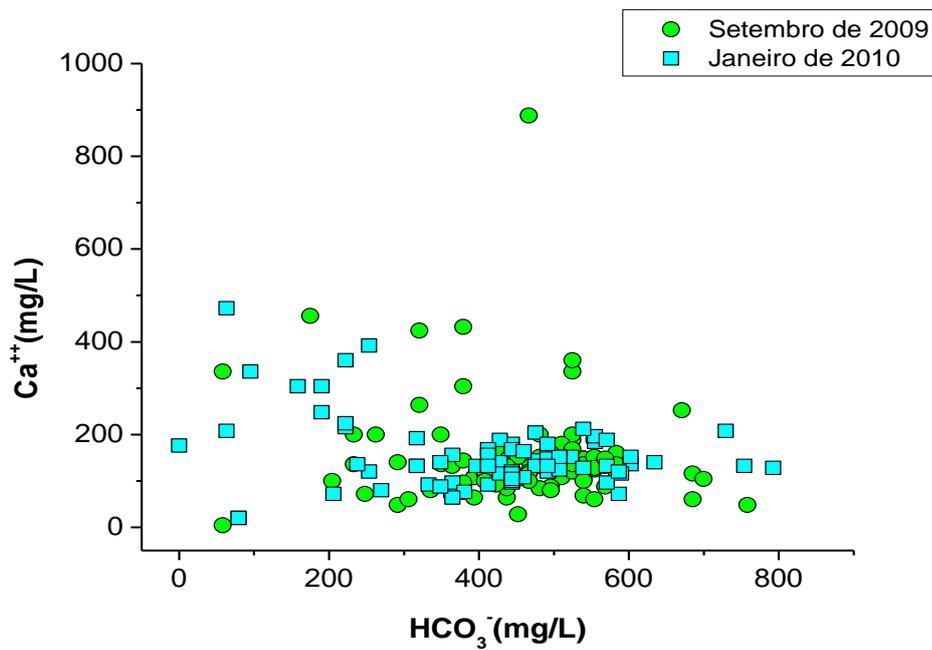


Figura 5.11- Concentração de cálcio versus concentração de bicarbonatos em amostras de água do calcário Jandaíra.

A figura 5.11 mostra a relação entre as concentrações de cálcio e bicarbonatos. Valores de Ca^{+2} abaixo de 200mg/L mostram que elas são diretamente relacionadas, indicando processo de dissolução de rochas que contém o íon carbonato.

Na figura 5.12 tem-se a concentração de magnésio versus concentração de bicarbonatos. Somente os resultados de algumas amostras indicam dissolução de dolomita.

A figura 5.13 mostra a concentração de sódio versus concentração de cloreto. A excelente correlação para a maioria das amostras indica águas no final do processo de salinização tornando as águas da área estudada cloretadas sódicas.

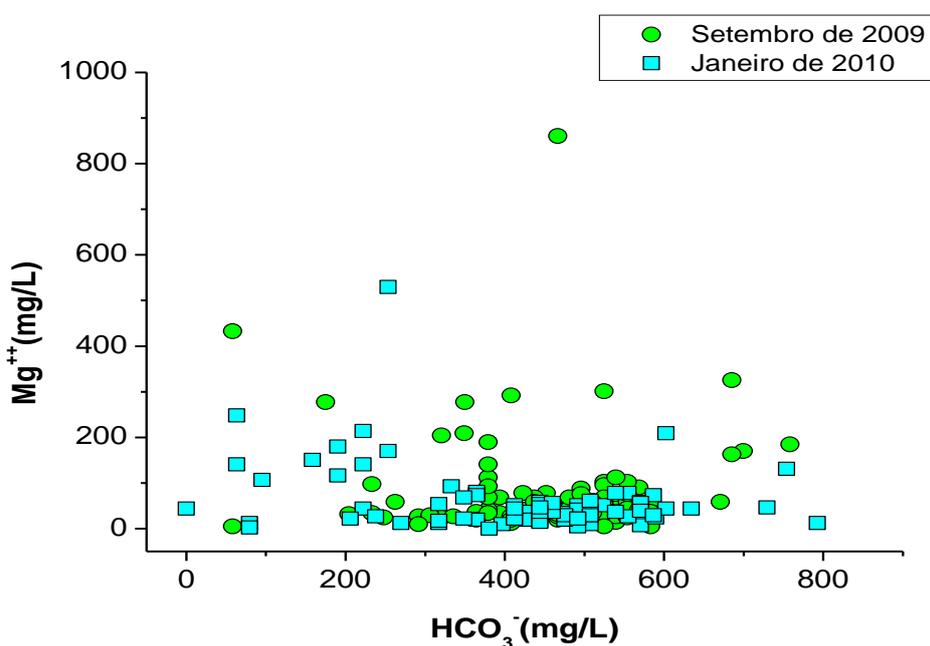


Figura 5.12- Concentração de magnésio versus concentração de bicarbonatos em amostras de água do calcário Jandaíra.

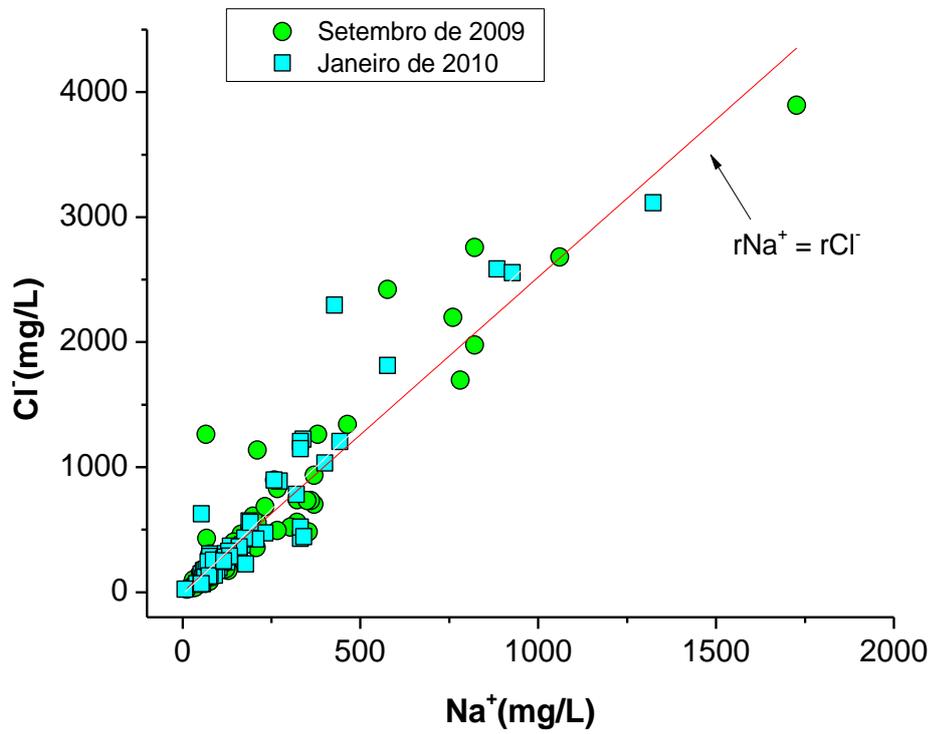


Figura 5.13- Concentração de sódio versus concentração de cloreto em amostras de água do calcário Jandaíra.

5.3- Análise Fatorial Q-Modal

Com a Análise Fatorial do tipo Q-modal, procura-se as inter-relações entre os objetos estudados, ou seja, entre os poços.

Esta análise estatística foi feita em dois conjuntos de dados. O primeiro, com 97 amostras, representando os dados das coletas de setembro de 2009 e o segundo, com 80 amostras, representando os dados da coleta de janeiro de 2010.

Na análise fatorial Q-modal, para obtenção das cargas fatoriais, também foi utilizada a rotação do tipo Varimax que definiu bem as cargas dos fatores extraídos. Foram escolhidos apenas os fatores com autovalores maiores do que 1 (um) para a quantificação dos fatores extraídos, isto é, adotou-se novamente o critério Kaiser.

Este procedimento com os dados de setembro de 2009 definiu dois principais fatores que juntos explicam 99,41% da variância dos dados. Do terceiro fator em diante a parcela de explicação da variância é menor que 0,18%, permitindo dizer que o terceiro fator juntamente com os demais não possui importância relevante na descrição do conjunto.

A tabela 5.23 mostra os poços, a carga fatorial dos dois principais fatores em cada um deles, a comunalidade e o percentual da variância dos dados, explicado por cada fator.

Tabela 5.23- Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de setembro de 2009. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
B04	0,893955604	0,444952138	0,997139029
J08	0,890831297	0,45297979	0,99877109
B35	0,884208322	0,459538034	0,992999561
M05	0,880599369	0,47017456	0,996519367
B28	0,867884643	0,495940811	0,999181042
B03	0,858025051	0,512641479	0,999008274
Q11	0,849047539	0,526961939	0,998570609
B21	0,845972458	0,525213254	0,991518362
B38	0,844708656	0,53335194	0,997997005
M13	0,842828282	0,536249422	0,997922957
B40	0,841188867	0,53930875	0,998452638
B12	0,836846208	0,547298042	0,999846722
B39	0,834306214	0,550216835	0,998805425
B13	0,833885568	0,55136278	0,999366057
B05	0,832410352	0,552605946	0,998280327
B26	0,831235779	0,55447878	0,998399637
B22	0,824535009	0,564158172	0,998132424

Continuação da **Tabela 5.23-** Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de setembro de 2009. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
B20	0,823923804	0,564188136	0,997158689
B10	0,821204517	0,568005144	0,997006704
Q08	0,820688361	0,570692447	0,999219257
Q01	0,817784329	0,574149683	0,998419068
B11	0,817707716	0,575356676	0,999681214
Q13	0,811521362	0,58086275	0,995968455
J02	0,80871334	0,587929402	0,999678248
B42	0,801923526	0,592156677	0,993730872
B06	0,801020999	0,598183896	0,999458614
Q05	0,800672771	0,59793983	0,998608927
B09	0,800127838	0,599768433	0,999926731
M08	0,79549295	0,605386208	0,999301495
B19	0,792723089	0,6072739	0,997191486
M04	0,790088425	0,612429596	0,99930973
B14	0,785549774	0,617970637	0,998976156
LM15	0,781945932	0,622469899	0,998908215
J06	0,773717542	0,632960076	0,999277293
M22	0,770182802	0,635425467	0,996947072
B32	0,769052473	0,638561038	0,999201905
B29	0,768335609	0,637278655	0,996463692
Q06	0,768232721	0,63901161	0,998517352
B31	0,767525912	0,640187619	0,998936214
B25	0,767230819	0,640858061	0,999342186
M14	0,765330824	0,643354074	0,999635734
B37	0,76454963	0,64332647	0,998405084
M28	0,756235557	0,652169784	0,997217645
M21	0,753665018	0,649881851	0,99035738
Q14	0,75182845	0,644672908	0,980849177
B41	0,750808661	0,66012971	0,99948488
Q07	0,749425357	0,66180548	0,999624859
B07	0,741737188	0,670415591	0,999631122
B30	0,741234702	0,670928065	0,999573352
M15	0,737526097	0,674717922	0,999189019
Q03	0,730553963	0,682380648	0,999352441
B08	0,729716231	0,683538611	0,999710811
Q02	0,729271709	0,683632186	0,999190191
M24	0,720386893	0,692232025	0,998142453
B24	0,719197499	0,694795491	0,999985817
Q04	0,716200034	0,6965742	0,998158105
B16	0,707851933	0,70377715	0,996356636
J09	0,70699439	0,703222693	0,994363224
M10	0,457098144	0,888233424	0,99789733
M30	0,479338709	0,876979045	0,998857843

Continuação da **Tabela 5.23-** Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de setembro de 2009. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
M29	0,485312803	0,873607748	0,998719015
M11	0,495277828	0,868200757	0,999072681
M12	0,506029873	0,862482426	0,999942168
M03	0,506974107	0,861984543	1
M02	0,509048832	0,860582857	0,999733568
B02	0,544979473	0,837766721	0,998855706
M20	0,54488055	0,83630009	0,996292655
M01	0,548106958	0,836276145	0,999779029
J04	0,549137072	0,834647233	0,998187527
B17	0,561307747	0,826540764	0,998236022
J05	0,57005347	0,820636819	0,998405748
J03	0,572972565	0,815405188	0,993183182
M18	0,586411568	0,809062691	0,998460966
B27	0,587640665	0,806822224	0,996283653
M19	0,597701261	0,79983885	0,996988984
M25	0,604501479	0,79453664	0,996710512
M17	0,621496166	0,782486267	0,998542243
B01	0,635560979	0,765943318	0,990606926
B33	0,643749909	0,765108285	0,999804634
M23	0,644026226	0,76462871	0,999426845
M06	0,651157837	0,758300954	0,999026865
M16	0,662765841	0,748320018	0,999241411
J01	0,661257226	0,746013194	0,993796804
B23	0,672535816	0,737399832	0,996062937
J07	0,674323108	0,735598648	0,995817026
B34	0,678908798	0,734033484	0,999722312
M09	0,356049253	0,730798848	0,660838027
M07	0,677660824	0,729452994	0,991325863
B36	0,684681156	0,728197961	0,999060557
Q10	0,685039582	0,727633215	0,998729325
Q09	0,682738908	0,726954164	0,994594775
B18	0,688049112	0,72550969	0,999775891
M27	0,69030768	0,72332651	0,999725934
Q12	0,69677459	0,716734326	0,999202924
M26	0,697721337	0,71544559	0,998677456
B15	0,70232219	0,709964148	0,99730555
LM16	0,701027969	0,70481683	0,988206978
Σ :	51,10639695	45,330109	96,43650595
Variância (%)	52,68700716	46,73207114	99,4190783

O primeiro fator explica 52,68% da variância dos dados. Considerando as cargas fatoriais superiores a 0,7, observa-se que o primeiro fator, Fator 1, associa 59 poços:

Fator 1: B03, B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B19, B20, B21, B22, B24, B25, B26, B28, B29, B30, B31, B32, B35, B37, B38, B39, B40, B41, B42, M04, M05, M08, M13, M14, M15, M21, M22, M24, M28, J02, J06, J08, J09, Q01, Q02, Q03, Q04, Q05, Q06, Q07, Q08, Q11, Q13, Q14 e LM15.

O segundo fator responde por 46,73% da variância dos dados. Cargas fatoriais superiores a 0,7, no segundo fator, Fator 2, ocorrem em 38 poços:

Fator 2: B01, B02, B17, B18, B23, B27, B33, B34, B36, M01, M02, M03, M06, M07, M09, M10, M11, M12, M16, M17, M18, M19, M20, M23, M25, M26, M27, M29, M30, J01, J03, J04, J05, J07, Q09, Q10, Q12, e LM16.

É importante observar que o primeiro fator encontrado, Fator 1, tem a maior parcela de explicação da variância, 52,68%, portanto, o maior numero de poços está associado a ele (59 do total de 97) enquanto que o Fator 2 explica 46,73% da variância do sistema e tem 38 poços associados a ele.

O mesmo procedimento foi realizado com os dados de janeiro de 2010: rotação do tipo Varimax, escolhas dos fatores com autovalores maiores do que 1 (um) (critério Kaiser) na quantificação dos fatores que devem ser extraídos.

Os resultados mostram que os dois principais fatores juntos explicam 99,38% da variância dos dados e do terceiro fator em diante, a parcela de explicação da variância é menor que 0,27%, o que nos permite dizer que o terceiro fator juntamente com os demais não possui importância relevante na descrição do conjunto.

A tabela 5.24 mostra os poços, a carga fatorial dos dois principais fatores em cada um deles, a comunalidade e o percentual da variância dos dados, explicado por cada fator.

Tabela 5.24- Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de janeiro de 2010. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
B42	0,94882782	0,290595633	0,984720055
M05	0,884426775	0,464201409	0,997693669
B44	0,877637941	0,479284372	0,999961865
B13	0,865990444	0,49989436	0,999833821

Continuação da **Tabela 5.24-** Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de janeiro de 2010. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
B38	0,854777683	0,518625038	0,999616818
B09	0,85077853	0,525406003	0,999875576
B12	0,847727193	0,530292049	0,999851052
B40	0,830542092	0,556134561	0,999085817
B43	0,828643696	0,557020822	0,996922572
LM15	0,827969612	0,550734942	0,988842656
B48	0,826528597	0,562825584	0,99992216
Q08	0,823758805	0,564572759	0,997320969
B22	0,820906495	0,570786074	0,999684216
B32	0,812845528	0,581484215	0,998841746
B49	0,81191327	0,583480026	0,9996521
B26	0,800189895	0,598066282	0,997987146
B23	0,790969612	0,611653959	0,999753494
B45	0,787456672	0,616158876	0,999739771
M08	0,784996407	0,619228191	0,999662912
J06	0,782459836	0,612359186	0,987227169
Q23	0,781999799	0,606469586	0,979329045
J10	0,779563789	0,611380613	0,981505956
Q07	0,776394388	0,629644881	0,999240922
M23	0,774782966	0,631627545	0,999242
Q05	0,767449511	0,640733863	0,999518635
Q18	0,761533966	0,643946478	0,994601048
J08	0,760981923	0,644909705	0,995002015
M27	0,760512808	0,646318874	0,996107819
B15	0,759945657	0,649687977	0,999611869
M22	0,758863974	0,638988122	0,984180351
B19	0,758609416	0,650846569	0,999089504
LM16	0,75844273	0,642886508	0,988538438
M25	0,748076596	0,661433724	0,997113164
M09	0,74502891	0,66446006	0,996575249
B46	0,744657053	0,667412325	0,999953339
B30	0,744521743	0,667562846	0,99995278

Continuação da **Tabela 5.24-** Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de janeiro de 2010. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
B47	0,73900358	0,671493424	0,99702971
LM25	0,729533674	0,683579185	0,999499884
Q06	0,729223963	0,682498807	0,997572211
Q17	0,727299395	0,684891827	0,998041226
LM24	0,727200433	0,686300977	0,999829501
J01	0,72355532	0,685412783	0,993322984
M16	0,722566696	0,69102343	0,999616011
Q01	0,719298957	0,681382222	0,981672723
B31	0,719105683	0,691566611	0,995377361
B25	0,714580799	0,695000631	0,993651597
M07	0,71065021	0,703224267	0,999548091
Q11	0,709463499	0,548404658	0,804086126
M03	0,48128516	0,873324457	0,994331013
M11	0,482032935	0,872680866	0,993927644
M06	0,489408481	0,871391264	0,998843397
B17	0,489486585	0,869423011	0,995493489
M34	0,49039067	0,86928247	0,996135023
M12	0,491063064	0,868357338	0,9951874
J04	0,494985302	0,867521666	0,997604291
J05	0,497223253	0,86681219	0,998594336
M31	0,504529375	0,857355348	0,989608083
J07	0,514970276	0,856032074	0,997985297
M01	0,516539584	0,855936352	0,999440181
M18	0,517562625	0,855495419	0,999743483
M33	0,539628806	0,840535498	0,997699173
M36	0,594450222	0,803789201	0,999448147
B02	0,593435265	0,802718912	0,996523066
J09	0,63241415	0,773584662	0,998380887
B18	0,632776396	0,773018583	0,997963697
M20	0,634373197	0,772425374	0,999070312
Q02	0,639477948	0,767697446	0,998291414
M35	0,64650348	0,762710152	0,999693526

Continuação da **Tabela 5.24**- Matriz de cargas fatoriais dos dois fatores extraídos após a rotação Varimax com as amostras de janeiro de 2010. Σ : Soma dos quadrados das cargas fatoriais.

Poços	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
M24	0,653867969	0,756232428	0,999430807
Q22	0,665165977	0,745903968	0,998818507
B16	0,673378093	0,734827927	0,993410139
B08	0,680646654	0,73208124	0,999222811
B27	0,677607214	0,729442041	0,991237229
Q21	0,682756648	0,729296308	0,998029746
M32	0,68455297	0,728720653	0,99964656
B50	0,692323123	0,721308971	0,99959794
Q20	0,679257765	0,720428317	0,980408072
Q19	0,699553792	0,714418707	0,999769597
Q12	0,705591806	0,708026951	0,999161961
Q04	0,70312768	0,706261392	0,993193689
Σ :	41,05192815	38,45896787	79,51089602
Variância (%)	51,31491019	48,07370983	99,38862002

Considerando as cargas fatoriais superiores a 0,7, observa-se que o primeiro fator, Fator 1, permite associar 48 poços:

Fator 1: B09, B12, B13, B15, B19, B22, B23, B25, B26, B30, B31, B32, B38, B40, B42, B43, B44, B45, B46, B47, B48, B49, M05, M07, M08, M09, M16, M22, M23, M25, M27, J01, J06, J08, J10, Q01, Q05, Q06, Q07, Q08, Q11, Q17, Q18, Q23, LM15, LM16, LM24 e LM25.

Considerando também as cargas fatoriais superiores a 0,7, o segundo fator, Fator 2, permite associar 32 poços:

Fator 2: B02, B08, B16, B17, B18, B27, B50, M01, M03, M06, M11, M12, M18, M20, M24, M32, M31, M33, M34, M35, M36, J04, J05, J07, J09, Q02, Q04, Q12 Q19, Q20, Q21 e Q22.

O primeiro fator, Fator 1, explica a maior parcela da variância, 51,31%, tendo associado a ele 48 poços do total de 80. O fator 2 explica 48,07% da variância tendo associado a ele 32 poços do total de 80.

A figura 5.14 mostra os percentuais dos poços que contribuem para a formação do Fator 1 e para o Fator 2 nas duas simulações. A distribuição dos poços por município mostra que tanto em setembro de 2009 como em janeiro de 2010, o Fator 1 é representado, em sua maioria, por poços pertencentes ao município de Baraúna, como mostram as figura 5.14 (a) e 5.14 (c), enquanto que o Fator 2 é representado, em sua maioria, por poços pertencentes ao município de Mossoró, como mostram as figura 5.14 (b) e 5.14 (d).

O agrupamento dos poços nas duas coletas realizadas através do Fator 1 (com amostras do município de Baraúna) e do Fator 2 (com amostras do município de Mossoró) poderia indicar que os poços agrupados estão próximos entre si com conectividade entre eles ou que o local onde estão os poços possui litologia e recarga semelhante.

O total de poços em cada município e a quantidade que representa os dois fatores encontrados em cada Análise Fatorial Q-modal realizada é mostrado na tabela 5.25.

Tabela 5.25- Resultados da Análise Fatorial Q-modal realizada em amostras de água do calcário Jandaíra.

Município	Nº de poços					
	Total	Setembro/2009		Total	Janeiro/2010	
		F1	F2		F1	F2
Baraúna	42	33	9	29	22	7
Mossoró	30	10	20	23	9	14
Quixeré	14	11	3	16	9	7
Jaguaruana	09	4	5	8	4	4
Limoeiro	02	1	1	4	4	0

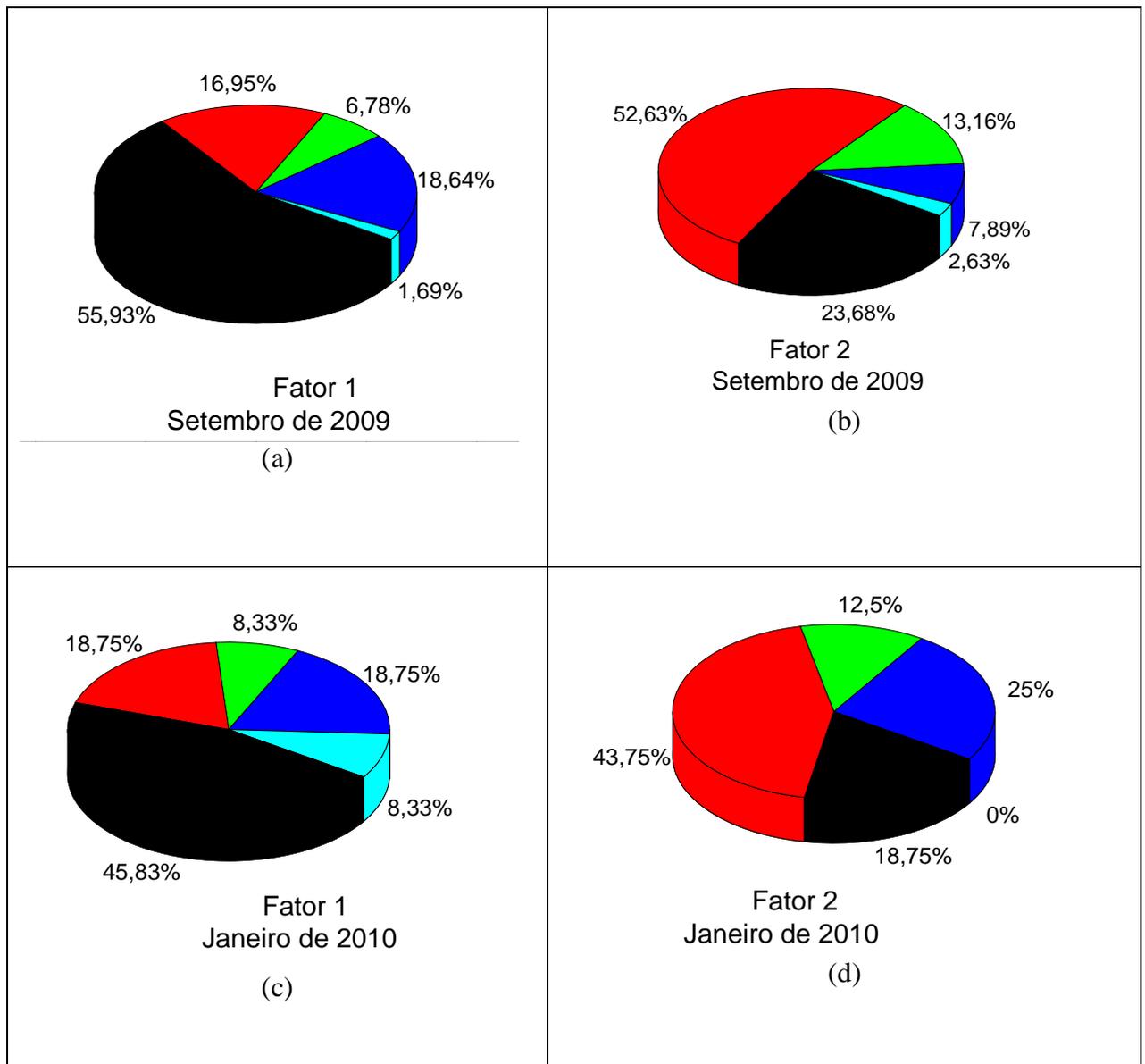


Figura 5.14- Percentuais de poços que contribuem para a formação dos Fatores 1 e 2 da Análise Fatorial Q-Modal utilizada em amostras coletadas em setembro de 2009 e janeiro de 2010.

5.4- Análise de Grupo (*Cluster*)

Com este tipo de análise, são agrupados objetos através de características semelhantes entre eles, produzindo um dendograma onde as amostras semelhantes, segundo as variáveis escolhidas, são agrupadas entre si.

Para a realização desta análise, foram usados dois conjuntos de dados. O primeiro, com dados das amostras coletadas em setembro de 2009, no período seco, e o segundo com dados da coleta de janeiro de 2010, no início do período chuvoso, cada uma das amostras com 14 parâmetros analisados: dois físico-químicos (a condutividade elétrica e o pH) e doze hidroquímicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- e Fe).

A primeira análise de grupo realizada nos dados do período seco revela um perfil heterogêneo das amostras como indica a figura 5.15, com o dendograma de dissimilaridade dessas amostras. A figura mostra também como os fatores 1 e 2 encontrados na análise fatorial Q-modal estão distribuídos nos grupos.

Para interpretação do dendograma considera-se o fato de que quanto menor é a distância entre os elementos, ou seja, quanto menor for a dissimilaridade, maior é a semelhança entre eles. A figura 5.15 mostra que próximo ao valor 150 de dissimilaridade, dois importantes grupos podem ser obtidos. Os dois grupos discutidos e as amostras que os representam são mostrados na figura 5.16.

A amostra representada pelo número 52 (número mais a direita no dendograma da figura 5.15) representa a água do poço M10 e não tem relação alguma com nenhum dos dois grupos obtidos, indicando que possui água com características diferentes dos demais poços do aquífero. Esse poço está localizado próximo de uma salina, não sendo, portanto, uma amostra representativa do aquífero.

O primeiro grupo, situado do lado esquerdo do dendograma da figura 5.15, é o mais numeroso, sendo constituído por 76 amostras, identificadas pela tabela 5.26 e representadas, da esquerda para a direita, pelos seguintes números: 1, 90, 7, 8, 30, 11, 19, 87, 20, 25, 86, 74, 82, 89, 37, 91, 93, 10, 28, 15, 88, 29, 14, 22, 78, 31, 32, 39, 38, 40, 92, 21, 26, 84, 55, 3, 47, 46, 56, 4, 5, 50, 9, 12, 13, 6, 24, 41, 34, 69, 70, 65, 66, 48, 16, 18, 33, 51, 60, 36, 68, 2, 35, 42, 27, 64, 83, 17, 23, 63, 81, 49, 59, 61, 85 e 94.

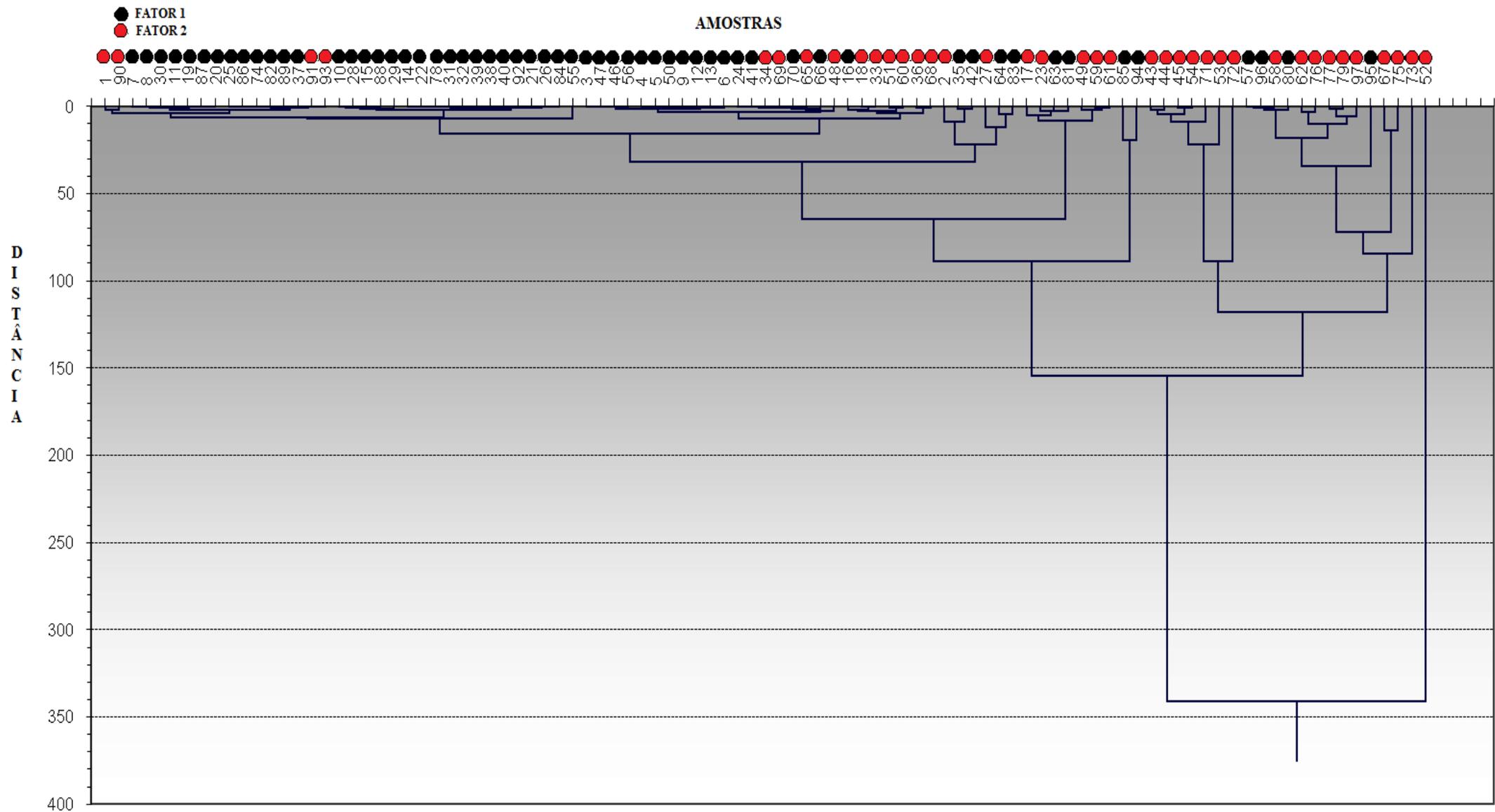


Figura 5.15- Dendrograma de dissimilaridade das águas do Aquífero Jandaíra com amostras coletadas em setembro de 2009.

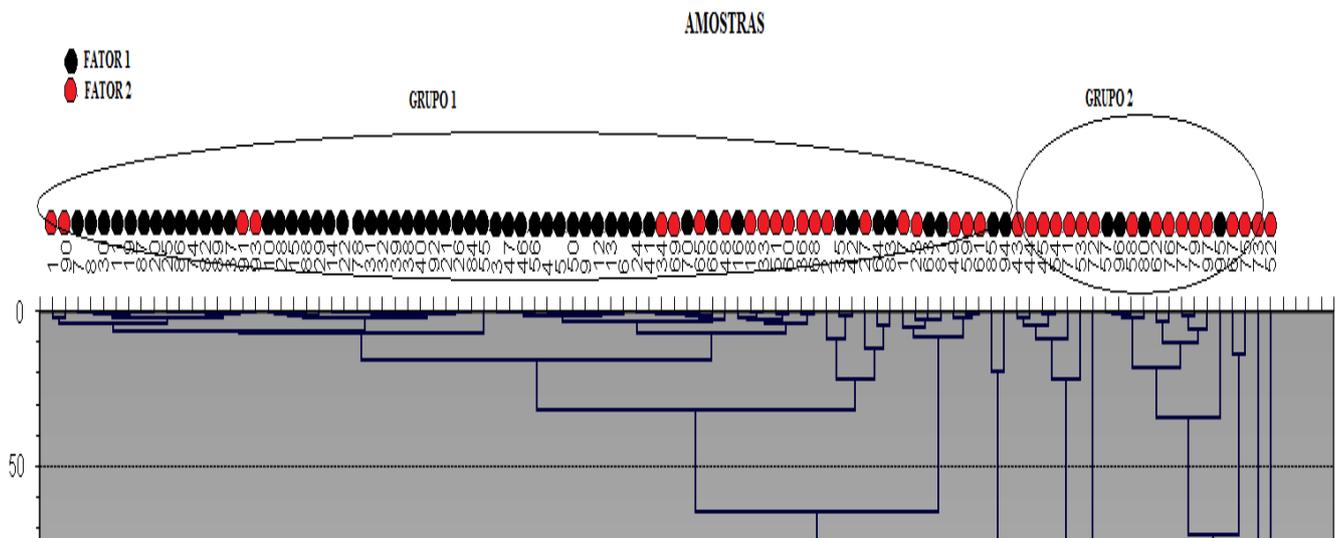


Figura 5.16- Principal Grupo (Grupo 1) e Segundo Grupo (Grupo 2) obtidos com a análise *Cluster* nas amostras coletadas em setembro de 2009.

Tabela 5.26- Correspondência entre as amostras e os números mostrados no dendrograma da figura 5.15. B: Baraúna; M: Mossoró; J: Jaguaruana; Q: Quixeré e LM: Limoeiro do Norte.

N°	POÇO												
1	B01	15	B15	29	B29	43	M01	57	M15	71	M29	85	Q04
2	B02	16	B16	30	B30	44	M02	58	M16	72	M30	86	Q05
3	B03	17	B17	31	B31	45	M03	59	M17	73	J01	87	Q06
4	B04	18	B18	32	B32	46	M04	60	M18	74	J02	88	Q07
5	B05	19	B19	33	B33	47	M05	61	M19	75	J03	89	Q08
6	B06	20	B20	34	B34	48	M06	62	M20	76	J04	90	Q09
7	B07	21	B21	35	B35	49	M07	63	M21	77	J05	91	Q10
8	B08	22	B22	36	B36	50	M08	64	M22	78	J06	92	Q11
9	B09	23	B23	37	B37	51	M09	65	M23	79	J07	93	Q12
10	B10	24	B24	38	B38	52	M10	66	M24	80	J08	94	Q13
11	B11	25	B25	39	B39	53	M11	67	M25	81	J09	95	Q14
12	B12	26	B26	40	B40	54	M12	68	M26	82	Q01	96	LM15
13	B13	27	B27	41	B41	55	M13	69	M27	83	Q02	97	LM16
14	B14	28	B28	42	B42	56	M14	70	M28	84	Q03		

Quando separados por município, os poços desse Primeiro Grupo (Grupo 1) são: B01, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B17, B18, B19, B20, B21, B22, B23, B24, B25, B26, B27, B28, B29, B30, B31, B32, B33, B34, B35, B36, B37, B38, B39, B40, B41, B42, M04, M05, M06, M07, M08, M09, M13, M14, M17, M18, M19, M21, M22, M23, M24, M26 M27, M28, J02, J06, J09, Q01, Q02, Q03, Q04, Q05, Q06, Q07, Q08, Q09, Q10, Q11, Q12 e Q13.

Comparando os poços do primeiro fator, Fator 1 da Análise Fatorial Q-modal obtido com os dados de setembro de 2009 (página 79), com os poços do Grupo 1 da Análise *Cluster*, verifica-se que, com exceção das amostras, B01, Q09, Q10, Q12, B34, M27, M23, M06, B18, B33, M09, M18, B36, M36, B02, B27, B17, B23, M07, M17 e M19, representadas no dendograma pelos números 1, 90, 91, 93, 34, 69, 65, 48, 18, 33, 51, 60, 36, 68, 2, 27, 17, 23, 49, 59 e 61, existe uma concordância entre as análises Q-modal e de Grupo, ou seja, o primeiro e mais numeroso grupo pode ser considerado como representando o primeiro fator, Fator 1, obtido na Análise Fatorial Q-modal, sendo representado basicamente pelos poços do município de Baraúna. Este tipo de concordância entre essas duas análises estatísticas foi também identificada por Reghunath et. al (2002).

A tabela 5.27 mostra os valores médios para os nove parâmetros hidroquímicos de amostras do Primeiro e Segundo Grupo, coletadas em setembro de 2009. Observa-se que as águas dos poços que formam o Principal Grupo têm condutividade elétrica relativamente baixa, sendo o cálcio e o sódio os cátions predominantes, produzindo águas cálcicas e mistas com relação aos cátions. Os ânions que predominam são o bicarbonato e o cloreto, produzindo águas bicarbonatadas e um pouco cloretadas (ver diagrama Piper da figura 5.17)

Tabela 5.27- Valores médios de nove parâmetros hidroquímicos com amostras do Primeiro Grupo e Segundo Grupo coletadas em setembro de 2009.

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Concentração média (mg/L)						
		Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{-2}	HCO_3^{-}
Primeiro Grupo								
1784,36	6,8	121,21	57,54	127,93	8,09	298,29	49,45	482,64
Segundo Grupo								
4371,45	6,4	215,8	130,35	203	18,1	1142,65	72,75	339,44

O fato de a concentração de bicarbonato ser maior que a concentração de cloretos, significa que as regiões onde se localizam essas águas sofrem maior influência da recarga natural do aquífero pelas águas das chuvas, que são mais concentradas do ânion HCO_3^- e pobres no ânion Cl^- .

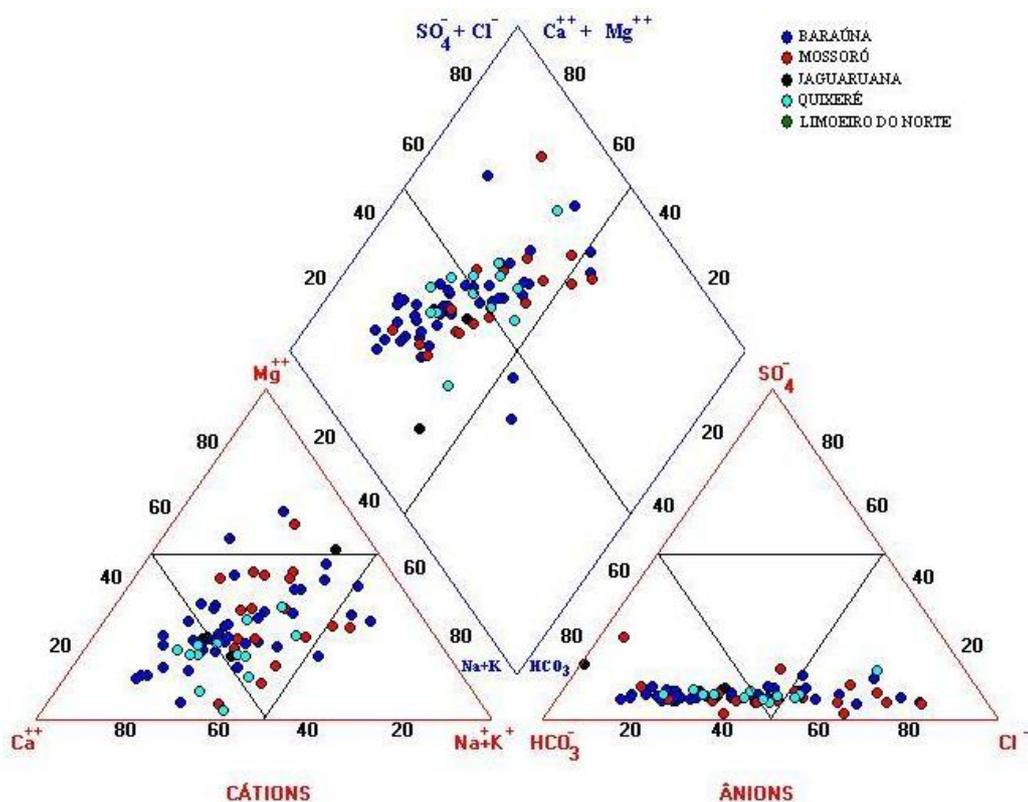


Figura 5.17- Diagrama de Piper para o Principal Grupo com amostras de setembro de 2009.

O Segundo Grupo, situado do lado direito do dendrograma da figura 5.15 é constituído por 20 amostras e representado, da esquerda para a direita, pelos números: 43, 44, 45, 54, 71, 53, 72, 57, 96, 58, 80, 62, 76, 77, 79, 97, 95, 67, 75 e 73. Quando separados por município, os poços desse Segundo Grupo (Grupo 2) são: M01, M02, M03, M11, M12, M15, M16, M20, M25, M29, M30, J01, J03, J04, J05, J07, J08, Q14, LM15 e LM16.

Comparando os poços do segundo fator, Fator 2 da Análise Fatorial Q-modal obtido com os dados de setembro de 2009 (página 79), com os poços do Grupo 2 da Análise *Cluster*, verifica-se que, com exceção das amostras, M15, LM15, J08 e Q14, representadas no dendrograma pelos números 71, 96, 80 e 95, existe uma concordância entre as análises Q-modal e de Grupo, ou seja, o Segundo Grupo pode ser considerado

como correspondente ao Fator 2, obtido na análise Q-modal, sendo representado basicamente pelos poços do município de Mossoró.

Da tabela 5.27 observa-se que as águas dos poços que formam o Segundo Grupo têm condutividade elétrica mais elevada que o Primeiro Grupo, sendo o cálcio e o sódio os cátions predominantes, produzindo águas sódicas e mistas, e o cloreto o ânion que predomina, produzindo mais águas cloretadas (ver o diagrama Piper da figura 5.18).

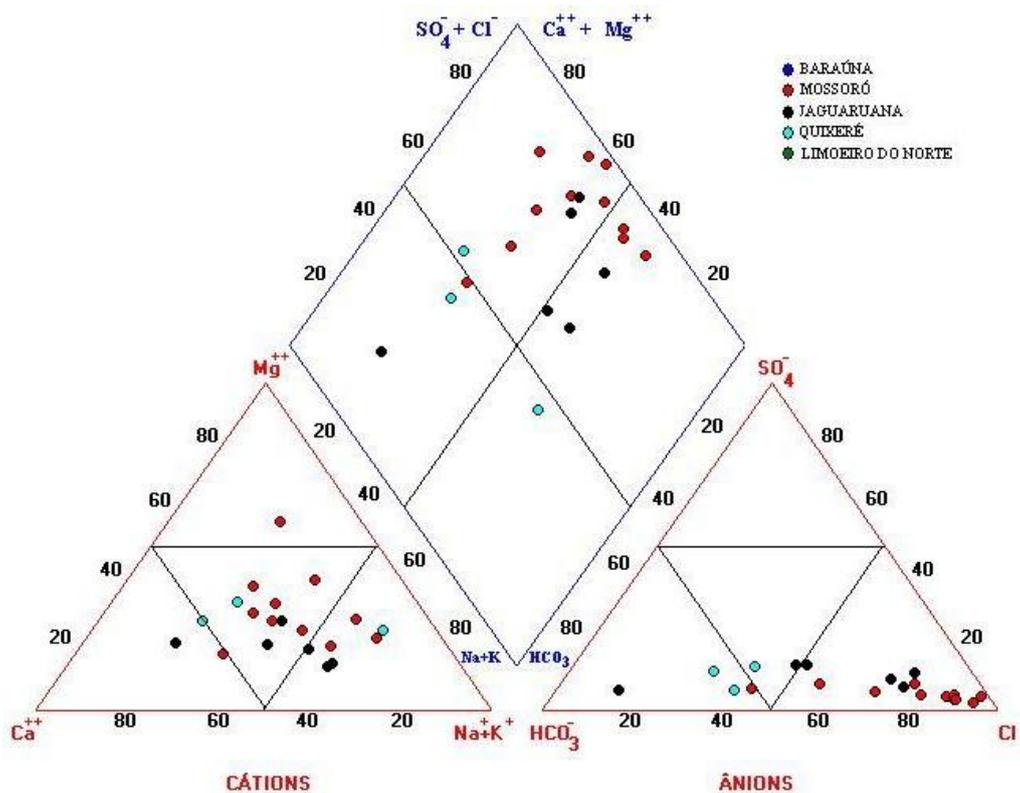


Figura 5.18- Diagrama de Piper para o Segundo Grupo com amostras de setembro de 2009.

Observa-se que as amostras do Primeiro Grupo têm as menores concentrações em todos os parâmetros (exceto para o ânion bicarbonato) quando comparadas com as amostras do Segundo Grupo.

A segunda análise de grupo realizadas nas amostras coletadas em janeiro de 2010, revelou um perfil ainda mais heterogêneo das amostras. A figura 5.19 com o dendrograma de dissimilaridade construído mostra também como os dois fatores encontrados na análise fatorial Q-modal estão distribuídos nos grupos.

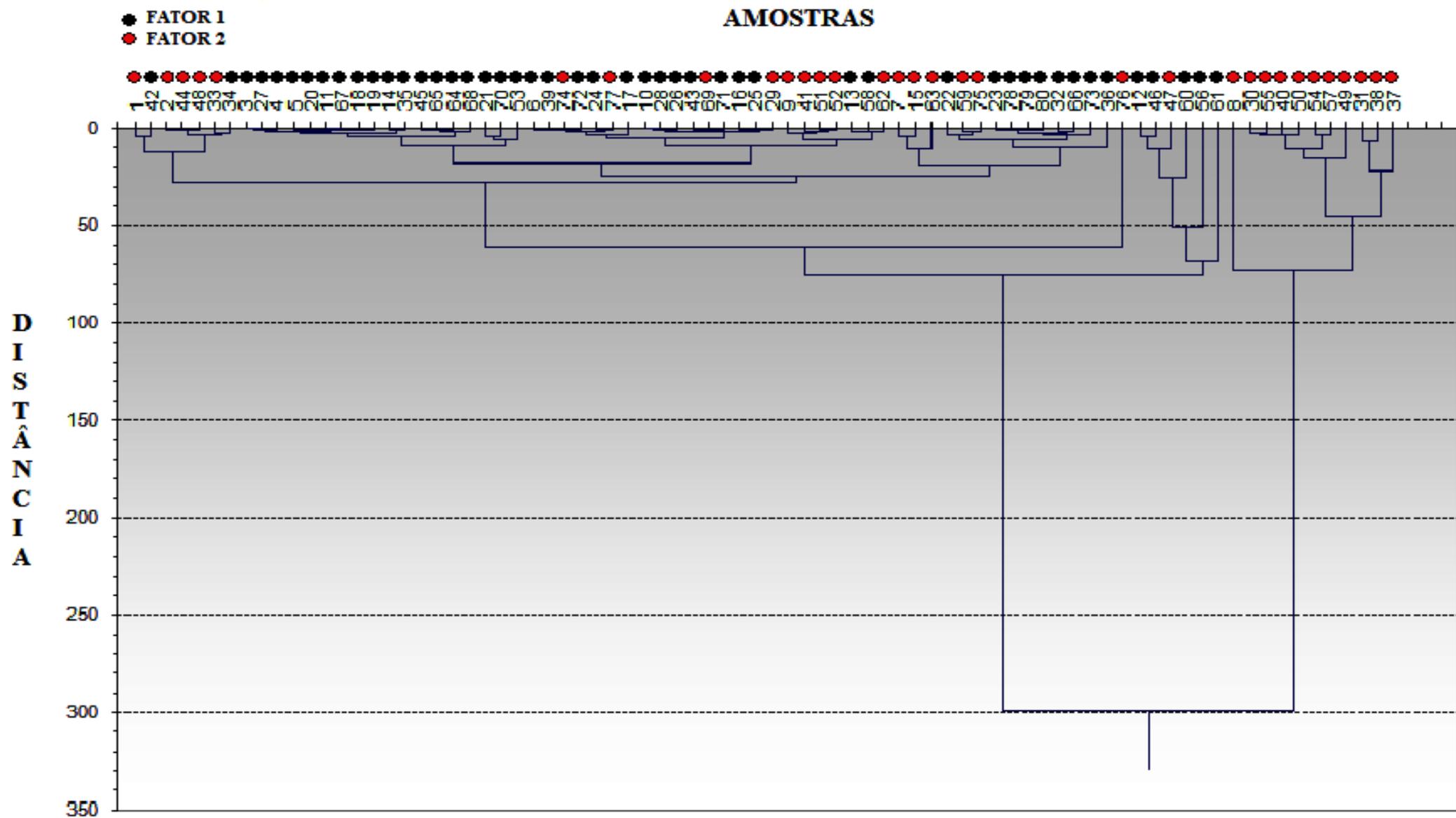


Figura 5.19- Dendrograma de dissimilaridade das águas do Aquífero Jandaíra para amostras coletadas em janeiro de 2010.

Esse perfil heterogêneo produz grupos que são formados por poços pertencentes aos dois fatores obtidos anteriormente com a análise fatorial Q-modal. Em outras palavras, é possível separar os grupos em relação aos dois fatores obtidos, como foi feito nas amostras de setembro de 2009, mas somente em alguns grupos porque alguns deles são formados por amostras dos dois fatores. A explicação para esse resultado é o fato de que as águas da região, coletadas no início do período chuvoso, janeiro de 2010, já são misturadas com água de chuvas, ocasionando o aparecimento de diferentes grupos na Análise *Cluster*.

Levando em consideração o fato de que quanto menor é a dissimilaridade das amostras, mais semelhantes entre si elas são, observa-se que a partir do valor 80 para a distância há uma divisão das amostras em dois grupos. Os dois grupos discutidos e as amostras que os representam são mostrados na figura 5.20.

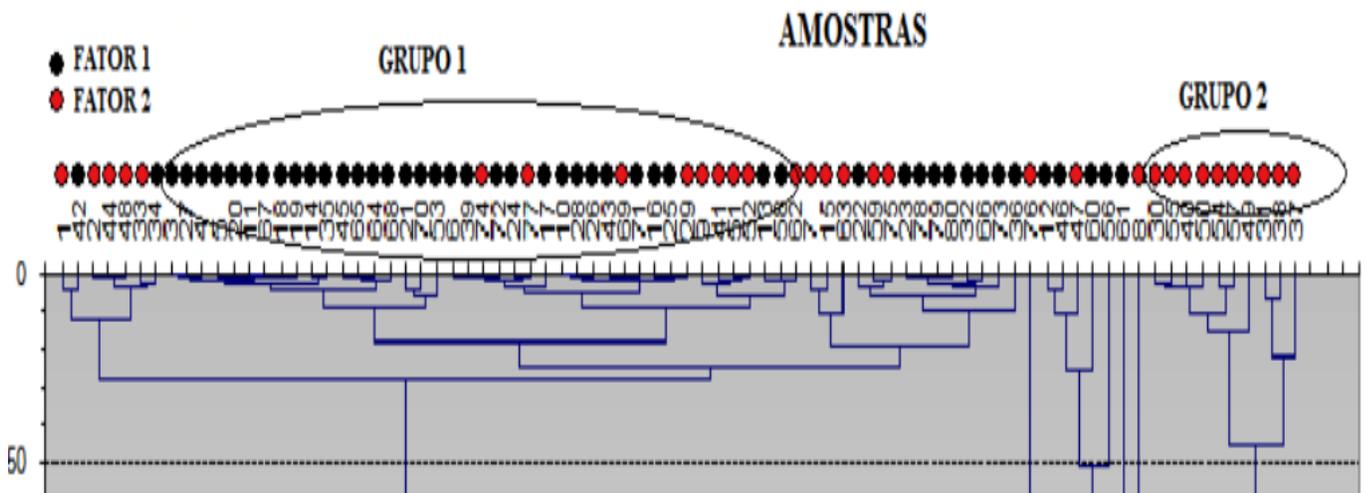


Figura 5.20- Principal Grupo (Grupo 1) e Segundo Grupo (Grupo 2) obtidos com a análise *Cluster* nas amostras coletadas em janeiro de 2010.

A tabela 5.28 deve ser utilizada para identificar cada poço no dendrograma mostrado na Figura 5.19. Ela mostra a correspondência entre as amostras e os números exibidos nesse dendrograma. O maior grupo é obtido próximo ao valor 20 de dissimilaridade, no lado esquerdo do dendrograma da figura 5.19, sendo constituído por 41 amostras e representado, da esquerda para a direita, pelos números: 3, 27, 4, 5, 20, 11,

67, 18, 19, 14, 35, 45, 65, 64, 68, 21, 70, 53, 6, 39, 74, 72, 24,77, 17, 10, 28, 26, 43, 69, 71, 16, 25, 29, 9, 41, 51, 52, 13, 58 e 62.

Quando separados por município, os poços desse Primeiro Grupo (Grupo 1) são: B09, B12, B13, B15, B18, B19, B22, B25, B26, B30, B31, B32, B38, B40, B42, B45, B46, B47, B48, B49, B50, M08, M16, M20, M23, M25, M35, M36, J01, J08, Q02, Q05, Q06, Q08, Q11, Q12, Q17, Q19, Q22, LM15, LM16.

Comparando os poços do primeiro fator, Fator 1 da Análise Fatorial Q-modal obtido com os dados de janeiro de 2010 (página 82), com os poços do Grupo 1 da Análise *Cluster*, verifica-se que, com exceção das amostras, Q19, Q22, Q12, B18, M20, J05 e Q21, representadas no dendograma pelos números 74, 77, 69, 9, 41, 55 e 62, que existe uma concordância entre as análises Q-modal e de grupo, ou seja, o mais numeroso grupo pode ser considerado como sendo o primeiro fator, Fator 1, obtido na Análise Fatorial Q-modal, sendo representado pelos poços do município de Baraúna..

Tabela 5.28- Correspondência as entre amostras os e números no dendograma da Figura 5.19. B: Baraúna; M: Mossoró; J: Jaguaruana; Q: Quixeré e LM: Limoeiro do Norte.

POÇO	Nº										
B02	1	B27	15	B50	29	M23	43	J07	57	LM16	71
B08	2	B30	16	M01	30	M24	44	J08	58	Q17	72
B09	3	B31	17	M03	31	M25	45	J09	59	Q18	73
B12	4	B32	18	M05	32	M27	46	J10	60	Q19	74
B13	5	B38	19	M06	33	M31	47	Q01	61	Q20	75
B15	6	B40	20	M07	34	M32	48	Q02	62	Q21	76
B16	7	B42	21	M08	35	M33	49	Q04	63	Q22	77
B17	8	B43	22	M09	36	M34	50	Q05	64	Q23	78
B18	9	B44	23	M11	37	M35	51	Q06	65	LM24	79
B19	10	B45	24	M12	38	M36	52	Q07	66	LM25	80
B22	11	B46	25	M16	39	J01	53	Q08	67		
B23	12	B47	26	M18	40	J04	54	Q11	68		
B25	13	B48	27	M20	41	J05	55	Q12	69		
B26	14	B49	28	M22	42	J06	56	LM15	70		

A tabela 5.29 mostra os valores médios dos nove parâmetros hidroquímicos de amostras do Primeiro e Segundo Grupo, coletadas em janeiro de 2010. Observa-se que a água dos poços que formam o Primeiro Grupo tem condutividade elétrica relativamente baixa, sendo o cálcio e o sódio os cátions predominantes, produzindo águas cálcicas e mistas e o bicarbonato e o cloreto, os ânions que predominam, produzindo águas bicarbonatadas e cloretadas, como mostra o diagrama Piper da figura 5.21.

Tabela 5.29- Valores médios de nove parâmetros hidroquímicos com amostras do Primeiro Grupo e Segundo Grupo coletadas em janeiro de 2010.

CE ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Concentração média (mg/L)						
		Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{-2}	HCO_3^-
Primeiro Grupo								
1534,29	6,8	143,17	32,6	95,12	7,04	233,46	52,52	484,99
Segundo Grupo								
5916,66	6,6	306,66	151,22	506,88	24	1614,55	183,44	169,11

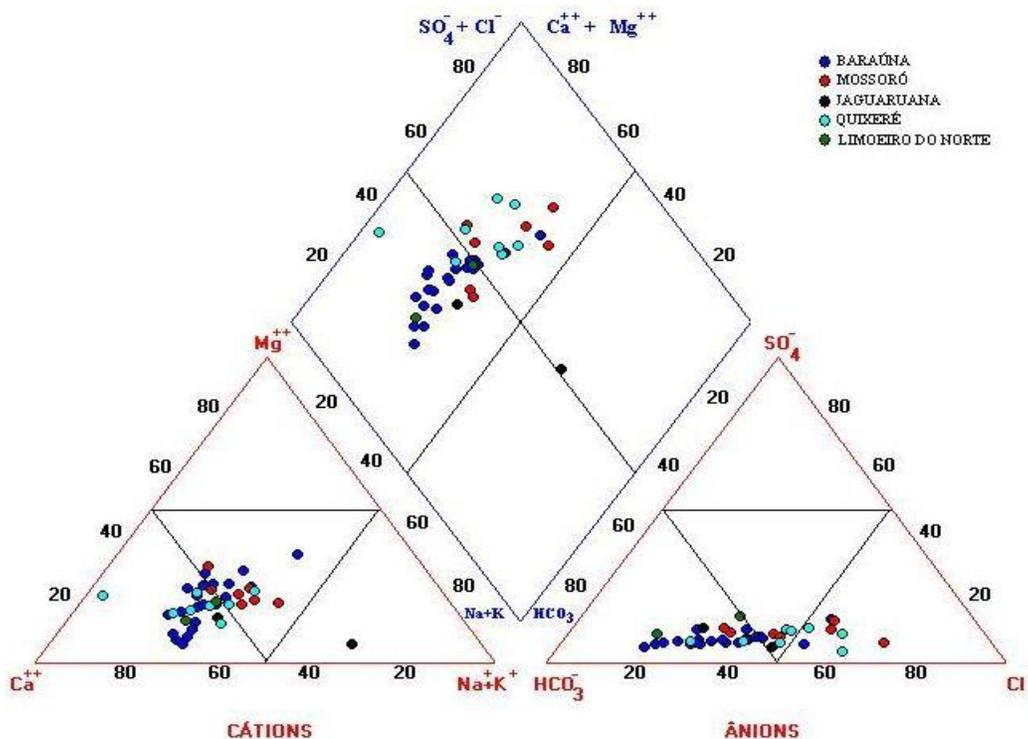


Figura 5.21- Diagrama de Piper para o Primeiro Grupo com amostras de janeiro de 2010.

No lado direito do dendograma da Figura 5.19 estão a amostra número 8, representando o poço B17, e outro grupo, formado por sete poços localizados em Mossoró, M01, M03, M11, M12, M18, M33 e M34, e três poços em Jaguaruana, J04, J05 e J07, representados no dendograma, respectivamente pelos números 30, 31, 37, 38, 40, 49, 50, 54, 55 e 57. Esse grupo é formado por amostras que tiveram carga fatorial mais significativa no Fator 2 da análise fatorial Q-modal (página 82), sendo constituído pelos poços do município de Mossoró.

Da tabela 5.29 observa-se que as águas dos poços que formam esse Segundo Grupo têm condutividade elétrica mais alta que as do Primeiro Grupo, sendo também o cálcio e o sódio os cátions predominantes e o cloreto o ânion predominante. As concentrações médias dos íons do cálcio e do sódio também são próximas, produzindo águas mistas com relação aos cátions. Na coleta de janeiro, a concentração de cloretos é maior que a de bicarbonatos, produzindo amostras de águas cloretadas (figura 5.22).

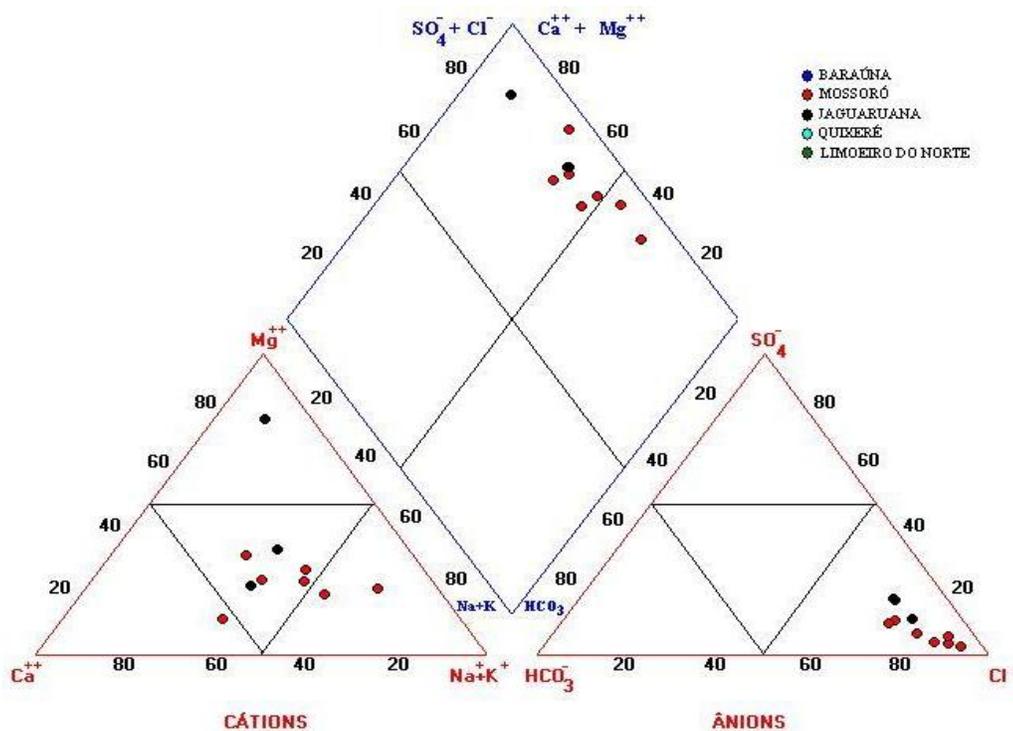


Figura 5.22- Diagrama de Piper para o Segundo Grupo com amostras de janeiro de 2010.

Observa-se ainda na tabela 5.29 que a concentração de bicarbonatos no Primeiro Grupo novamente é maior que a concentração de cloretos, evidenciando recarga natural do aquífero pelas águas das chuvas.

Da mesma maneira que com as amostras no período seco, no início do período chuvoso o Segundo Grupo, em geral, tem as maiores concentrações de todos os parâmetros (exceto para o ânion bicarbonato).

A tabela 5.30 mostra um resumo das Análises Q-modal e Análise de Grupo, onde é possível compará-las. Dessa tabela vê-se que, em ambos os períodos de coleta, o Fator 1 corresponde ao Grupo 1 e o Fator 2 corresponde ao Grupo 2.

Tabela 5.30- Comparação entre a Análise Fatorial Q-modal e a Análise de Grupo (*Cluster*).

Análise Fatorial Q-modal						
Município	Total	Nº de poços				
		Setembro/2009		Total	Janeiro/2010	
		F1	F2		F1	F2
Baraúna	42	33	9	29	22	7
Mossoró	30	10	20	23	9	14
Quixeré	14	11	3	16	9	7
Jaguaruana	9	4	5	8	4	4
Limoeiro	2	1	1	4	4	0
Análise de Grupo						
Município	Total	Nº de poços				
		Setembro/2009		Total	Janeiro/2010	
		GRUPO 1	GRUPO 2		GRUPO 1	GRUPO 2
Baraúna	42	42	0	29	21	0
Mossoró	30	18	11	23	7	7
Quixeré	14	14	0	16	9	0
Jaguaruana	9	2	6	8	2	3
Limoeiro	2	0	2	4	2	0

A figura 5.23 (a) e (b) mostram os percentuais de colaboração de poços de cada município para os dois grupos obtidos com dados de setembro de 2009. Observa-se que o Primeiro Grupo, assim como o Fator 1 obtido na análise Q-modal obtido com os dados de setembro de 2009, é representado basicamente, pelos poços do município de Baraúna e que o Segundo Grupo, assim como o Fator 2 da análise Q-modal é representado basicamente pelos poços do município de Mossoró.

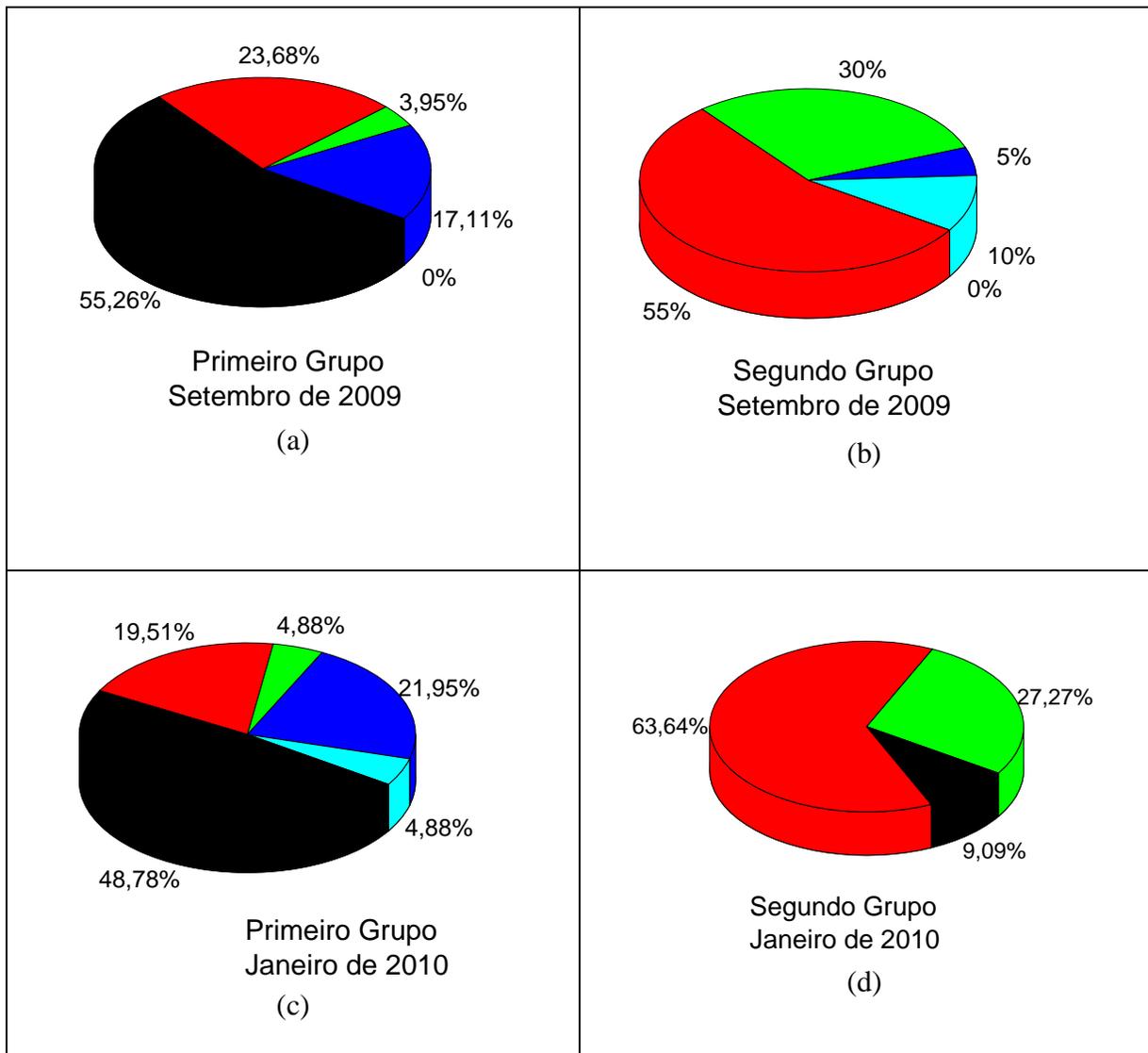


Figura 5.23- Percentuais de poços que pertencem ao Primeiro Grupo e ao Segundo Grupo da Análise *Cluster* utilizada em amostras coletadas em setembro de 2009 e janeiro de 2010.

A figura 5.23 (c) e (d) mostram os percentuais de colaboração de poços de cada município para os dois grupos obtidos com dados de janeiro de 2010. Observa-se que o Primeiro Grupo, assim como o Fator 1 obtido na análise Q-modal obtido com os dados de setembro de 2009, é representado basicamente, pelos poços do município de Baraúna e o Segundo Grupo, assim como o Fator 2 da análise Q-modal, é representado basicamente pelos poços localizados no município de Mossoró.

A separação dos poços em grupos e a posterior correspondência com o Fator 1 da Análise Q-modal (representando as amostras do município de Baraúna) e o Fator 2 (representando as amostras do município de Mossoró) poderia indicar uma conectividade entre esses poços ou que o local onde estão os poços possui litologia semelhante, o que permite uma recarga e condições de armazenamento da água semelhantes.

6- CONCLUSÕES

Dos resultados de hidroquímica, das análises gráficas e das análises estatísticas Fatorial R-modal, Q-modal e Análise de Grupo realizadas no conjunto dos dados hidroquímicos de amostras de água subterrânea, coletadas em poços em duas etapas de campo, (97 amostras no período seco, em setembro de 2009 e 80 amostras no início do período chuvoso, em janeiro de 2010), nos municípios de Baraúna e Mossoró, no Estado do Rio Grande do Norte, e Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte, no Estado do Ceará, conclui-se que:

- Das análises hidroquímicas:

- Sob o aspecto temporal, todos os parâmetros analisados mudaram durante o período de amostragem. Em geral, foi observado que as amostras de água tinham maior concentração iônica na segunda coleta, realizada no período chuvoso, indicando processos de dissolução das rochas na água, durante o processo de recarga do aquífero.

- A variabilidade espacial da salinidade das águas no aquífero Jandaíra foi constatada, pela condutividade elétrica que variou em larga faixa: de 177 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (nas águas do poço Q14, a menos salina de todas) a 13 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (nas águas do poço M11, a mais salina de todas).

- Considerando os valores limites das concentrações iônicas indicadas pelo Ministério da Saúde (CONAMA 2005) para a potabilidade das águas e apresentados na tabela 3.2, observa-se que para alguns dos parâmetros analisados, a grande maioria das amostras não eram consideradas potáveis. Algumas possuíam alto teor de cloro, como por exemplo, nas águas dos poços B02 (1340,3 mg/L), B17 (1697,1 mg/L), M03 (2198,5 mg/L), M11 (3895,5 mg/L), J05 (1205,3 mg/L), Q11 (627 mg/L). As águas dos poços amostrados não são utilizadas para o consumo humano, mas usadas para atividade agrícola irrigada.

- Das análises gráficas dos parâmetros nas duas coletas:

- As concentrações dos parâmetros cálcio, magnésio, sódio, cloreto e potássio crescem com a condutividade elétrica nas águas com $\text{CE} < 7300 \mu\text{S}/\text{cm}$. A

concentração de cloretos é a que apresenta a melhor correlação com a condutividade elétrica enquanto que a menor correlação é com a concentração de potássio.

- A relação linear entre a condutividade elétrica e a concentração de cloretos indica que o processo de evaporação juntamente com os aerossóis marinhos contribuem mais efetivamente para a salinidade das águas do que a dissolução das rochas no aquífero. Esta evaporação favorece a concentração de todos os íons, enquanto a dissolução das rochas durante a permanência da água no aquífero favorece o aumento de um ou outro íon.

- A concentração de sódio é bem correlacionada com a concentração de cloreto, indicando contribuição de aerossóis marinho como possível fonte de origem para ambos os íons na área de estudo.

- O pH das águas nas duas coletas realizadas varia na faixa de 5 a 8, caracterizando-as como ligeiramente ácidas a levemente básicas.

- O ferro não apresenta correlação positiva relativamente aos parâmetros hidroquímicos e em particular aos carbonatos. Isto sugere uma contribuição da dissolução de óxidos e/ou hidróxidos de ferro, até mesmo feldspatos portadores de Fe^{+3} , lixiviados da formação Barreiras sobrejacentes.

- Nas águas com concentração de cálcio abaixo de 200 mg/L, as concentrações dos bicarbonatos e de cálcio são diretamente correlacionadas indicando processo de dissolução de rochas carbonatadas.

- A concentração de magnésio em função dos bicarbonatos indica que somente algumas amostras apresentaram dissolução de dolomita.

- Da Análise Fatorial R-modal realizada nos dados de setembro de 2009:

- O primeiro fator, Fator 1, define uma boa associação entre a condutividade elétrica e as concentrações de cloreto, sódio, magnésio, cálcio e potássio. Ele representa a contribuição dos aerossóis de origem marinha carregados do litoral para o interior dos Estados, pela ação das correntes de vento e que são compostos principalmente por cloretos de sódio e potássio. A presença da dureza também no Fator 1 revela a influência litológica do calcário Jandaíra.

- As maiores cargas no segundo fator, Fator 2, foram obtidas com os parâmetros bicarbonato e pH, mostrando traços de dissolução de rochas calcárias, como a calcita, CaCO_3 , do calcário Jandaíra.

- Os fatores onde os íons nitrogenados tiveram carga fatorial significativa explicam pouco da variância dos dados, indicando que existe uma leve ação antrópica nas águas da região.

- Os fatores 3 a 7 tiveram o domínio de uma só variável em cada um deles, indicando uma mistura parcial de diferentes tipos de água.

- Da Análise Fatorial R-modal realizada nos dados de janeiro de 2010:

- O primeiro fator, Fator 1, define boa associação entre a condutividade elétrica e as concentrações de cloretos, magnésio, sódio e baixa associação com o potássio, representando a contribuição dos aerossóis de origem marinha carreados do litoral para o interior dos Estados, compostos principalmente por cloretos de sódio. A presença da dureza novamente no Fator 1 reforça a idéia de influência litológica do calcário Jandaíra.

- A maior carga no segundo fator, Fator 2, foi obtida com o parâmetro bicarbonato, representando a recarga do aquífero com água de chuva.

- Os fatores onde os íons nitrogenados tiveram carga fatorial significativa explicam pouco da variância do sistema, indicando que existe uma leve ação antrópica nas águas da região.

- Nos fatores 3 a 8 houve o domínio de uma só variável em cada fator, indicando novamente uma mistura parcial de diferentes tipos de água.

- Comparando o Fator 1 da primeira coleta com o Fator 1 da segunda coleta, observa-se que de setembro para janeiro a condutividade elétrica e a concentração de sódio passaram a ter um papel mais significativo na qualidade das águas da região e que o cálcio foi o íon que mais perdeu importância.

- Comparando o Fator 2 da primeira coleta com o Fator 2 da segunda, vê-se que a recarga com água de chuva, ricas no ânion bicarbonato, foi evidenciada.

- Da análise fatorial Q-modal realizada nos dados de setembro de 2009:

- O primeiro fator, Fator 1, mostra que, talvez devido à posição geográfica próxima ou por conectividade entre os poços, 59 poços armazenam águas quimicamente semelhante, estando a maioria deles localizados no município de Baraúna, enquanto que o segundo fator, Fator 2, associa 38 poços, em sua maioria localizados no município de Mossoró.

- Da análise fatorial Q-modal realizada nos os dados de janeiro de 2010:

- O primeiro fator, Fator 1, mostra que, talvez pela posição geográfica próxima ou por conectividade entre os poços, 48 poços armazenam águas quimicamente semelhante, estando a maioria deles localizados no município de Baraúna, enquanto que o segundo fator, Fator 2, associa 32 poços, em sua maioria localizados no município de Mossoró.

- Nas duas coletas, o primeiro fator está associado aos poços de Baraúna e o segundo fator está associado aos poços de Mossoró.

- Da análise *Cluster* realizada nos os dados de setembro de 2009:

- Os grupos obtidos no dendograma de dissimilaridade mostram um perfil heterogêneo das amostras.

- Em geral, os poços do primeiro fator, Fator 1, da Análise Fatorial Q-modal são os mesmos do primeiro e maior grupo da análise *Cluster*, com exceção de algumas amostras.

- Das 76 amostras do maior e Principal Grupo, 42 estão localizados no município de Baraúna (55%). O Primeiro Grupo, assim como o Fator 1 obtido na Análise Fatorial Q-modal feita com os dados de setembro de 2009, representa os poços do município de Baraúna. As águas dos poços do Principal Grupo têm condutividade elétrica relativamente baixa (com valor médio de 1784,36 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sendo classificadas como bicarbonatadas mistas.

- Das 20 amostras do Segundo Grupo mais numeroso, 11 pertencem ao município de Mossoró (55%). Ele é equivalente ao conjunto de poços do Fator 2 obtido na análise Q-modal, representado basicamente, pelos poços do município de Mossoró. As

águas dos poços que formam o Segundo Grupo têm condutividade elétrica mais alta (com valor médio de 4371,45 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sendo classificadas como cloretadas mistas.

- As amostras do Primeiro Grupo têm concentrações menores em todos os parâmetros (exceto para o ânion bicarbonato) do que as amostras do Segundo Grupo.

- Da análise *Cluster* realizada nos os dados de janeiro de 2010:

- O aparecimento de diferentes grupos no dendograma de dissimilaridade revela a mistura com água de recarga pelas chuvas.

- O maior grupo é constituído por 41 amostras, a maioria delas localizadas no município de Baraúna; é equivalente ao primeiro fator, Fator 1, da Análise Fatorial Q-modal. As águas dos poços que formam esse Principal Grupo tem condutividade elétrica relativamente baixa (com valor médio de 1534,29 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sendo classificadas como bicarbonatadas mistas.

- Um outro grupo, formado por 7 poços localizados em Mossoró e 3 poços em Jaguaruana, teve carga fatorial mais significativa no Fator 2 da Análise Fatorial Q-modal, constituído em sua maioria também por poços do município de Mossoró. As águas deste grupo têm condutividade elétrica alta (com valor médio de 5916,66 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sendo classificadas como cloretadas mistas.

- Como com as amostras no período seco, o Segundo Grupo, em geral, tem as maiores concentrações de todos os parâmetros (exceto para o ânion bicarbonato).

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. R. F. Análise Estatística Multivariada e Modelo Geoquímico inverso no Estudo da Qualidade da Água Subterrânea na Bacia do Forquilha em Quixeramobim-Ceará. Dissertação de Mestrado. 126 f. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

A.P.H.A. (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 16th. New York. 1992.

BAKAÇ, M. R-mode Factor analysis applied to the distribution of radionuclides in Turkey. *Radiation Physics and Chemistry* 71: 781-782. 2004.

BAKAÇ, M. & KUMRU, M. N. Factor analysis applied to distribution of elements in western Turkey. *Applied Radiation and Isotopes* 55: 721-729. 2001.

BENTO, E. S. Hidrogeoquímica e Modelo Hidrogeológico das águas subterrâneas no baixo curso do rio Macaé, município de Macaé-RJ. Dissertação de Mestrado. 105 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, 2006.

BETIOLLO, L. M. Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil. 117 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2006.

CABRAL, N. M. T. & LIMA, L. M. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras nos bairros centrais de Belém, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, Belém. 1(1), 149-166. 2006.

CCME-CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT. Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments: protection de la vie aquatique- tableaux sommaires, mis à jour, dans Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, 1999. Le Conseil, Winnipeg, 4p. 2001.

CERQUEIRA, D. S.; NETTO, E. T.; CRUZ, E. S. Livro: O Universo da Matemática. Volume único. Ed. Escala Educacional, São Paulo. 2006.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357 /05 23 de janeiro de 2005. www.mma.gov.br/port/conama. Acesso em 03/03/2010.

CRUZ, A.; JR, G. C. S.; ALMEIDA, G. M. Modelagem Hidrogeoquímica do aquífero freático da restinga de Piratininga, Niterói- RJ. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Curitiba- Paraná. 2006.

DALTON, M. G. & UPCHURCH, S. B. Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis. *Groundwater* 16: 228-233. 1978.

DAVIS, S. N. & DE WIEST, R. J. M. **Hydrogeology**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York – London – Sydney. Third Printing, November, 1970, 463 p. 1966.

EISENREIZH, S. J. 1981. Atmospheric pollutants in natural water. Chicago, Ann Arbor, (Sci. Pub.).

FERNANDES, M. A. B. Análise Estatística R-modal e Modelo Geoquímico Inverso no Estudo da Qualidade da Água Subterrânea na Região Metropolitana de Fortaleza- CE. 115 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

FISHER, D. W.. Annual Variations in Chemical Composition of Atmospheric Precipitation, eastern North Carolina and southeastern Virginia: U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1535-M: 21. 1968.

FNS (Fundação Nacional de Saúde). Manual Técnico de Análise de Água para Consumo Humano, Fundação Nacional de Saúde - Brasília, 211p. 1999.

FUNASA (Fundação Nacional de Saúde). Portaria N° 518 do Ministério de Saúde, Brasília. 2004. http://www.springway.com.br/agua_contaminação_fisico.htm. Acesso: 10/12/2011.

FUNCEME- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Disponível em www.funceme.br. Acesso em 15/06/2009.

GRANDE, J. A.; GONZÁLEZ, A.; BELTRÁN, R.; SÁNCHEZ-RODAS, D. Application of Factor Analysis to the study of contamination in the Aquifer System of Ayamonte-Huelva (Spain). *Groundwater* 34 (1): 155-161. 1996.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariadas de dados**, 5° edição. Porto Alegre, 593p. 2005.

HEM, J. D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of natural Waters: U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, Third edition. P. 89- 120. 1985.

JUNGE, C. E.. Sulfur in the atmosphere. *Journ. Geophys. Resear.* 65: 227-237. 1960.

LAWRENCE, F. W. & UPCHURCH, S. B. Identification of Recharge Areas using Geochemical Factor Analysis. *Groundwater* 20(6): 680-687. 1982.

LIU, CW.; LIN, KH.; KUO, YM. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *The Science of the Environment* 313: 77-89. 2003.

LOGAN, J.. Interpretação de análises químicas da água. US Agency for Int. Devel., Recife. 67 p. 1965.

MACHADO, C. J. F. M. Modelagem Geoquímica e de Fluxos do Sistema Aquífero Subterrâneo na Bacia Sedimentar do Araripe. 116 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MATIAS, G. D. V., SILVA, L. M. R., KHAN, A. S.. Perfil dos produtores de frutas do município de Limoeiro do Norte – CE frente ao novo paradigma de desenvolvimento do setor. *Revista Ciência Agronômica*. 34(1). 2003.

MEDONÇA, J. L.; MEDEIROS, A. L. C.; AZEVEDO, J. C. C. Considerações sobre a hidrogeoquímica do sistema aquífero terciário Tejo-Sado na região central da bacia do Baixo Tejo. 7º Congresso da Água. Lisboa-Portugal. 2004.

MINGOTI, S.A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte. Ed. UFMG, 295 p. 2005.

NASCIMENTO, S. A. M.; BARBOSA, J. S. F.; CRUZ, M. J. M.; LIMA, C. M. Hidrogeoquímica e Índice de Saturação dos minerais no sistema aquífero do Alto Cristalino de Salvador, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 39 (2): 230-237, 2008.

OLOBANIYI, S. B. & OWOYEMI, F. B. Characterization by factor analysis of the chemical facies of groundwater in the Deltaic Plain Sands aquifer of Warri, western

Niger delta, Nigeria. African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering Series 7(1), 73-81. 2006.

OMS. (Organização Mundial da Saúde). Guias para a Calidad Del Água Potable. OMS. 3: 255p. 1998.

PROÁGUA NACIONAL. 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. 416 p. 2010.

REGHUNATH, R.; MURTHY, T. R. S.; RAGHAVAN, B. R. The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, Índia. Water Research. 36: 2437-2442. 2002.

RENICK, B. C. Base Exchange in Ground Water by Silicates as Illustrated in Montana: U. S. Geological Survey Wate-Supply Paper 520-D . p 53-72. 1925.

RICHTER, C. A. & NETTO, J. M. A.. Tratamento de Água – Tecnologia Atualizada. Ed. Edgard Blücher LTDA. 3º edição – 2000. 132p. 1991.

SALES, H. B. & GOUVEIA, S. T.. Manual de técnicas analíticas para análise de águas, Laboratório de Química Ambiental- LAQA. – UFC, 50 p. 1997.

SANTIAGO, M. M. F.. Mecanismos de Salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará. 176 f. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 1984.

SANTOS, I. N.; HORBE, A. M. C.; SILVA, M. S. R.; MIRANDA, S. Á. F. Influência de um aterro sanitário e de efluentes domésticos nas águas superficiais do rio Tarumã e afluentes – AM. Revista Acta Amazonica. 36 (2): 229-236. 2006.

SANTOS, I. R.; BAISCH, P.; LIMA, G. T. N. P.; SILVA-FILHO, E. V. Metais pesados em sedimentos superficiais da lagoa Mirim, fronteira Brasil-Uruguai. Geochimica Brasiliensis, 17(1): 37-47. 2003.

SENTHILKUMAR, G.; RAMANATHAN, A. L.; NAINWAL, H. C.; CHIDAMBARAM, S. Evaluation of the hydro geochemistry of groundwater using factor analysis in the Cuddalore coastal region, TamilNadu, Índia. Indian Journal of Marine Sciences. 37 (2). 181-185. 2008.

SILLEN, L. G. & MARTELL, A. E.. Stability Constants of Metal - Ion Complexes: Chemical Society [London] Special Publication 17: 754. 1964.

SUASSUNA, J. 2007 O Processo de Salinização das Águas Superficiais e Subterrâneas no Nordeste Brasileiro. Disponível em: www.fundaj.gov.br/geral/textos%20online/.../salinizacao.pdf. Acessado em 15 de Abril de 2012.

USUNOFF, E. J. & GUZMÁN-GUZMÁN, A. Multivariate analysis in Hydrochemistry: an example of the use of Factor and Correspondence Analyses. Groundwater 27(1) 27-34. 1989.

Wikipédia- A Enciclopédia livre. Ferro. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ferro>. Acessado em 28 de Março de 2012.