

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

**ADRIANO LEAL DE BRITO**

**OXIGÊNIO-18 E DEUTÉRIO TRAÇADORES DO SISTEMA DE AQUÍFEROS NA  
BACIA SEDIMENTAR DO ARARIPE**

**FORTALEZA**

**2012**

**ADRIANO LEAL DE BRITO**

**OXIGÊNIO-18 E DEUTÉRIO TRAÇADORES DO SISTEMA DE AQUÍFEROS NA  
BACIA SEDIMENTAR DO ARARIPE.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará para a obtenção de título de mestre em Física. Área de concentração: Física da Matéria Condensada

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Marlúcia Freitas Santiago.

**FORTALEZA**

**2012**

ADRIANO LEAL DE BRITO

OXIGÊNIO-18 E DEUTÉRIO TRAÇADORES DO SISTEMA DE AQUÍFEROS NA  
BACIA SEDIMENTAR DO ARARIPE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará para a obtenção de título de mestre em Física. Área de concentração: Física da Matéria Condensada.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Marlúcia Freitas Santiago.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Marlúcia Freitas Santiago (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alfredo Nelson Cabral Serejo  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

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

- 
- B875o Brito, Adriano Leal de.  
Oxigênio-18 e deutério traçadores do sistema de aquíferos na Bacia Sedimentar do Araripe. / Adriano Leal de Brito,. – 2012.  
95 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação em Física , Fortaleza, 2012.  
Área de Concentração: Física da Matéria Condensada.  
Orientação: Profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago
1. Águas subterrâneas. 2. Isótopos estáveis. 3. Aquíferos. I. Título.

A Deus.

A meus pais, Francisca e Luiz.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Marlúcia Freitas Santiago, pela dedicada e segura orientação e pelo apoio incondicional durante o desenvolvimento deste trabalho.

A coordenação de Pós-Graduação do Departamento de Física da UFC, na pessoa do coordenador Prof. Antônio Gomes de Souza Filho.

A técnica Maria do Carmo Germano do Laboratório de Carbono-14 pela convivência harmoniosa e excelente atenção dispensada.

Aos Professores do Departamento de Física que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro através de bolsa a mim concedida. `

À COGERH pela liberação dos resultados das medidas isotópicas.

A todos os meus amigos da Graduação e da Pós-graduação.

## RESUMO

Os traçadores naturais oxigênio-18 e deutério foram utilizados para identificar características dinâmicas das reservas hídricas subterrâneas na Bacia Sedimentar do Araripe, através da análise de amostras de água coletadas em 40 poços nos meses de janeiro, abril, julho e outubro de 2011. Os pontos de amostragem localizam-se em 08 municípios e medidas de condutividade elétrica, que expressa salinidade das águas, também foram realizadas. Os resultados mostram variação espacial e temporal dos parâmetros analisados, mas a média dos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  em amostras de 33 poços é de  $-3,22 \pm 0,05$  (‰) que é o valor médio das chuvas atuais na região. As amostras dos sete poços restantes apresentaram maiores flutuações e quatro deles apresentaram valores abaixo de  $-3,2$ ‰. As retas meteóricas, que expressam medidas de deutério versus oxigênio-18, construídas com valores de cada coleta mostram coeficiente angular com média de  $7,87 \pm 0,60$  ‰ cerca do valor da Reta Meteórica Mundial. O excesso de deutério cresceu no período de amostragem de 7,26 a 9,38 ‰ refletindo processos internos no aquífero. As amostras com valores de  $\delta^{18}\text{O}$  em abaixo do das águas meteóricas atuais mostram mistura de paleoáguas já identificadas com águas de recargas modernas; as amostras com estes valores não são distinguíveis pelas suas condutividades elétricas que estão na faixa das amostras atuais caracterizando a importância dos traçadores isotópicos.

**Palavras-chave:** Isótopos ambientais, Hidrologia Isotópica, Araripe.

## ABSTRACT

The natural tracers deuterium and oxygen-18 were used to identify the dynamic characteristics of the groundwater reserves in the Araripe Sedimentary Basin, through the analysis of water samples collected in 40 wells in January, April, July and October 2011. The sampling points are located in 08 municipalities and electrical conductivity measurements, which expresses water salinity, were also performed. The results show spatial and temporal variation of the parameters analyzed, but the average values of  $\delta^{18}\text{O}$  in samples from 33 wells is  $-3.22 \pm 0.05$  (‰) which is the average rainfall in the region today. Samples of the remaining seven wells showed higher fluctuations and four had values below  $-3.2$  ‰. The meteoric lines that express measures of deuterium versus oxygen-18, constructed with values of each sample show a mean slope of  $7.87 \pm 0.60$  ‰ about the value of the World Meteoric Line. The excess of deuterium in the sample period increased from 7.26 to 9.38 ‰ reflecting internal processes in the aquifer. Samples with values of  $\delta^{18}\text{O}$  in meteoric waters below the current mix of show paleowater already identified with modern recharge water, the samples with these values are not distinguishable by their electrical conductivities that are current in the range of samples characterizing the importance of isotopic tracers.

**Keywords:** Environmental Isotopes, Isotope Hydrology, Araripe.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b> –	Localização das Bacias Sedimentares do Araripe e do Apodi, no Ceará.....	19
<b>Figura 2.2</b> –	Histograma de pluviometria no município de Crato, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011.....	22
<b>Figura 2.3</b> –	Histograma de pluviometria no município de Juazeiro do Norte, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011.....	22
<b>Figura 2.4</b> –	Histograma de pluviometria no município de Mauriti, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011.....	23
<b>Figura 2.5</b> –	Histograma de pluviometria no município de Missão Velha, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011.....	23
<b>Figura 2.6</b> –	Representação esquemática da coluna estratigráfica da Bacia Sedimentar do Araripe.....	25
<b>Figura 3.1</b> –	Componentes de Espectrômetro de Massa.....	35
<b>Figura 3.2</b> –	Detalhes do Sistema Fonte de Íons, Analisador de Massa e Detector.....	36
<b>Figura 3.3</b> –	Analisador de Massas.....	37
<b>Figura 4.1</b> –	Localização dos pontos amostrados.....	40
<b>Figura 4.2</b> –	Relação D/H em Amostras de água do Sistema de Aquíferos na Bacia Sedimentar do Araripe.....	44
<b>Figura 4.3</b> –	Sistema de Admissão e de Extração de CO <sub>2</sub> .....	45
<b>Figura 4.4</b> –	Espectrômetro com Sistema Duplo de Admissão.....	46
<b>Figura 5.1</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta D\%$ e de $\delta^{18}O\%$ com o tempo em amostras de águas subterrâneas nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS).....	58
<b>Figura 5.2a</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta D\%$ com o tempo em amostras de água subterrânea no município do Crato (CRT).....	60
<b>Figura 5.2b</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta^{18}O\%$ com o tempo em amostras de água subterrânea no município do Crato (CRT).....	61
<b>Figura 5.3a</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta D\%$ com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Juazeiro do Norte (JUN).....	64

<b>Figura 5.3b</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta^{18}\text{O}\%$ com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Juazeiro do Norte (JUN).....	65
<b>Figura 5.4</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta\text{D}\%$ e $\delta^{18}\text{O}\%$ com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT).....	67
<b>Figura 5.5</b> –	Medidas Isotópicas de $\delta\text{D}\%$ e $\delta^{18}\text{O}\%$ com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Missão Velha (MIV).....	69
<b>Figura 5.6</b> –	$\delta^{18}\text{O}$ de águas coletadas em janeiro, abril, julho e outubro de 2011 com largas faixas de variação.....	70
<b>Figura 5.7</b> –	Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS).....	73
<b>Figura 5.8</b> –	Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Crato (CRT).....	75
<b>Figura 5.9</b> –	Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Juazeiro do Norte (JUN).....	77
<b>Figura 5.10</b> –	Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT).....	79
<b>Figura 5.11</b> –	Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Missão Velha (MIV).....	80
<b>Figura 5.12</b> –	Condutividade elétrica de águas coletadas em janeiro, abril, julho e outubro de 2011 dos poços com largas faixas de variação de $\delta^{18}\text{O}$ ..	81
<b>Figura 5.13</b> –	Relação $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de janeiro de 2011.....	82
<b>Figura 5.14</b> –	Relação $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de abril de 2011.....	83
<b>Figura 5.15</b> –	Relação $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de julho de 2011.....	83
<b>Figura 5.16</b> –	Relação $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de outubro de 2011.....	84
<b>Figura 5.17</b> –	Relação CE - $\delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de janeiro.....	85
<b>Figura 5.18</b> –	Relação CE - $\delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de abril.....	86
<b>Figura 5.19</b> –	Relação CE - $\delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de julho.....	87
<b>Figura 5.20</b> –	Relação CE - $\delta^{18}\text{O}$ das amostras da coleta de outubro.....	87

<b>Figura 5.21</b> –	Diferença de valores de CE e de $\delta^{18}\text{O}$ entre as coletas de abril e de janeiro.....	88
<b>Figura 5.22</b> –	Diferença de valores de CE e de $\delta^{18}\text{O}$ entre as coletas de julho e de abril.....	89
<b>Figura 5.23</b> –	Diferença de valores de CE e de $\delta^{18}\text{O}$ entre as coletas de outubro e de julho.....	90

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	– Pluviometria nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte em 2010 e 2011.....	21
<b>Tabela 2.2</b>	– Pluviometria nos municípios de Mauriti e Missão Velha em 2010 e 2011.....	21
<b>Tabela 4.1</b>	– Pontos amostrados nos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres na Bacia Sedimentar do Araripe.....	41
<b>Tabela 4.2</b>	– Pontos amostrados nos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras na Bacia Sedimentar do Araripe.....	42
<b>Tabela 5.1a</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Janeiro de 2011.....	48
<b>Tabela 5.1b</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Janeiro de 2011.....	49
<b>Tabela 5.2a</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Abril de 2011.....	50
<b>Tabela 5.2b</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Abril de 2011.....	51
<b>Tabela 5.3a</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Julho de 2011.....	52
<b>Tabela 5.3b</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Julho de 2011.....	53
<b>Tabela 5.4a</b>	– Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Outubro de 2011.....	54

<b>Tabela 5.4b</b>	–	Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Outubro de 2011.....	55
<b>Tabela 5.5</b>	–	Concentração Isotópica de $\delta D\text{‰}$ e de $\delta^{18}O\text{‰}$ com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS), juntamente com as médias, desvios padrão e medianas.....	57
<b>Tabela 5.6</b>	–	Concentração Isotópica de $\delta D\text{‰}$ e de $\delta^{18}O\text{‰}$ com o tempo em amostras de água subterrânea do município do Crato (CRT), juntamente com as médias, desvios padrão e medianas.....	59
<b>Tabela 5.7</b>	–	Concentração Isotópica de $\delta D\text{‰}$ e $\delta^{18}O\text{‰}$ em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas no município de Juazeiro do Norte, juntamente com as médias, desvios padrão e medianas.....	62
<b>Tabela 5.8</b>	–	Concentração Isotópica de $\delta D\text{‰}$ e $\delta^{18}O\text{‰}$ em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT) juntamente com as médias, desvios padrão e medianas.....	66
<b>Tabela 5.9</b>	–	Concentração Isotópica de $\delta D\text{‰}$ e $\delta^{18}O\text{‰}$ em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas no município de Missão Velha (MIV), juntamente com as médias, desvios padrão e medianas.....	68
<b>Tabela 5.10</b>	–	Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS) e médias, desvios padrão e medianas.....	72
<b>Tabela 5.11</b>	–	Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea do município do Crato (CRT) e médias, desvios padrão e medianas.....	74
<b>Tabela 5.12</b>	–	Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea do município de Juazeiro do Norte (JUN) e médias, desvios padrão e medianas.....	76

<b>Tabela 5.13</b> – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea dos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT) e médias, desvios padrão e medianas.....	78
<b>Tabela 5.14</b> – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea do município de Missão Velha (MIV) e médias, desvios padrão e medianas.....	79

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Revisão Bibliográfica.....	16
2.	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS.....	19
2.1	Clima.....	20
2.2	Geologia.....	24
2.3	Hidrografia.....	25
2.4	Solos.....	26
2.5	Geomorfologia.....	26
3.	HIDROLOGIA ISOTÓPICA.....	28
3.1	Padrão.....	29
3.2	Delta por mil.....	29
3.3	Reta Meteórica.....	30
3.4	Constantes de Fracionamento.....	30
3.5	Fracionamento Isotópico por Condensação.....	32
3.6	Espectrômetro de Massa.....	33
3.6.1	<i>Princípio de Funcionamento.....</i>	34
3.6.2	<i>Componentes de um Espectrômetro de Massa.....</i>	35
4.	METODOLOGIA.....	39
4.1	Parâmetros Analisados.....	39
4.1.1	<i>Oxigênio-18 e Deutério.....</i>	39
4.1.2	<i>Coleta das Amostras.....</i>	43
4.1.3	<i>Preparação das Amostras.....</i>	43
4.1.4	<i>Condutividade Elétrica.....</i>	47
5	RESULTADOS.....	48
5.1	$\delta D$ e $\delta^{18}O$ com o Tempo.....	56
5.2	Condutividade Elétrica com o Tempo.....	71
5.3	Relação $\delta D$ - $\delta^{18}O$ .....	81
5.4	Condutividade elétrica versus $\delta^{18}O$ ‰.....	85
5.5	Varição de CE versus variação de $\delta^{18}O$ .....	88
6	CONCLUSÕES.....	91



## 1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas contribuem com uma parcela importante para o abastecimento de água chegando a ser a principal fonte dos recursos hídricos disponíveis em algumas áreas.

Como reserva mais protegida do que as águas superficiais cresce cada vez mais sua exploração, que requer o conhecimento das condições de armazenamento para uso sustentável.

O monitoramento do consumo através de medidas de nível estático e de vazão dos poços e de diferentes técnicas para identificação do sistema de aquíferos nas bacias sedimentares são parâmetros importantes para regular o consumo sem estresse das águas subterrâneas.

O uso de isótopos ambientais, principalmente medidas de oxigênio-18 e de deutério tem contribuído para identificação de condições de recarga e de armazenamento em cada aquífero, identificação de interação entre água subterrânea e água superficial fazendo parte em escala mundial de dados sobre as reservas subterrâneas a partir da década de 1960.

Utilizando estes isótopos que traçam as águas de chuva, a recarga principal dos aquíferos, identificam-se características dos armazenamentos subterrâneos. As águas de chuva são expostas às mudanças de temperatura (Dansgaard, 1964) produzindo chuvas com composições isotópicas que dependem da localização geográfica. O zoneamento geográfico foi identificado entre outros por Dansgaard & Tauber (1969).

A Reta Meteórica Mundial (RMM) obtida por Craig (1961a) com média de Retas Meteóricas Locais (RML) é característica da relação deutério - oxigênio-18. A relação  $\delta^{18}\text{O}$  - salinidade foi estudada por Craig e Gordon (1965) utilizando a relação entre os processos de evaporação e precipitação pluviométrica.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “Serviços técnicos referentes a 10 (dez) campanhas de coletas e análises hidroquímicas, bacteriológicas, agrotóxicos, BTEX, metais pesados e isótopos dos aquíferos das Bacias, Potiguar [06 (seis) campanhas] e Araripe [04 (quatro)], no Estado do Ceará” (COGERH, 2012), em andamento.

## 1.1 Objetivos

Identificar o sistema de aquíferos e recarga na Bacia Sedimentar do Araripe, no sul do Estado do Ceará, utilizando medidas dos isótopos naturais, oxigênio-18 e deutério, em amostra de água subterrânea amostradas em quatro campanhas.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

O estudo das águas subterrâneas usando isótopos ambientais iniciou-se no Brasil no final da década de 1960 com os trabalhos de Gat et al. (1968). No Nordeste Brasileiro, a pesquisa hidrológica intensificou-se devido à carência de água provocada pelas Secas e pela presença de águas salinizadas. Alguns trabalhos realizados na área são discutidos a seguir.

A utilização de isótopos ambientais nos recursos hídricos em área do Piauí começou no início da década de 1973 com o trabalho de Plata et al. (1973) para identificar a interação entre águas das lagoas e dos aquíferos adjacentes utilizando as concentrações dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério nos aquíferos das Bacias dos Rios Gurgéia e Fidalgo

Outro trabalho utilizando os isótopos ambientais, oxigênio-18 e deutério em água subterrânea do Piauí, no Vale do Gurguéia, foi realizado por Carneiro et al. (1998). Os autores mediram condutividade elétrica e estes dois isótopos em 40 amostras de poços do aquífero Cabeças identificando que houve mistura de paleoáguas com águas recentes. Os resultados mostraram também condutividades elétricas extremamente baixas com aproximadamente 90% das amostras apresentando valores inferiores a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mesmo em paleoáguas.

Os isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério foram utilizados por Costa Filho et al. (1998) para identificar o avanço da cunha salina na Planície do Recife já identificada utilizando métodos convencionais. Foram analisadas amostras dos aquíferos, Cabo, Boa Viagem e Beberibe Inferior, e os resultados mostraram que as águas estudadas sofreram processo de evaporação, mas não havia intrusão marinha.

Possíveis fugas sob o maciço de concreto da barragem de Tapacurá, em Pernambuco, foram estudadas por Vilar et al. (2001) utilizando técnicas isotópicas com os isótopos ambientais, oxigênio-18, deutério e carbono-13 medidos em amostras coletadas a montante e a jusante da barragem. Dos resultados obtidos os autores inferiram que a origem

das águas a montante era diferente das águas à jusante da barragem mostrando a inexistência de fuga por meio da formação geológica da barragem.

Pereira et al. (2002) utilizaram medidas de condutividade elétrica e as concentrações dos isótopos estáveis oxigênio-18 e deutério para identificar a origem das águas subterrâneas na cidade São Luís, Maranhão. Comparando as concentrações de  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta\text{D}$  e o excesso de deutério das águas subterrâneas da área de São Luís com as águas das chuvas de outras regiões do planeta, concluíram que as composições isotópicas locais são devidas às condições geográficas e climáticas.

Os isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério foram utilizados no estudo de águas subterrâneas das Formações Barreiras e Itapecuru no município de São Luís, Maranhão, por Pereira et al. (2004). Os resultados mostraram que os dois aquíferos são recarregados rapidamente e a existência de semi-confinamento do aquífero Itapecuru com recargas distribuídas regularmente.

A interconexão entre água superficial e água subterrânea foi estudada por Silva et al. (2004) utilizando medidas de oxigênio-18 e condutividade elétrica em amostras do açude São Gabriel e de dois poços em Juá no Ceará, localizados no domínio de rochas cristalinas. Os resultados identificaram a existência de interconexão hidráulica entre os poços e o açude.

Um modelo isotópico com medidas dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério foi utilizado por Pereira et al. (2007) para determinar a taxa de evaporação de três cacimbas e um açude, situados na Bacia da Gameleira em Aiuaba no Ceará. A inclinação da reta  $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$  mostrou intensa evaporação; no açude, na época da amostragem, e perda d'água média, de 62% em volume, devido à evaporação.

As águas subterrâneas armazenadas na Bacia do Riacho do Meio e na Bacia do Rosário em Lavras da Mangabeira foram estudadas por Granjeiro et al. (2007) utilizando medidas de isótopos ambientais. Os resultados mostraram diferentes tipos de água nas duas bacias com valores mais elevados de concentração de sódio na primeira.

Medidas de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  em águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Cariri no Ceará foram utilizadas por Silva et al. (2006) para estudar os diferentes sistemas aquíferos. Os autores identificaram processos geoquímicos variados foram facilitados pelo armazenamento das águas subterrâneas possibilitando analisar os efeitos do tectonismo utilizando dados destes isótopos ambientais.

Santiago et al. (2010) ao analisarem as concentrações de oxigênio-18 e deutério juntamente com as medidas de condutividade elétrica das águas dos aquíferos, Jandaíra e Açú, da Bacia Sedimentar Potiguar, Rio Grande do Norte puderam caracterizar as águas do

aquífero Jandaíra como águas modernas enquanto as águas do aquífero Açú foram classificadas como paleoáguas.

Medidas isotópicas de deutério e oxigênio-18 em amostras de águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador, Bahia foram utilizadas por Nascimento e Barbosa (2009). Os resultados produziram uma reta com valores diferentes da Reta Meteorica Mundial obtida por Craig (1961a). Os dados isotópicos mostraram também que o cristalino é intensamente alimentado pelas águas de chuva, devido às fraturas existentes.

Águas subterrâneas da Ilha de Itaparica foram estudadas por Pereira et al. (2010) utilizando as concentrações de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ . Os resultados das análises dos isótopos se enquadraram próximos à Reta Meteorica Mundial identificando um baixo tempo de residência das águas, sobretudo, devido ao clima quente, ao forte processo de evaporação e à intensa recarga que ocorre na Ilha (Mazor, 1991).

Os isótopos ambientais também foram utilizados no estudo de recursos hídricos em outras regiões como Botucatu, São Paulo. Silva (1983) concluiu que as variações nas concentrações isotópicas de oxigênio-18 e de deutério em épocas de diferentes recargas são causadas pelas oscilações climáticas naquela região.

Trabalhos realizados na Bacia Sedimentar do Cariri utilizando medidas isotópicas têm sido desenvolvidos em mais de duas décadas, destacamos os seguintes:

Medindo oxigênio-18 em amostras de fontes da escarpa da Chapada do Araripe e em amostras de água de chuva Frischkorn et al. (1990) identificaram o Efeito de Altitude de 0,2 ‰ por 100 m permitindo distinguir as contribuições de infiltração profunda através da Chapada e recarga local para o aquífero Missão Velha.

Usando medidas de carbono-14, oxigênio-18 e condutividade elétrica na caracterização das águas oriundas dos aquíferos Missão Velha Superior (Rio da Batateira), Missão Velha Inferior (Missão Velha) e Mauriti na Bacia Sedimentar do Araripe Santiago et al. (1995) identificaram a presença de paleoáguas em mistura com águas recentes.

No trabalho de Santiago et al. (1997) os autores diferenciaram águas subterrâneas de várias origens através de medidas de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{T}$  e condutividade elétrica. Misturas de águas de diferentes aquíferos foram descritas em termos de reações lineares  $\delta^{18}\text{O} - ^{14}\text{C}$  e  $\text{CE} - ^{14}\text{C}$ .

Com medidas de  $^{18}\text{O}$  e  $^{14}\text{C}$  em poços da bateria do Riacho dos Macacos em Juazeiro do Norte, Ceará foi possível identificar conexões hidráulicas entre os aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha e os percentuais de contribuição de cada um deles Mendonça et al. (1997).

## 2. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

As águas subterrâneas estudadas estão armazenadas na Bacia Sedimentar do Araripe localizada no sul do Estado do Ceará na fronteira com o Estado de Pernambuco sendo a mais importante bacia sedimentar do Estado. Com 75% do território assentado no cristalino, as bacias sedimentares do Apodi (**a** na Figura 2.1) e a do Araripe (**b** na Figura 2.1) são extremamente importantes como reservas de água subterrânea para o Ceará. Este capítulo baseia-se predominantemente no trabalho da CPRM (2007) e trata das características da área estudada.

**Figura 2.1** – Localização das Bacias Sedimentares do Araripe e do Apodi, no Ceará



(Fonte : CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2007).

A Bacia Sedimentar do Araripe tem uma área de aproximadamente 11.000 km<sup>2</sup> e é o divisor de águas de três importantes bacias hidrográficas: dos rios Jaguaribe (CE) ao norte, do São Francisco (PE) ao sul e do Parnaíba (PI) a oeste. Na região, o recurso hídrico subterrâneo é a mais importante fonte de água potável para abastecimento público e privado.

## 2.1 Clima

O principal sistema sinótico gerador de precipitação que atua sobre o Estado do Ceará é a Zona de Convergência Intertropical, que oscila dentro da faixa dos trópicos; a ele se juntam as Frentes Frias, formadas originalmente no polo Sul e um Centro de Vorticidade Ciclônica, com tempo de atuação variável dentro do período de chuvas, e que atuam em menor escala na região (SRH – Superintendência dos Recursos Hídricos, 1992).

Além destes três sistemas sinóticos, outros sistemas atuam em menor escala, mas a Zona de Convergência Intertropical é sempre a mais importante. Este sistema se desloca entre os dois hemisférios provocando as chuvas no Nordeste.

O regime pluviométrico do Ceará é do tipo tropical e se caracteriza pela marcante irregularidade das chuvas no tempo e no espaço. Em relação ao tempo, dois períodos um chuvoso e outro seco ocorrem todos os anos; também é irregular a distribuição espacial das chuvas, no mesmo ano e de um ano para o outro.

O período chuvoso começa no verão e as chuvas mais intensas ocorrem na transição verão-outono com os índices pluviométricos mensais máximos ocorrendo entre fevereiro e março e os mais baixos no período entre junho e novembro.

A área apresenta clima tropical quente semiárido, caracterizado por ser quente com chuvas no outono (KÖPPEN, 1948). A média anual de temperatura fica entre 21°C e 28°C e a média de precipitação pluviométrica é cerca de 1000 mm por ano. De acordo com a FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2012) nos anos de 2010 e 2011, quando foram coletadas as amostras deste trabalho, as precipitações anuais nos municípios de Crato, Juazeiro do Norte, Missão Velha e Mauriti, foram respectivamente 943,2 mm e 1782 mm em Crato, 793,2 mm e 1528,8 mm em Juazeiro do Norte (Tabela 2.1); 738,5 mm e 1196,4 mm em Mauriti, 799,2 mm e 1208,4 mm em Missão Velha (Tabela 2.2).

**Tabela 2.1** – Pluviometria nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte em 2010 e 2011

Mês	Pluviometria (mm)			
	Crato		Juazeiro do Norte	
	2010	2011	2010	2011
Janeiro	293.1	438.5	183.0	481.0
Fevereiro	103.7	331.4	120.0	351.0
Março	134.2	193.8	105.0	214.0
Abril	115.6	133.4	168.5	54.0
Maio	31.4	131.6	13.0	107.0
Junho	40.0	12.0	49.0	0.0
Julho	18.0	7.0	0.0	0.0
Agosto	0.0	12.6	0.0	0.0
Setembro	0.0	0.0	0.0	0.0
Outubro	7.7	156.0	7.0	175.0
Novembro	5.8	73.0	0.0	45.0
Dezembro	193.6	99.1	148.0	102.0
Total	943.2	1782	793.2	1528.8

(Fonte: FUNCEME, 2012).

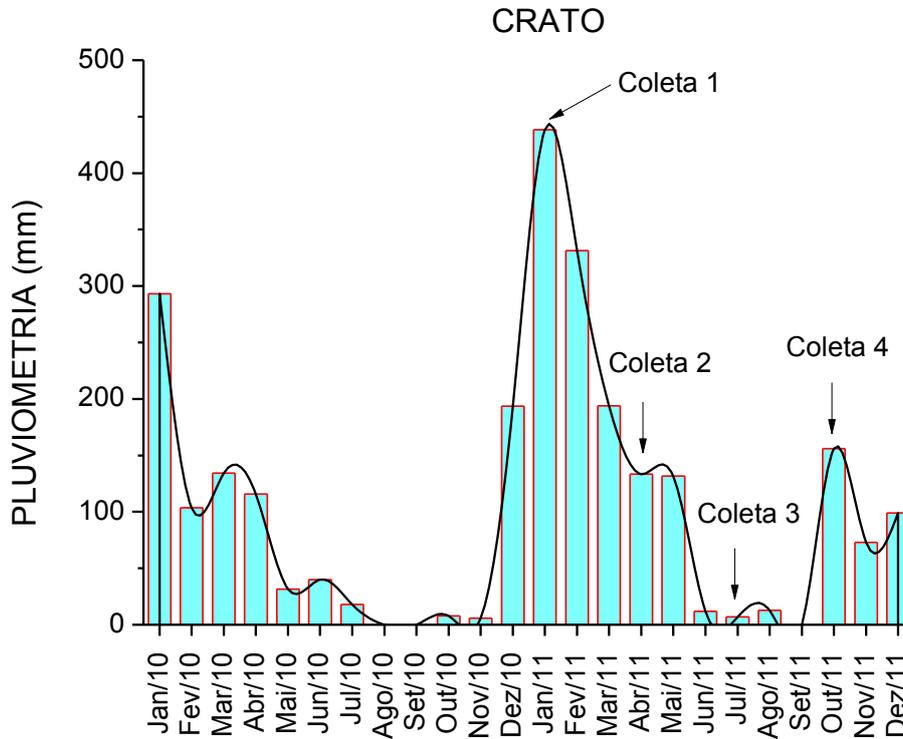
**Tabela 2.2** – Pluviometria nos municípios de Mauriti e Missão Velha em 2010 e 2011

Mês	Pluviometria (mm)			
	Mauriti		Missão Velha	
	2010	2011	2010	2011
Janeiro	236.6	340.4	113.7	310.7
Fevereiro	22.3	266.2	55.7	253.1
Março	57.9	103.3	181.0	181.0
Abril	193.2	93.8	230.9	88.8
Maio	0.0	119.4	8.4	110.0
Junho	29.2	0.0	11.5	0.0
Julho	4.0	52.0	3.4	0.0
Agosto	0.0	36.8	0.0	9.4
Setembro	0.0	0.0	0.0	0.0
Outubro	73.5	121.0	76.5	129.0
Novembro	0.0	46.0	2.4	108.0
Dezembro	121.8	17.3	116.2	19.0
Total	738.5	1196.4	799,2	1208,4

(Fonte: FUNCEME, 2012).

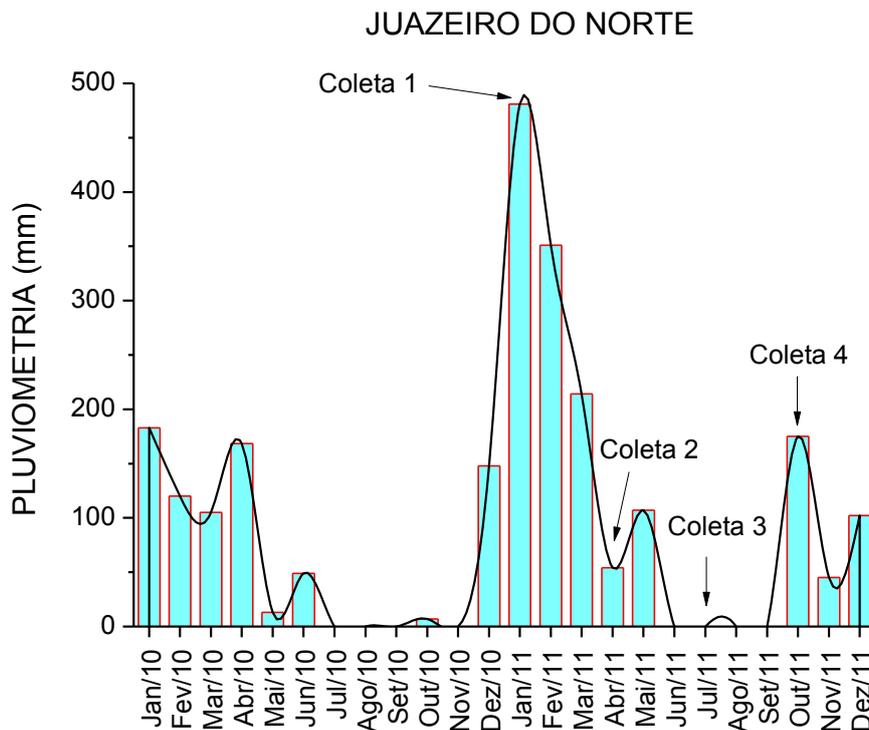
As Figuras 2.2 a 2.5 mostram, através de histogramas, a distribuição temporal das precipitações nos quatro municípios estudadas onde estão instaladas estações pluviométricas indicando as quatro coletas que foram realizadas nos meses de janeiro, abril, julho e outubro. Nos quatros postos, as maiores precipitações ocorrem nos meses de dezembro a abril, identificando o período chuvoso, quando há recarga de água subterrânea. Os outros meses do ano são marcados pela ausência de chuvas, que identifica o período seco; o ano de 2011 foi o de mais alta pluviosidade.

**Figura 2.2** – Histograma de pluviometria no município de Crato, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011



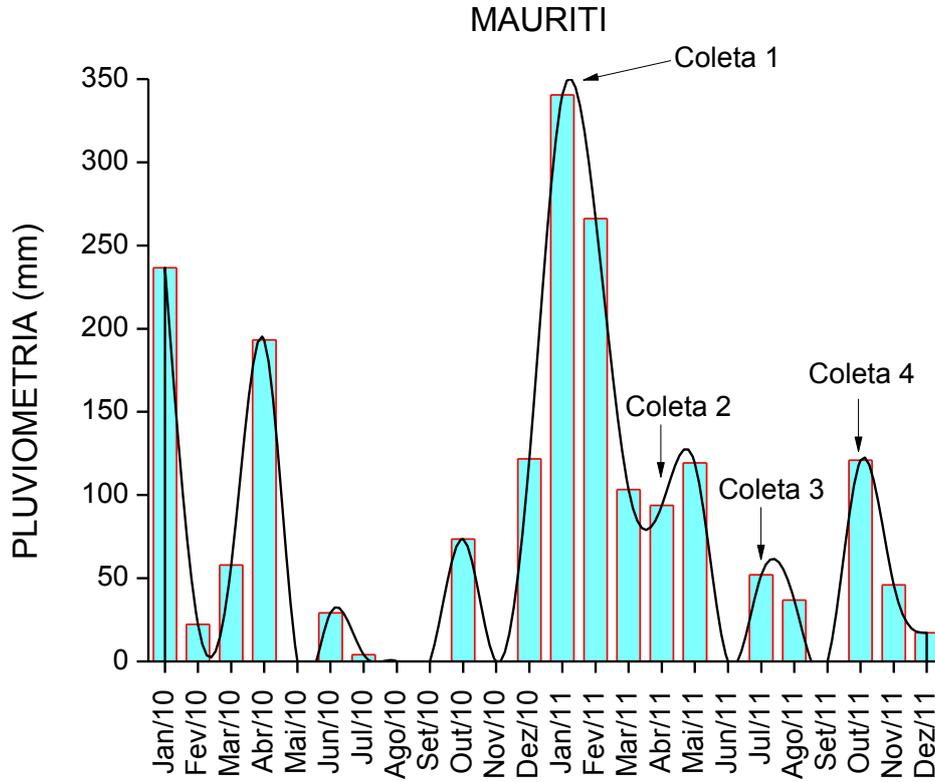
(Fonte: FUNCEME, 2012).

**Figura 2.3** – Histograma de pluviometria no município de Juazeiro do Norte, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011



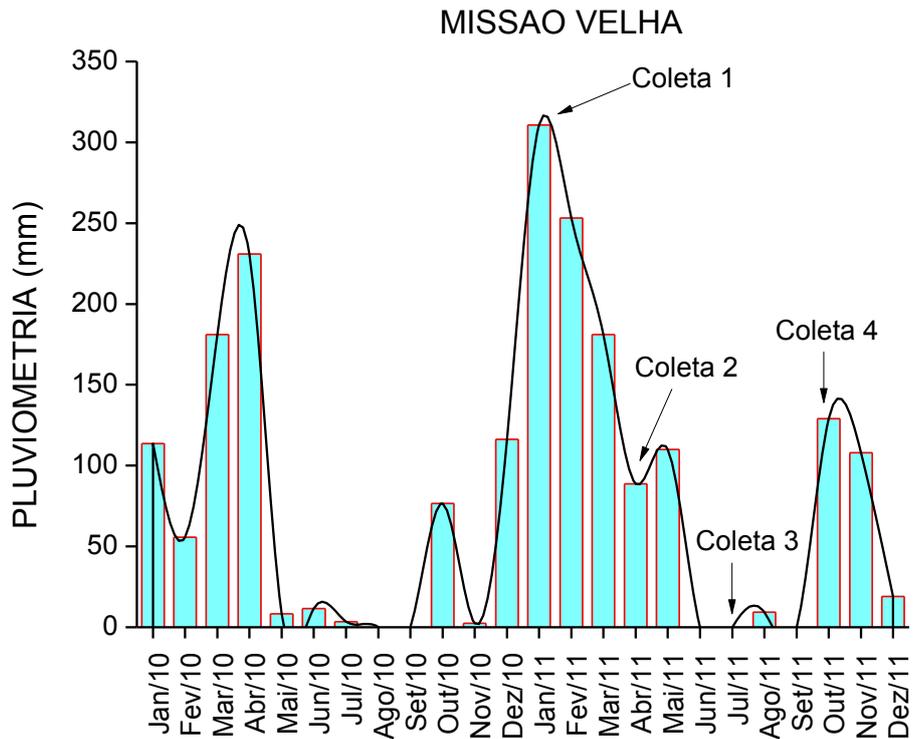
(Fonte: FUNCEME, 2012)

**Figura 2.4** – Histograma de pluviometria no município de Mauriti, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011



(Fonte: FUNCEME, 2012).

**Figura 2.5** – Histograma de pluviometria no município de Missão Velha, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011



(Fonte: FUNCEME, 2012).

No ano das coletas das amostras (2011), as chuvas registradas nas cidades de Crato, Juazeiro do Norte, Mauriti e Missão Velha foram bastante intensas quando comparadas ao ano de 2010 assim como a anos anteriores.

## 2.2 Geologia

Dois domínios geológicos constituem basicamente o Nordeste brasileiro: o embasamento cristalino e as bacias sedimentares. O embasamento cristalino é composto por blocos de rochas antigas, resistentes e estáveis constituídas de ígneas e metamórficas que apresentam solos rasos com baixa capacidade de infiltração e reduzida drenagem natural.

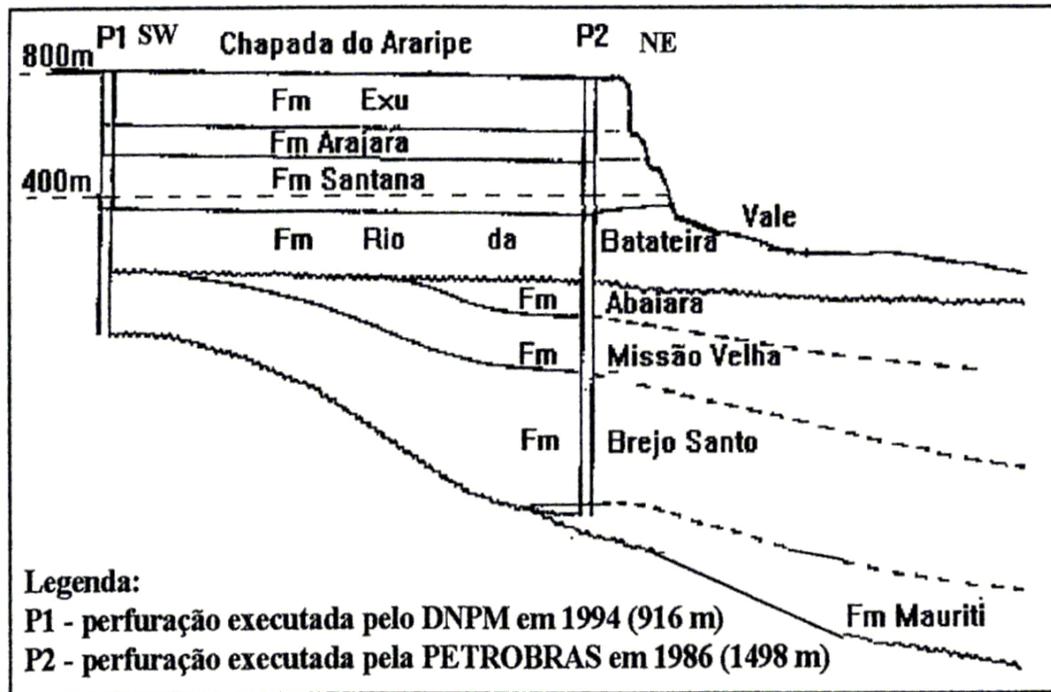
Nas bacias sedimentares, normalmente os solos são profundos, apresentam baixo escoamento superficial, boa drenagem natural e alta capacidade de infiltração. Estas características possibilitam a existência de aquíferos, que são rochas com grande porosidade, garantindo grande suprimento de água de boa qualidade que é mais protegido da evaporação por causa de sua profundidade.

Em decorrência de diferentes propriedades destas duas estruturas, tais como porosidade e permeabilidade, podem armazenar água formando aquíferos ou quando a permeabilidade é baixa, impossibilitando que a água flua no meio funcionando como aquíclode.

A Bacia Sedimentar do Araripe, devido à eventos tectônicos, é dividida em blocos de horstes (zonas elevadas) e grábens (zonas deprimidas). Por isso, nessa região destacam-se dois tipos predominantes de relevo: o Planalto Sedimentar também conhecido como Chapada do Araripe e a Depressão Sertaneja ou Vale do Cariri, que circunda a chapada com desníveis que chegam a 400 m e apresenta diversificação litológica caracterizada por sequências alternadas de arenitos, siltitos, calcários, argilitos e folhelhos, de acordo com o estudo realizado pelo DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, 1996.

Segundo Mont'alverne *et al.* (1986), a Bacia Sedimentar do Araripe pode ser dividida, pelas suas formações geológicas, em: Sistema Aquífero Superior, onde encontram-se as Formações Exu e Arajara, que representa o topo da Bacia; Aquíclode de Santana; Sistema Aquífero Médio identificado pelas Formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha; Aquíclode Brejo Santo; e Sistema Aquífero Inferior, onde encontram-se a Formação Mauriti (que não pertence à Bacia Sedimentar do Araripe) e parte da Formação Brejo Santo, que representa a base da Bacia delimitada pelo cristalino (Figura 2.6).

**Figura 2.6** – Representação esquemática da coluna estratigráfica da Bacia Sedimentar do Araripe segundo Ponti e Appi (1990)



A Formação Missão Velha aflora no Vale cobrindo uma área de 2.830 km<sup>2</sup> e é constituída essencialmente de arenitos com textura grossa e mal selecionados. O aquífero Missão Velha é o principal responsável pelo abastecimento das cidades, Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha e Missão Velha; na Chapada do Araripe aflora o aquífero Exu.

### 2.3 Hidrografia

A hidrografia da Bacia Sedimentar é caracterizada pela ausência de rede de drenagem na parte superior da Chapada do Araripe, por fontes pontuais ou difusas nas vertentes da chapada até as planícies e pela zona de aluviões depois das vertentes, onde são depositadas as cargas das torrentes (Mont'alverne, 1996).

A drenagem superficial no Vale do Cariri está inserida na sub-bacia do rio Salgado, com área de 12.216 km<sup>2</sup>, pertencente à bacia hidrográfica do Jaguaribe, formada: pelos rios Bastiões, Cariús e Salgado, que atravessam todo o Cariri; Batateiras, Granjeiro, Salgadinho e Carás, na região entre Crato e Juazeiro do Norte; Salamanca e Santana em Barbalha, Seco em Missão Velha e o riacho dos Porcos que drena os municípios de Milagres, Mauriti, Brejo Santo, Porteiras, Jardim e Jati

## 2.4 Solos

O Iplance (1997) definiu cinco tipos de solos na Bacia Sedimentar do Araripe:

- (i) Latossolo Vermelho-Amarelo Álico desenvolvido sobre arenitos da Formação Exu ocupando toda a área do topo da Chapada do Araripe;
- (ii) Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico com material de origem nos sedimentos da Formação Brejo Santo;
- (iii) Litólicos Eutróficos desenvolvidos sobre a Formação Santana (Encosta da Chapada);
- (iv) Aluviais Eutróficos formados a partir da deposição de sedimentos fluviais não consolidados, distribuídos ao longo das planícies dos principais rios da área;
- (v) Litólicos Eutróficos desenvolvidos sobre a Formação Santana (encosta da Chapada) com declividade elevada > (25%).

## 2.5 Geomorfologia

A descrição feita Mont'Alverne (1996) divide a Bacia do Araripe em Zonas, a partir da litologia, relevo, clima, hidrografia e vegetação que cada uma apresenta, em três domínios geomorfológicos distintos: a Zona de Chapada, a Zona de Talude e a Zona de Pediplano.

Zona de Chapada ou Chapada do Araripe com elevações em torno de 900 metros tem relevo, tipicamente tabular, é sustentada pelos arenitos da Formação Exu e é a porção topográfica mais elevada da região. É limitada em quase toda sua extensão por escarpas abruptas, de contornos irregulares que chegam a ultrapassar 300 metros e expõem rochas da Formação Santana.

A Zona de Talude inclui a zona de encosta e pé-de-serra, onde afloram as unidades litológicas das formações Arajara e Santana. No contato entre as Formações Exu e Arajara existem exutórios naturais de água (fontes). A disposição das camadas orientadas para leste favorece a ocorrência de surgências, sobretudo nas encostas do Estado do Ceará, responsáveis pela perenidade dos rios na Depressão Sertaneja.

A Zona de Pediplano ou Depressão Sertaneja tem relevos suaves e pouco dissecados, caracterizada por morros alongados entremeados por vales amplos de fundo plano, com cotas médias de aproximadamente 400 metros. Neste domínio geomorfológico,

ocorrem exposições de rochas das demais Formações da Bacia do Araripe: Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti. A vegetação nativa, onde preservada, é tipicamente de caatinga.

As surgências (fontes) de águas subterrâneas na base da Formação Exu são em grande parte responsáveis pela rede de drenagens que atravessa a Depressão Sertaneja.

### 3. HIDROLOGIA ISOTÓPICA

Hidrologia Isotópica é o estudo das águas subterrâneas e superficiais, utilizando técnicas que permitem identificar suas características por meio de isótopos naturais ou de traçadores. Discute-se, a seguir, os isótopos naturais do hidrogênio e do oxigênio.

A molécula de água é formada com isótopos do hidrogênio e do oxigênio; as formas isotópicas do hidrogênio são:  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$ ; o  $^1\text{H}$  é geralmente representado por H, o  $^2\text{H}$ , conhecido como deutério, é representado por D, e o  $^3\text{H}$ , também conhecido por trítio, pode ser representado pela letra T. Os isótopos do hidrogênio encontrados nas moléculas de águas jovens apresentam aproximadamente, as seguintes proporções:

**$^1\text{H}$ : 99,985**

**$^2\text{H}$ : 0,015**

**$^3\text{H}$ :  $10^{-16}$**

O trítio é o isótopo radiativo do hidrogênio; devido à sua meia-vida de 12,43 anos, ele desaparece em águas velhas.

O oxigênio apresenta três formas isotópicas:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ , todos os três isótopos são estáveis, encontrados aproximadamente nas seguintes proporções:

**$^{16}\text{O}$ : 99,759**

**$^{17}\text{O}$ : 0,037**

**$^{18}\text{O}$ : 0,204**

A molécula de água é constituída principalmente pelos átomos de H, D,  $^{16}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ , mas além destes átomos podem existir outros, como o  $^{17}\text{O}$ .

As formas isotópicas mais abundantes das moléculas de água encontradas na natureza são, portanto,  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  e  $\text{HD}^{16}\text{O}$ , apresentando ocorrências médias (DANSGAARD, 1964) dadas por: 997.680, 2.000 e 158 (em partes por milhão), respectivamente.

Os isótopos pesados presentes na água estão sujeitos a processos que produzem variações em suas concentrações. As mudanças de fase, evaporação e condensação, são os principais processos responsáveis pelo fracionamento isotópico da água, mas também a atividade biológica e as trocas com outros materiais podem produzir fracionamento.

As moléculas de água ao sofrerem o processo de evaporação têm suas moléculas leves ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) evaporadas mais rapidamente, tornando a água remanescente mais concentrada em isótopos pesados. À medida que a evaporação evolui, a concentração em isótopos pesados

aumenta e o volume de água perdido devido à evaporação pode ser determinado através dos isótopos pesados na água remanescente.

Na condensação, o vapor residual fica empobrecido em isótopos pesados em relação ao líquido condensado; por isso, as águas das chuvas apresentam composições isotópicas diversas. As variações nas concentrações isotópicas das águas das chuvas são causadas por: a) distância à costa (Efeito Continental); b) quantidade de chuva (Efeito de Quantidade); c) elevação do local da chuva (Efeito de Altitude), d) aumento da latitude (Efeito da Latitude) e pela variação da temperatura.

Como as concentrações das águas pesadas ( $\text{HD}^{16}\text{O}$  e  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ) dependem da origem e da história da água, elas são utilizadas como traçadores naturais do ciclo hidrológico.

### 3.1 Padrão

O SMOW – Standard Mean Ocean Water – é um padrão internacional de água do oceano utilizado desde 1961 (CRAIG, 1961b), para as medidas dos isótopos ambientais, oxigênio e hidrogênio. Como os oceanos são os maiores reservatórios de água, praticamente o valor médio da composição mundial é representado pela sua composição isotópica, que é aproximadamente independente do lugar, da profundidade e do tempo.

Atualmente, o SMOW é composto de uma mistura de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  e  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , preparada nos laboratórios do “Bureau of Standards” dos Estados Unidos, independente de uma amostra natural, visto que na natureza sempre há a possibilidade de mudanças imprevistas.

### 3.2 Delta por mil

As medidas dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério são expressas em  $\delta\%$  que é dado pela expressão:

$$\delta(\text{‰}) = \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right) 10^3 \quad (1)$$

Onde, R e  $R_0$  são as razões isotópicas das amostras e do padrão, respectivamente.

$$R_{\text{Hidrogênio}} = R \left[ \frac{D}{H+D} \right] \quad (2)$$

$$R_{\text{Oxigênio}} = R\left[\frac{O^{18}}{O^{18}+O^{17}+O^{16}}\right] \quad (3)$$

Portanto,  $\delta$  mede o valor do enriquecimento ( $\delta > 0$ ) ou do empobrecimento ( $\delta < 0$ ) do isótopo pesado na amostra, em relação ao padrão.

### 3.3 Reta Meteórica

Estudos de massas de águas utilizando as medidas de oxigênio-18 e deutério são realizados desde a década de 1960, com o trabalho de Craig (1961a), que determinou uma relação matemática entre as concentrações isotópicas de oxigênio-18 e deutério ao analisar águas das chuvas e águas superficiais, de aproximadamente 400 amostras, que não sofreram evaporação; a relação matemática obtida é:

$$\delta D(\text{‰}) = 8\delta^{18}O(\text{‰}) + 10 \quad (4)$$

Esta equação recebeu a denominação de Reta Meteórica Mundial. Em 1993, Rozanki obteve uma reta meteórica mais precisa expressa em relação ao VSMOW da IAEA – Agência Internacional de Energia Atômica – por:

$$\delta D(\text{‰}) = 8,17(\pm 0,07)\delta^{18}O(\text{‰}) + 11,27(\pm 0,65)(\text{‰}) \quad (5)$$

### 3.4 Constantes de Fracionamento

A evaporação, a condensação, a difusão e a cristalização são processos de separação isotópica. Para estudar estes processos são definidas constantes de separação e enriquecimento isotópicos.

#### *(i) Constante de Separação Isotópica*

Em um sistema que se encontra no estado 1 e evolui para o estado 2 mediante algum processo de separação isotópica, como a evaporação, o coeficiente de separação

isotópica ( $\alpha$ ) é definido como a relação entre as razões isotópicas dos estados 1 e 2. Matematicamente, é expresso por:

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

Onde,

$R_1$ : razão isotópica do estado 1

$R_2$ : razão isotópica do estado 2

Quando a evaporação ocorre a uma temperatura de 20°C, os coeficientes de separação isotópica para o deutério e para o oxigênio-18 são, respectivamente:

$$\alpha_D = 1,079 \text{ (MERLIVAT, 1963)} \quad \alpha_{18} = 1,0092 \text{ (DANSGAARD, 1961)}$$

Estudo do fracionamento líquido-vapor dos isótopos  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  e D/H em função da temperatura foi feito por Jauzel (1986).

O coeficiente de fracionamento isotópico é uma função da temperatura (HORITA & WESOLOSKI, 1994), de acordo com a equação:

$$\ln \alpha = AT^{-2} + BT^{-1} + C \quad (7)$$

Onde,

T é a temperatura absoluta, Kelvin;

A, B e C são constantes ajustadas de acordo com os dados experimentais.

Quando a evaporação não ocorre em atmosfera totalmente seca, o fator de fracionamento,  $\alpha'$ , é dado pela expressão seguinte:

$$\alpha' = \alpha \left( \frac{D}{D'} \right)^n \quad (8)$$

Onde,

$\alpha$  é o fator de fracionamento isotópico no equilíbrio;

D é o coeficiente de difusão da molécula leve ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ );

D' é o coeficiente de difusão da molécula pesada ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$  e  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ).

O valor da razão  $\frac{D}{D'}$  pode ser determinado através da equação (MERLIVAT,

1970):

$$\frac{D}{D'} = \left( \frac{M'(M+28,8)}{M(M'+28,8)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Onde,

M e M' são as massas moleculares da água, leve e pesada, respectivamente; 28,8 é a massa molecular média do ar (79%  $\text{N}_2$  e 21%  $\text{O}_2$ , ou seja,  $0,79 \times 28 + 0,21 \times 32 = 28,8$ ).

### *(ii) Constante de Enriquecimento Isotópico*

O coeficiente de enriquecimento isotópico é definido pela seguinte equação:

$$\epsilon = \frac{R_1}{R_2} - 1 \quad (10)$$

Portanto, a constante de enriquecimento isotópico  $\epsilon$  é semelhante ao  $\delta$  considerando o estado 2 como padrão.

## **3.5 Fracionamento Isotópico por Condensação**

O fenômeno observado por Craig (1961a), que relaciona a concentração isotópica do oxigênio-18 com a concentração isotópica do deutério, é explicado através da condensação de Rayleigh, que obedece à seguinte equação:

$$\delta (\text{‰}) = (f^{\alpha-1} - 1)10^3 \quad (11)$$

Onde,

$\alpha$  é o coeficiente de separação ou fracionamento isotópico;

$f$  é a fração do volume de água remanescente.

Portanto,

$$\delta D(\text{‰}) = (f^{\alpha_D} - 1)10^3 \quad (12)$$

$$\delta^{18}O(\text{‰}) = (f^{\alpha_{18}} - 1)10^3 \quad (13)$$

Logo,

$$\frac{\delta D}{\delta O^{18}} = \frac{f^{\alpha_D} - 1}{f^{\alpha_{18}} - 1} \quad (14)$$

A chuva é um fenômeno complicado, estando sujeito aos efeitos de temperatura, do vento, etc, que interferem no valor de  $\alpha$ , mas o processo de condensação explica o coeficiente angular da reta meteórica é dado em função de  $\alpha_D$  e  $\alpha_{18}$  por:

$$\frac{\delta D}{\delta O^{18}} = 8 \quad (15)$$

O outro termo da reta, a interseção, é denominado de excesso de deutério.

### 3.6 Espectrômetro de Massa

As medidas das concentrações isotópicas de oxigênio-18 e deutério são obtidas com Espectrômetro de Massa, que mede massas de moléculas individuais carregadas.

### 3.6.1 Princípio de Funcionamento

O princípio básico de funcionamento do Espectrômetro de Massa é de uma partícula carregada eletricamente em movimento sujeito a um campo magnético. Seja,

q: a carga elétrica

m: massa

v: velocidade

V: potencial elétrico

A energia cinética adquirida pela amostra ionizada na fonte de íons do Espectrômetro de Massa é:

$$\frac{mv^2}{2} = eV \quad (16)$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (17)$$

Quando uma carga elétrica em movimento se desloca em um campo magnético homogêneo  $\vec{B}$  fica sujeita a uma força magnética  $\vec{F}$  dada por:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (18)$$

No Espectrômetro de Massa, o vetor velocidade  $\vec{v}$  e o vetor campo magnético  $\vec{B}$  são perpendiculares, logo:

$$|\vec{F}| = q|\vec{v}||\vec{B}| \quad (19)$$

A força centrípeta é igual a força magnética:

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \quad (20)$$

Se a partícula adquiriu velocidade  $v$  através de uma diferença de potencial  $V$  sua energia cinética é dada pela equação (16) e o raio da trajetória  $R$  é expresso por:

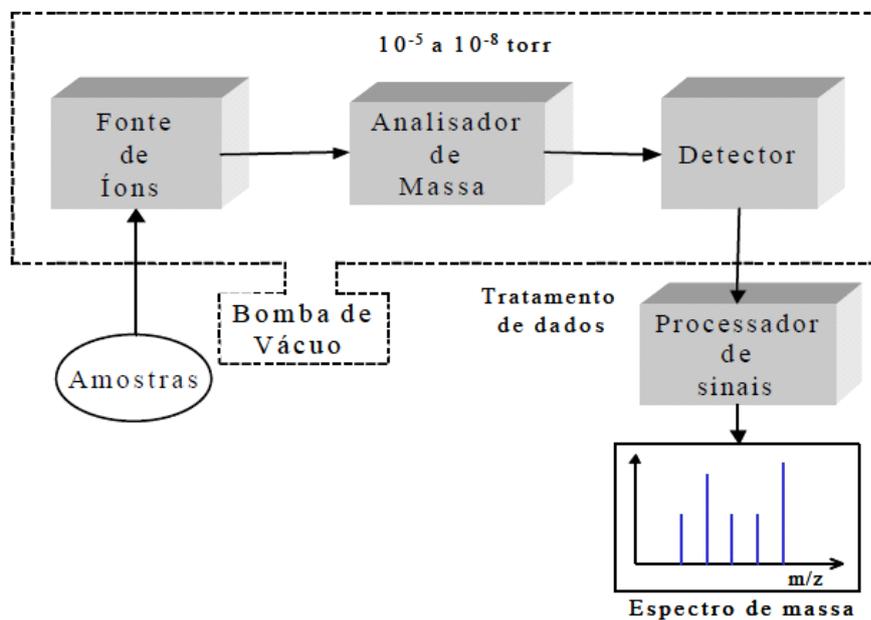
$$R = \frac{\sqrt{2mqV}}{qB} \quad (21)$$

Portanto,  $R$  é proporcional à raiz quadrada da massa.

### 3.6.2 Componentes de um Espectrômetro de Massa

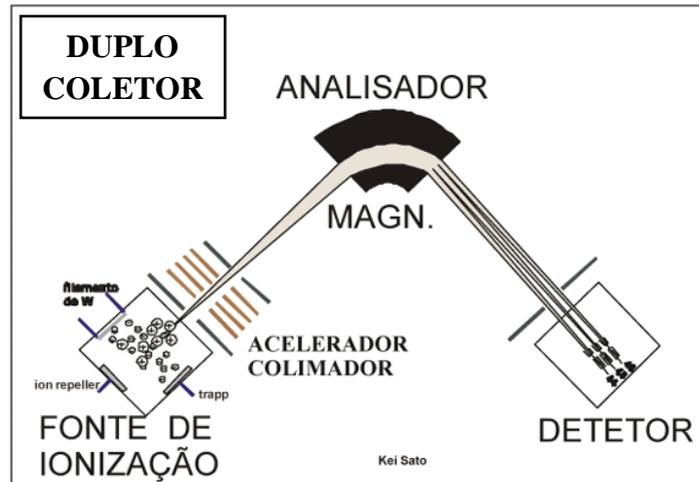
Os Espectrômetros que fazem medidas de massas leves apresentam componentes variáveis de acordo com os fabricantes, mas todos têm os seguintes componentes: fonte de íons, analisador magnéticos, e coletores. (Figuras 3.1 e 3.2).

**Figura 3.1** – Componentes de Espectrômetro de Massa



(Fonte: [http://www2.dbd.pucRio.br/pergamum/tesesabertas/0124802\\_03\\_cap\\_02.pdf](http://www2.dbd.pucRio.br/pergamum/tesesabertas/0124802_03_cap_02.pdf)).

**Figura 3.2** – Detalhes do Sistema Fonte de Íons, Analisador de Massa e Detector



(Fonte:

[http://www.google.com.br/imgres?q=componentes+espectrometro+de+massa&um=1&hl=pt-R&biw=1366&bih=624&tbn=isch&tbnid=N5324QCPYR6h7M:&imgrefurl=http://www.revistasusp.sibi.usp.br/scielo.php%3Fpid%3DS1519-874X2002000100007%26script\).](http://www.google.com.br/imgres?q=componentes+espectrometro+de+massa&um=1&hl=pt-R&biw=1366&bih=624&tbn=isch&tbnid=N5324QCPYR6h7M:&imgrefurl=http://www.revistasusp.sibi.usp.br/scielo.php%3Fpid%3DS1519-874X2002000100007%26script).)

### *(i) Fonte de Íons*

A Fonte de Íons de um Espectrômetro é um dispositivo constituído de um filamento de tungstênio ou de rênio que emite um feixe de elétrons que são acelerados em uma caixa de ionização. As moléculas do gás são ionizadas pelo impacto dos elétrons na câmara de ionização gerando energia da ordem de 6 a 105 eV e os íons formados são acelerados e colimados pelas placas focalizadoras.

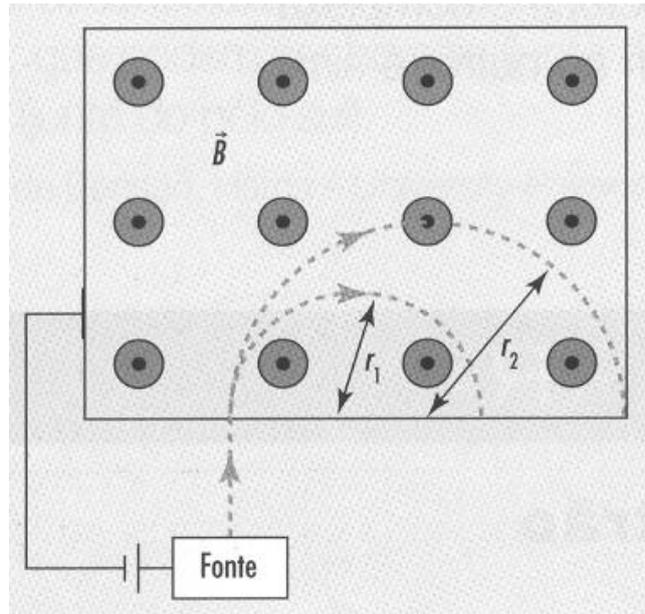
### *(ii) Campo Magnético*

Em alguns Espectrômetros de Massa o campo magnético é uniforme e perpendicular à direção do feixe de íons, localizando-se na saída da última fenda. No campo magnético, os íons seguem uma trajetória circular e o raio desse círculo é função da razão  $m/q$ , do potencial e do campo magnético  $B$  que é constante e é produzido por um ímã permanente.

### (iii) Analisador de Massa

O analisador é a região do Espectrômetro de Massa onde há um campo magnético para separação da amostra em diferentes raios de trajetórias correspondentes à diferentes massas.

**Figura 3.3** – Analisador de Massas



(Fonte: <http://www.google.com.br/imgres?q=espectrometria+de+massa&um=1&hl=pt-BR&sa=N&biw=1366&bih=667&tbm=isch&tbnid=wBDmwQtwiDukmM:&imgrefurl=http://profs.ccem.s.pt/PauloPortugal/PHYSICA/e/em.htm&docid=5uQ5UMf2AFAZEM&imgurl=http://profs.ccem>).

### (iv) Coletor de Íons

O Coletor de Íons do Espectrômetro de Massa recebe os íons que são focalizados para atingirem as fendas do coletor, os íons são focalizados pela variação do potencial elétrico  $V$ , que os aceleram e a geometria é ajustada afim de que os íons com massas diferentes atinjam fendas diferente.

*(v) Sistema de Admissão*

A admissão da amostra para medir as concentrações de oxigênio-18 e deutério em um Espectrômetro de Massa é feito com um sistema duplo que permite fazer análises simultâneas da amostra e do padrão. Os volumes dos reservatórios para as amostras na fase gasosa são de tamanho variados permitindo um controle preciso do fluxo na região da fonte de íons. O fluxo deve ser viscoso para diminuir o fracionamento isotópico durante o escoamento do gás, do reservatório para a fonte de íons. Ele é produzido em um tubo capilar cujo diâmetro interno é muito maior do que o livre caminho médio das partículas que compõem o gás.

## 4. METODOLOGIA

As amostras de água subterrânea foram coletas na Bacia Sedimentar do Araripe nos locais indicados na Figura 4.1 e nas Tabelas 4.1 e 4.2 (COGERH, 2012). As coordenadas são expressas em UTM/N que é a distância em metros em relação ao Equador ( $10^6$  m) e UTM/E é a distância em metros em relação ao Meridiano Central da Terra ( $5 \times 10^5$  m). As coletas foram realizadas nos meses de janeiro, abril, julho e outubro de 2011 e foram analisadas em cada uma delas os isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério e a condutividade elétrica.

### 4.1 Parâmetros Analisados

#### 4.1.1 Oxigênio-18 e Deutério

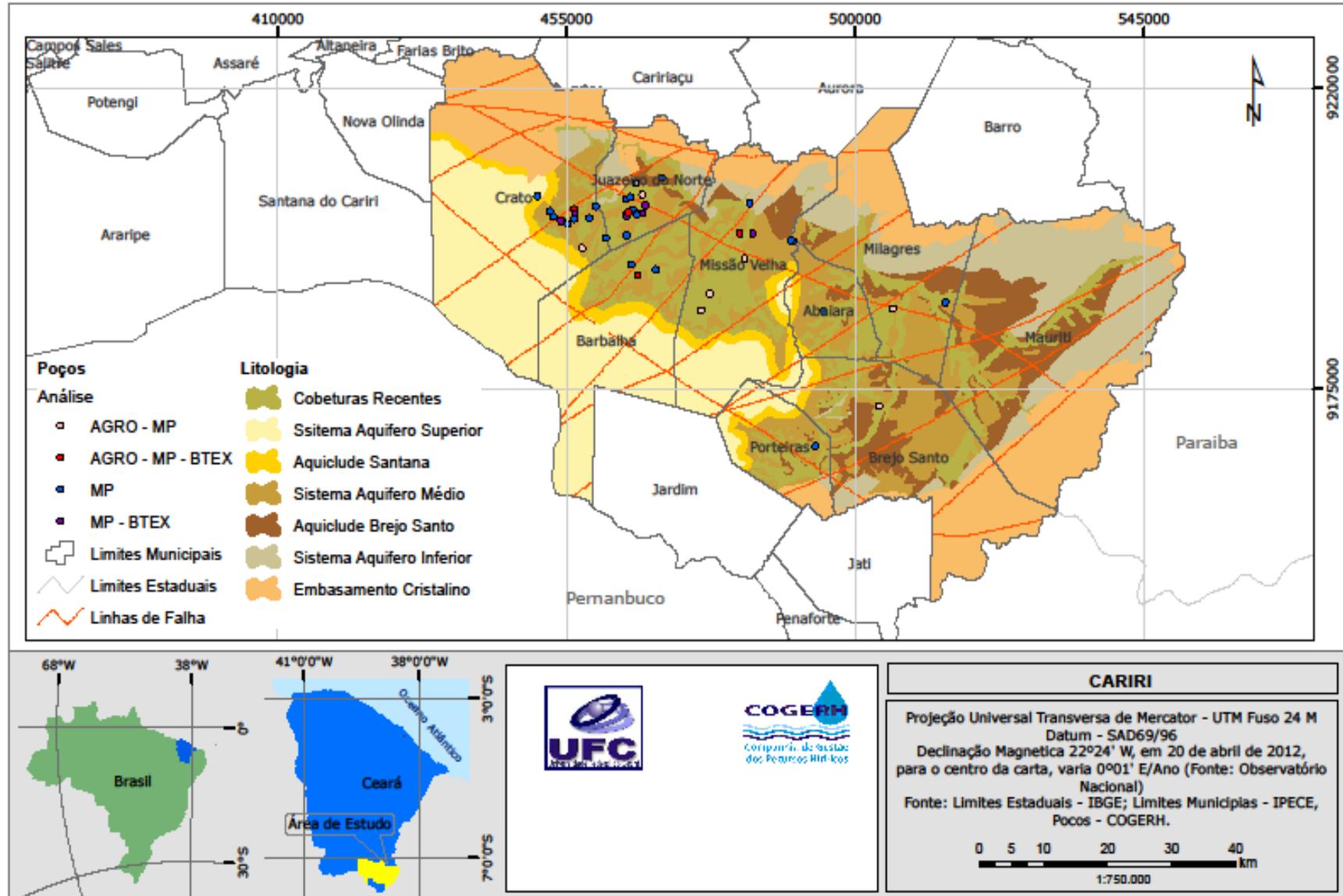
Oxigênio-18 e deutério foram medidos no Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura – em Piracicaba/São Paulo. O erro das medidas é de  $\pm 1\text{‰}$  para o deutério e de  $\pm 0,1\text{‰}$  para o oxigênio-18. Os resultados são dados em termos de  $\delta\text{‰}$ , definido (equação 1)

O valor de  $\delta$  mede, portanto, o enriquecimento (ou empobrecimento, quando  $< 0$ ) no isótopo pesado na amostra em relação ao padrão. Devido à grande predominância do isótopo mais leve ( $^1\text{H}$  ou  $^{16}\text{O}$ ), o  $\delta$  comporta-se como uma concentração da mistura de águas de valores de  $\delta$  diferentes (i.e. segue uma reta de mistura) (Craig, 1961a).

As águas de chuva são a fonte principal de recarga dos aquíferos que recebe contribuição também da umidade da zona não saturada do solo, durante a infiltração da água. Allison (1982) estudou este processo medindo  $^{18}\text{O}$  e D em uma coluna de areia sujeita à evaporação.

Durante o processo de recarga com evaporação a relação  $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$  produz uma reta paralela à RML – Reta Meteorica Local – que Allison et al. (1984) identificou como mistura da umidade do solo com a água da chuva infiltrando. Se as condições de recarga permanecem relativamente uniformes no tempo, as águas subterrâneas seguem uma linha paralela à RML (Clark & Fritz, 1997).

Figura 4.1 – Localização dos pontos amostrados (Fonte: COGERH, 2012)



**Tabela 4.1** – Pontos amostrados nos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres na Bacia Sedimentar do Araripe. (NE: Nível Estático e ND: Nível Dinâmico)

COG	Proprietário/Local	Coordenadas		Prof. (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
		UTM/E	UTM/N				
<b>Abaiara</b>							
ABA0002	Sítio Capoeira	495145	9186612	70,0	12,5	15,8	4,2
ABA0003	Olho d'água Cumprido	490374	9197088	-	14,6	-	-
<b>Barbalha</b>							
BAR0002	JB – Jeans do Brasil	465175	9193548	88,0	26,9	29,9	65,0
BAR0008	CAGECE P1- Tupinambá	466123	9191997	134,0	5,0	22,5	150,0
BAR0011	CAGECE P6 - Malvina	468988	9192836	100,0	42,0	76,0	60,0
<b>Brejo Santo</b>							
BJS0001	Pau d'Arco	503763	9172385	60,0	24,7	34,1	16,0
COG	Proprietário/Local	Coordenadas		Prof. (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
		UTM/E	UTM/N				
<b>Crato</b>							
CRT0001	Engenho Brigadeiro	456231	9201837	-	6,3	8,1	15,2
CRT0002	(SAAEC) Santa Rosa	461212	9197545	107,5	43,0	51,4	11,3
CRT0003	WOOJIN	458560	9200515	150,0	51,1	53,0	12,0
CRT0004	DER	454458	9199989	-	20,1	21,3	5,1
CRT0005	(SISAR) Sítio Alto	459613	9202250	-	5,4	22,6	6,7
CRT0006	SESI	456359	9201195	-	18,1	22,5	5,3
CRT0008	SAAEC. Bairro Batateiras	452429	9201565	118,0	24,8	41,8	126,0
CRT0009	Escola da Agricultura	450460	9203820	134,0	62,0	63,0	6,0
CRT0010	SAAEC.São Raimundo	452995	9200773	130,0	12,5	28,0	250,0
CRT/0013	Baixio das Palmeiras	457476	9196033	111,0	40,7	79,0	2,0
CRT0014	SAAEC. Cafundó	455188	9199608	109,0	11,3	46,2	203,1
CRT0017	Hospital São Francisco	454168	9200085	80,0	23,0	30,0	6,5
CRT0018	SAAEC. Mirandão	456272	9200409	82,0	10,6	22,0	19,2
<b>Milagres</b>							
MIL0001	Carnaúba dos Lacerdas	514056	9187918	60,0	5,6	23,0	6,0
MIL0002	Projeto EBENEZER	505922	9186996	-	-	-	-

**Tabela 4.2** – Pontos amostrados nos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras na Bacia Sedimentar do Araripe. (NE: Nível Estático e ND: Nível Dinâmico)

COG	Proprietário/Local	Coordenadas		Prof. (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
		UTM/E	UTM/N				
<b>Juazeiro do Norte</b>							
JUN001	(SISAR) Vila Sto. Antônio	469922	9206529	110,0	17,7	20,1	5,3
JUN002	Faz. Boca das Cobras	465821	9205713	80,0	10,2	21,0	25,5
JUN003	Rodoviária Padre Cícero	464453	9201152	110,0	60,4	67,9	2,1
JUN009	Cemitério Parq. Flor	467287	9202396	65,0	27,6	37,2	8,0
JUN0011	Curtume. S. Agostinho	464343	9203351	16,0	15,0	-	1,1
JUN0015	CAGECE - P13, L. Seca13	464366	9197932	101,0	12,3	23,3	59,4
JUN0018	Mercado Central	464998	9203678	84,0	12,9	17,7	10,3
JUN0021	Verdureiro. Malvas	466875	9204032	8,0	0,7	-	-
JUN0022	Mercado Pirajá. Bairro	465455	9201742	-	-	-	-
JUN0024	SENAI	464386	9200875	108,0	58,0	62,0	16,0
JUN0025	SESI	464652	9201339	70,0	29,0	34,5	7,9
JUN0028	CAGECE -2a, Tiradentes	466045	9201107	150,0	6,7	27,3	120,0
JUN0029	CAGECE - P3, Tiradentes	466816	9201270	140,0	2,5	21,1	120,0
<b>Missão Velha</b>							
MIV0001	Chiqueiro das Cabras	477381	9189222	100,0	12,9	19,0	13,0
MIV0002	(SISAR) Sítio Logradouro	482790	9194422	70,0	12,2	13,7	5,1
MIV0003	Sítio Cachoeira	483565	9202774	160,0	8,5	18,0	13,2
MIV0004	Sítio Barreiras	476020	9186739	-	28,0	36,8	27,5
MIV0005	Olho d'água Cumprido	490024	9197206	76,0	1,8	13,8	52,0
MIV0007	CAGECE, P1	484086	9198222	90,0	9,2	-	-
MIV0013	Projeto FRUTCU	482019	9198234	180,0	-	-	45,0
<b>Porteiras</b>							
POT0001	Sítio Abreu	493809	9166424	84,0	21,5	26,7	15,2

### ***4.1.2 Coleta das Amostras***

Para as análises de oxigênio-18 e deutério com Espectrômetro de Massa, foram coletadas 30 mL de água; como são amostras de água subterrânea as coletas foram feitas diretamente do poço e a seguir, armazenadas em garrafas que impedem a evaporação.

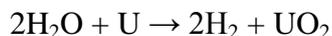
### ***4.1.3 Preparação das Amostras***

A água colocada diretamente no Espectrômetro de Massa torna-se estável e de difícil remoção causando o efeito de memória e o oxigênio diretamente no Espectrômetro de Massa ataca as superfícies metálicas do equipamento formando óxidos. Por isso, as análises de oxigênio-18 são feitas com amostra de CO<sub>2</sub>, e as análises de deutério com H<sub>2</sub> preparados pelos métodos discutidos a seguir.

Para as análises de D/H, o H<sub>2</sub> é retirado da amostra através de uma reação com o urânio metálico e para análise de <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, o CO<sub>2</sub> é obtido por processo de troca isotópica entre a água e uma amostra padrão de CO<sub>2</sub>.

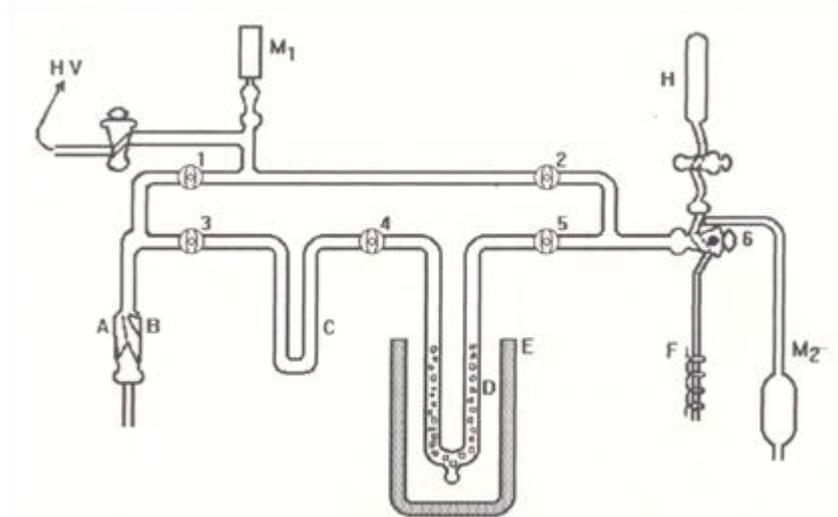
#### ***(i) Análise de D/H***

A amostra é colocada em um capilar (A na Figura 4.2) e o vapor d'água, ao passar pelo urânio metálico (D na Figura 4.2) que se encontra a temperatura superior a 600 °C, reage formando óxido de urânio liberando H<sub>2</sub>, conforme a reação:



O gás H<sub>2</sub> (hidrogênio) é levado ao Espectrômetro de Massa para a análise da razão D/H.

**Figura 4.2** – Relação D/H em Amostras de água do Sistema de Aquíferos na Bacia Sedimentar do Araripe

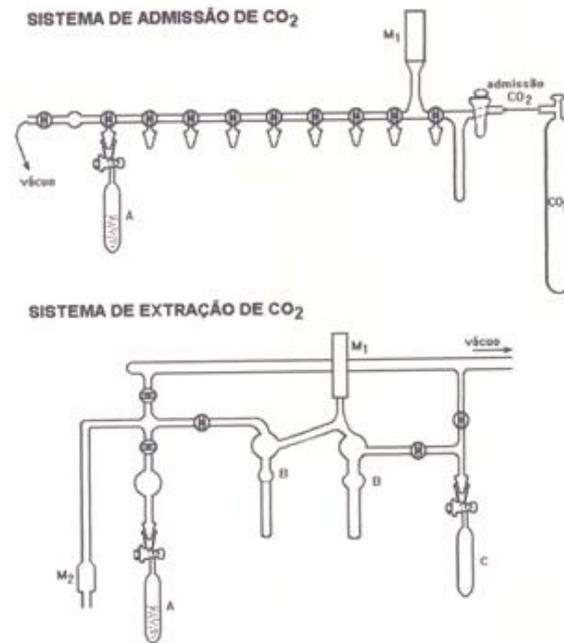


Fonte: Santiago, 1972.

**(ii) Análise de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$**

Para a obtenção do CO<sub>2</sub>, são colocados 10 mL de água na garrafa A do Sistema de Admissão do CO<sub>2</sub> e adicionado CO<sub>2</sub> padrão a uma pressão de 500 mmHg (Figura 4.3). A garrafa é agitada a uma temperatura  $\approx 25,3 \pm 0,1$  °C até ser estabelecido o equilíbrio; após o equilíbrio, o CO<sub>2</sub> é extraído no Sistema de Extração de CO<sub>2</sub> e levado para análise levado ao Espectrômetro de Massa.

**Figura 4.3** – Sistema de Admissão e de Extração de CO<sub>2</sub>



Fonte: Santiago, 1972.

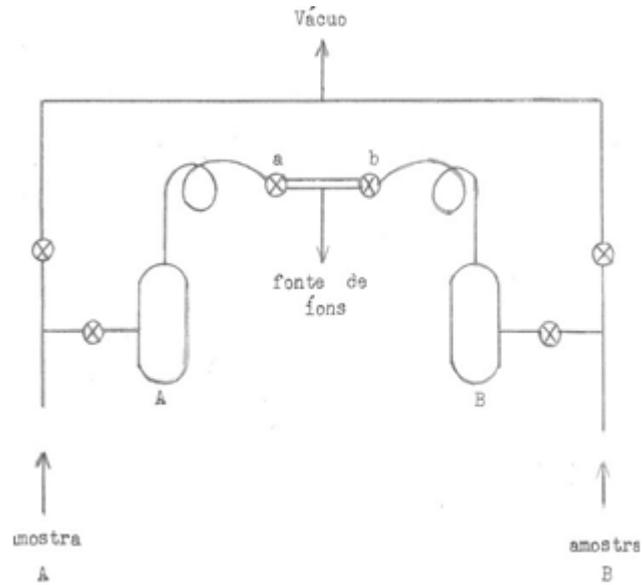
O CO<sub>2</sub> padrão não contém <sup>18</sup>O.

A garrafa é agitada a uma temperatura aproximadamente constante de  $25,3 \pm 0,1$  °C até ser estabelecido o equilíbrio. Após o equilíbrio o CO<sub>2</sub> é extraído no Sistema de Extração de CO<sub>2</sub>.

### ***(iii) Sistema de Admissão do Espectrômetro de Massa***

Os Espectrômetros de Massa para estas medidas têm um Sistema Duplo de Admissão da amostra (Figura 4.4) porque as medidas de D/H e <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O são feitas em relação a um padrão e expressas em delta por mil (Equação 1).

**Figura 4.4** – Espectrômetro com Sistema Duplo de Admissão



Fonte: Santiago, 1972

Insere-se, no sistema de admissão de amostra do Espectrômetro de Massa, a garrafa da amostra e a do padrão, com todas as válvulas do equipamento fechadas. Abre-se a válvula da amostra para o equipamento fazer as medidas; completada esta fase esta válvula é fechada e a tubulação é limpa com o sistema de vácuo.

Repete-se o procedimento para a amostra e para o padrão alternadamente obtendo várias medidas e com os dados obtidos é feita uma média que é a razão isotópica da amostra. Este procedimento é seguido para medidas de D/H e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ .

#### ***4.1.4 Condutividade Elétrica***

A condutividade elétrica (CE) expressa quantitativamente a capacidade da água conduzir corrente elétrica; depende da concentração total das substâncias dissolvidas ionizadas e de sua mobilidade que, por sua vez, depende da temperatura na qual a medida é realizada.

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

Sua determinação dá uma estimativa do conteúdo de sólidos totais dissolvidos em uma amostra, pode-se estimar os Sólidos Totais Dissolvidos (STD) em mg/L, utilizando a equação (SUASSUNA, 2007):

$$\mathbf{STD = 0,64 CE} \quad (22)$$

O CONAMA (2008) define através da Resolução N° 396 o Valor Máximo Permitido (VMP) de parâmetros presentes nas águas potáveis, ou seja, as que são apropriadas ao consumo humano.

Nesta Resolução a condutividade elétrica não tem um valor especificado o STD tem VMP = 1000 mg/L. A equação (22) que relaciona o STD com CE permite identificar aproximadamente o valor para CE; aproximadamente porque a relação entre estes dois parâmetro pode ter valores ligeiramente diferente dependendo das condições climáticas.

## 5 RESULTADOS

Os locais, resultados de medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica de amostras coletadas em janeiro, abril, julho e outubro de 2011 estão mostrados nas Tabelas 5.1 a 5.4, respectivamente.

**Tabela 5.1a** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Janeiro de 2011 (COG: Cogherh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário / Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Abaiara</b>					
ABA0002	1800	Sítio Capoeira	-12,22	-2,94	513
<b>Barbalha</b>					
BAR0002	1787	JB – Jeans do Brasil	-12,89	-2,98	111
BAR0008	1788	CAGECE P1 – Tupinambá	-14,19	-3,35	528
BAR0011	1826	CAGECE P6 – V. Malvina	-13,81	-3,43	290
<b>Brejo Santo</b>					
BJS0001	1797	Pau D'arco	-14,52	-3,29	1300
<b>Crato</b>					
CRT0001	1791	Engenho Brigadeiro	-12,39	-3,02	150
CRT0002	1794	SAAEC – Santa Rosa	-18,18	-3,68	241
CRT0003	1792	WOOJIN	-13,44	-3,26	145
CRT0004	1814	DER	-13,50	-3,37	419
CRT0005	1793	SISAR – Sítio Alto	-13,14	-3,22	674
CRT0006	1812	SESI	-13,71	-3,05	416
CRT0008	1790	SAAEC – Batateiras	-13,44	-3,15	244
CRT0009	1789	Escola Agrícola	-18,58	-3,21	283
CRT0013	1795	SAAEC – Baixio Palmeiras	-14,62	-3,23	1103
CRT0014	1815	SAAEC – Cafundó	-16,30	-3,42	544
CRT0017	1813	Hospital São Vicente	-17,40	-3,60	213
<b>Milagres</b>					
MIL0001	1799	Carnaúba dos Lacerdas	-19,64	-4,21	473
MIL0002	1798	Projeto EBENEZER	-20,86	-4,20	166

Na coleta de Janeiro de 2011, os valores de  $\delta D$  variaram de -20,86 ‰ a -12,22 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços CRT0002, CRT0009, CRT0014, CRT0017, MIL0001 e MIL0002. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -4,21 ‰ a -2,94 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços MIL0001 e MIL0002. Os mais altos valores de condutividade elétrica foram encontrados nos poços BJS0001 e CRT0013.

Nível estático e nível dinâmico dos poços amostrados se separam em dois conjuntos estatisticamente distintos de dados indicando dois sistemas aquíferos; as medidas isotópicas mostram que os dados representam também mais de um aquífero.

**Tabela 5.1b** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Janeiro de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário / Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Juazeiro do Norte</b>					
JUN0001	1811	SISAR – Vila Santo Antônio	-15,68	-3,49	610
JUN0001	1825	SISAR – Vila Santo Antônio	-15,30	-3,46	611
JUN0002	1818	Fazenda Boca das Cabras	-16,46	-3,31	303
JUN0003	1820	Rodoviária Padre Cícero	-15,32	-3,27	190
JUN0009	1809	Cemitério Parque Flor	-15,89	-3,47	187
JUN0011	1819	Curtume Santo Agostinho	-16,22	-3,51	312
JUN0015	1822	CAGECE, P13 – Lagoa Seca	-15,71	-3,37	201
JUN0018	1817	Mercado Central	-19,75	-3,78	954
JUN0021	1810	Verdureiro Malvas	-17,28	-3,72	1276
JUN0022	1808	Mercado Pirajá	-15,41	-2,89	707
JUN0024	1821	SENAI	-20,66	-3,55	260
JUN0025	1816	SESI	-15,10	-3,42	727
JUN0028	1823	CAGECE, P2 – Tiradentes	-15,84	-3,47	820
JUN0029	1824	CAGECE, P3 – Tiradentes	-23,88	-4,41	476
<b>Missão Velha</b>					
MIV0001	1806	SISAR – Curral das Cabras	-19,64	-4,21	313
MIV0002	1805	SISAR – Sítio Logradouro	-20,86	-4,20	392
MIV0003	1802	Sítio Cachoeira	-15,21	-3,61	198
MIV0004	1807	Sítio Barreiras	-11,92	-3,14	319
MIV0005	1801	SISAR – Olho D'água	-12,71	-3,05	142
MIV0007	1804	CAGECE, P1	-12,90	-3,31	453
MIV0013	1803	Projeto FRUTCU	-25,56	-4,31	335
<b>Porteiras</b>					
POT0001	1796	Sítio Abreu	-16,89	-3,42	274

Na coleta de Janeiro de 2011, os valores de  $\delta D$  variaram de -23,88 ‰ a -11,92 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços JUN0018, JUN0024, JUN0029, MIV0001 e MIV0002. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -4,41 ‰ a -2,89 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços MIV0001 e MIV0002. O mais alto valor de condutividade elétrica foi encontrado no poço JUN0021.

**Tabela 5.2a** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Abril de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário / Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Abaiara</b>					
ABA0002	1893	Sítio Capoeira	-19,78	-3,30	307
ABA0003	1894	Olho D'água Cumprido	-14,73	-2,96	784
<b>Barbalha</b>					
BAR0002	1787	JB – Jeans do Brasil	-11,85	-2,27	90
BAR0008	1788	CAGECE P1 – Tupinambá	-12,98	-3,17	418
BAR0011	1826	CAGECE P6 – V. Malvina	-14,59	-3,07	234
<b>Brejo Santo</b>					
BJS0001	1890	Pau D'arco	-16,04	-3,11	1140
<b>Crato</b>					
CRT0001	1908	Engenho Brigadeiro	-13,26	-3,33	128
CRT0002	1911	SAAEC – Santa Rosa	-12,08	-3,09	199
CRT0003	1902	WOOJIN	-11,46	-3,07	124
CRT0004	1906	DER	-17,92	-3,63	331
CRT0005	1912	SISAR – Sítio Alto	-16,20	-3,76	528
CRT0006	1901	SESI	-12,85	-2,73	335
CRT0008	1913	SAAEC – Batateiras	-12,28	-3,14	205
CRT0010	1918	SAAEC / São Raimundo	-12,77	-3,17	193
CRT0013	1914	SAAEC – Baixio Palmeiras	-11,93	-3,33	977
CRT0014	1909	SAAEC – Cafundó	-12,81	-3,19	429
CRT0017	1907	Hospital São Vicente	-12,97	-3,22	177
CRT0018	1910	SAAEC / Mirandão	-12,59	-3,20	320
<b>Milagres</b>					
MIL0001	1892	Carnaúba dos Lacerdas	-19,35	-3,48	390
MIL0002	1891	Projeto EBENEZER	-15,24	-2,94	149

Na coleta de Abril de 2011 os valores de  $\delta D$  variaram de -19,78 ‰ a -11,46 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços ABA0002, CRT0014 e MIL0001. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -3,76 ‰ a -2,27 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços CRT0004 e CRT0005. O mais alto valor de condutividade elétrica foi encontrado no poço BJS0001 e CRT0013.

**Tabela 5.2b** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Abril de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário / Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Juazeiro do Norte</b>					
JUN0001	1918	SISAR – Vila Santo Antônio	-21,33	-4,37	530
JUN0002	1899	Fazenda Boca das Cabras	-14,96	-3,62	324
JUN0003	1903	Rodoviária Padre Cícero	-14,15	-3,57	148
JUN0009	1888	Cemitério Parque Flor	-15,35	-3,62	161
JUN0011	1919	Curtume Santo Agostinho	-14,76	-3,07	356
JUN0015	1883	CAGECE, P13 – Lagoa Seca	-15,25	-3,14	157
JUN0018	1900	Mercado Central	-13,27	-2,75	751
JUN0021	1916	Verdureiro Malvas	-11,32	-2,89	1139
JUN0022	1915	Mercado Pirajá	-13,18	-3,37	602
JUN0024	1887	SENAI	-15,51	-3,08	206
JUN0025	1886	SESI	-13,65	-2,84	522
JUN0028	1884	CAGECE, P2 – Tiradentes	-14,56	-2,87	645
JUN0029	1885	CAGECE, P3 – Tiradentes	-15,10	-2,89	369
<b>Missão Velha</b>					
MIV0001	1905	SISAR – Curral das Cabras	-12,64	-2,85	277
MIV0002	1897	SISAR – Sítio Logradouro	-15,95	-3,16	333
MIV0003	1895	Sítio Cachoeira	-15,83	-3,55	155
MIV0004	1904	Sítio Barreiras	-20,05	-2,60	280
MIV0007	1896	CAGECE, P1	-21,40	-3,94	391
MIV0013	1898	Projeto FRUTCU	-20,09	-3,70	277
<b>Porteiras</b>					
POT0001	1889	Sítio Abreu	-15,18	-3,02	236

Na coleta de Abril de 2011 os valores de  $\delta D$  variaram de -21,33 ‰ a -11,32 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços JUN0001, MIV0004, MIV0007 e MIV0013. A concentração de variou de -4,37 ‰ a -2,60 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços JUN0001, MIV0007 e MIV0013. O mais alto valor de condutividade elétrica foi encontrado no poço JUN0021.

**Tabela 5.3a** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Julho de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário / Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Abaiara</b>					
ABA0002	1990	Sítio Capoeira	-21,60	-3,50	931
<b>Barbalha</b>					
BAR0002	1973	JB – Jeans do Brasil	-13,30	-2,98	90
BAR0008	1974	CAGECE P1 – Tupinambá	-13,85	-3,16	471
BAR0011	1975	CAGECE P6 – V. Malvina	-15,01	-3,41	253
<b>Brejo Santo</b>					
BJS0001	1987	Pau D'arco	-15,45	-3,29	1226
<b>Crato</b>					
CRT0001	1983	Engenho Brigadeiro	-13,57	-2,98	174
CRT0002	2008	SAAEC – Santa Rosa	-10,75	-2,98	217
CRT0003	2007	WOOJIN	-12,50	-2,76	138
CRT0004	2003	DER	-11,22	-3,37	374
CRT0005	1982	SISAR – Sítio Alto	-17,53	-3,53	587
CRT0006	1984	SESI	-13,19	-3,03	371
CRT0008	2010	SAAEC – Batateiras	-14,78	-2,84	225
CRT0010	2011	SAAEC / São Raimundo	-14,75	-2,82	208
CRT0013	2004	SAAEC – Baixio Palmeiras	-12,13	-2,98	992
CRT0014	2005	SAAEC – Cafundó	-11,71	-2,93	469
CRT0017	2002	Hospital São Vicente	-18,09	-2,83	177
CRT0018	2006	SAAEC / Mirandão	-11,37	-2,93	352
<b>Milagres</b>					
MIL0001	1989	Carnaúba dos Lacerdas	-19,56	-3,41	444
MIL0002	1988	Projeto EBENEZER	-15,30	-3,09	157

Na coleta de Julho de 2011 os valores de  $\delta D$  variaram de -21,60 ‰ a -10,75 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços ABA0002, CRT0017 e MIL0001. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -3,53 ‰ a -2,76 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços ABA0002, BAR0011, CRT0005 e MIL0001. Os mais altos valores de condutividade elétrica foram encontrados nos poços ABA0002, BJS0001 e CRT0013.

**Tabela 5.3b** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Julho de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário- Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Juazeiro do Norte</b>					
JUN0001	2001	SISAR – Vila Santo Antônio	-21,31	-4,14	583
JUN0002	1981	Fazenda Boca das Cabras	-18,43	-3,15	387
JUN0003	2012	Rodoviária Padre Cícero	-15,88	-3,49	176
JUN0009	1998	Cemitério Parque Flor	-14,83	-3,19	181
JUN0011	2009	Curtume Santo Agostinho	-11,70	-3,14	286
JUN0015	1985	CAGECE, P13 – Lagoa Seca	-14,69	-3,46	179
JUN0018	1980	Mercado Central	-14,58	-3,08	827
JUN0021	2000	Verdureiro Malvas	-11,58	-3,01	1233
JUN0022	1999	Mercado Pirajá	-13,30	-3,04	700
JUN0024	1979	SENAI	-16,15	-3,40	277
JUN0025	1978	SESI	-13,75	-2,99	551
JUN0028	1976	CAGECE, P2– Tiradentes	-15,60	-3,33	725
JUN0029	1977	CAGECE, P3 – Tiradentes	-15,95	-3,27	418
<b>Missão Velha</b>					
MIV0001	1996	SISAR – Curreal das Cabras	-12,58	-2,84	297
MIV0002	1994	SISAR – Sítio Logradouro	-15,11	-3,26	375
MIV0003	1992	Sítio Cachoeira	-15,99	-3,19	176
MIV0004	1997	Sítio Barreiras	-11,06	-3,07	309
MIV0005	1991	SISAR – Olho D'água	-15,04	-3,19	350
MIV0007	1993	CAGECE, P1	-20,91	-4,36	438
MIV0013	1995	Projeto FRUTCU	-21,85	-4,03	330
<b>Porteiras</b>					
POT0001	1986	Sítio Abreu	-15,61	-3,29	273

Na coleta de Julho de 2011 os valores de  $\delta D$  variaram de -21,85 ‰ a -11,06 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços JUN0001, MIV0007 e MIV0013. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -4,36 ‰ a -2,84 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços JUN0001, MIV0007 e MIL0013. O mais alto valor de condutividade elétrica foi encontrado no poço JUN0021.

**Tabela 5.4a** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Abaiara, Barbalha, Brejo Santo, Crato e Milagres coletadas em Outubro de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG/ABA	RG	Proprietário / Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Abaiara</b>					
ABA0002	2143	Sítio Capoeira	-17,20	-3,35	859
<b>Barbalha</b>					
BAR0002	2155	JB – Jeans do Brasil	-13,70	-2,79	82
BAR0008	2156	CAGECE P1 – Tupinambá	-14,60	-2,91	471
BAR0011	2157	CAGECE P6 – V. Malvina	-16,40	-3,10	261
<b>Brejo Santo</b>					
BJS0001	2140	Pau D'arco	-16,90	-3,34	1577
<b>Crato</b>					
CRT0001	2167	Engenho Brigadeiro	-13,60	-2,95	219
CRT0002	2177	SAAEC – Santa Rosa	-12,10	-3,30	277
CRT0003	2176	WOOJIN	-11,20	-3,08	145
CRT0004	2170	DER	-14,50	-3,23	395
CRT0005	2172	SISAR – Sítio Alto	-16,70	-3,45	622
CRT0006	2171	SESI	-12,70	-3,08	394
CRT0008	2178	SAAEC – Batateiras	-12,20	-3,11	236
CRT0010	2173	SAAEC / São Raimundo	-12,70	-3,17	230
CRT0013	2168	SAAEC – Baixio Palmeiras	-13,70	-3,01	1099
CRT0014	2169	SAAEC – Cafundó	-24,00	-3,08	482
CRT0017	2174	Hospital São Vicente	-13,30	-3,03	205
CRT0018	2175	SAAEC / Mirandão	-12,50	-3,05	377
<b>Milagres</b>					
MIL0001	2142	Carnaúba dos Lacerdas	-20,10	-3,62	454
MIL0002	2141	Projeto EBENEZER	-16,40	-3,38	179

Na coleta de Outubro de 2011 os valores de  $\delta D$  variaram de -24,00 ‰ a -11,20 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços CRT0014 e MIL0001. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -3,62 ‰ a -2,79 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços CRT0005 e MIL0001. O mais alto valor de condutividade elétrica foram encontrados no poços CRT0013 e BJS0001 como ocorreu em todas as coletas.

**Tabela 5.4b** – Medidas de oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas dos municípios de Juazeiro do Norte, Missão Velha e Porteiras coletadas em Outubro de 2011 (COG: Cogerh, RG: registro geral)

COG	RG	Proprietário – Local	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	CE ( $\mu S/cm$ )
<b>Juazeiro do Norte</b>					
JUN0001	2153	SISAR – Vila Santo Antônio	-25,20	-4,30	570
JUN0002	2166	Fazenda Boca das Cabras	-15,70	-3,27	438
JUN0003	2163	Rodoviária Padre Cícero	-15,80	-3,24	196
JUN0009	2151	Cemitério Parque Flor	-18,90	-3,29	213
JUN0011	2165	Curtume Santo Agostinho	-15,30	-3,30	291
JUN0015	2159	CAGECE, P13 – Lagoa Seca	-29,30	-3,37	186
JUN0018	2158	Mercado Central	-16,10	-3,24	844
JUN0021	2152	Verdureiro Malvas	-15,30	-2,84	1193
JUN0022	2154	Mercado Pirajá	-17,30	-3,21	664
JUN0024	2164	SENAI	-17,90	-3,18	235
JUN0025	2162	SESI	-14,80	-2,95	591
JUN0029	2161	CAGECE, P3 – Tiradentes	-16,70	-3,31	442
JUN0029	2160	CAGECE, P3 – Tiradentes	-17,60	-3,18	458
<b>Missão Velha</b>					
MIV0001	2150	SISAR – Curral das Cabras	-16,80	-3,02	310
MIV0002	2146	SISAR – Sítio Logradouro	-16,70	-3,38	368
MIV0003	2145	Sítio Cachoeira	-16,90	-3,40	182
MIV0004	2147	Sítio Barreiras	-13,00	-2,81	317
MIV0005	2144	SISAR – Olho D'água	-16,00	-3,33	331
MIV0007	2148	CAGECE, P1	-22,40	-4,06	437
MIV0013	2149	Projeto FRUTCU	-31,20	-3,85	323
<b>Porteiras</b>					
POT0001	2139	Sítio Abreu	-20,60	-3,33	265

Na coleta de Outubro de 2011 os valores de  $\delta D$  variaram de -31,20 ‰ a -13,00 ‰ com os mais baixos encontrados nos poços JUN0001, JUN0015, MIV0007, MIV0013 e POT0001. A concentração de  $\delta^{18}O$  variou de -4,30 ‰ a -2,81 ‰ com os valores mais baixos de  $\delta^{18}O$  encontrados em amostras dos poços JUN0001 e MIV0007. O mais alto valor de condutividade elétrica foi encontrado no poço MIV0007.

## 5.1 $\delta D$ e $\delta^{18}O$ com o Tempo

As medidas de  $\delta D\text{‰}$  e  $\delta^{18}O\text{‰}$  em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas, estão apresentadas:

(i) Tabela 5.5 e Figuras 5.1a e 5.1b nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS).

(ii) Tabela 5.6 e Figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c e 5.2d no município do Crato (CRT).

(iii) Tabela 5.7 e Figuras 5.3a, 5.3b, 5.3c e 5.3d no município de Juazeiro do Norte.

(iv) Tabela 5.8 e Figuras 5.4a e 5.4b nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT).

(v) Tabela 5.9 e Figuras 5.5a e 5.5b no município de Missão Velha (MIV).

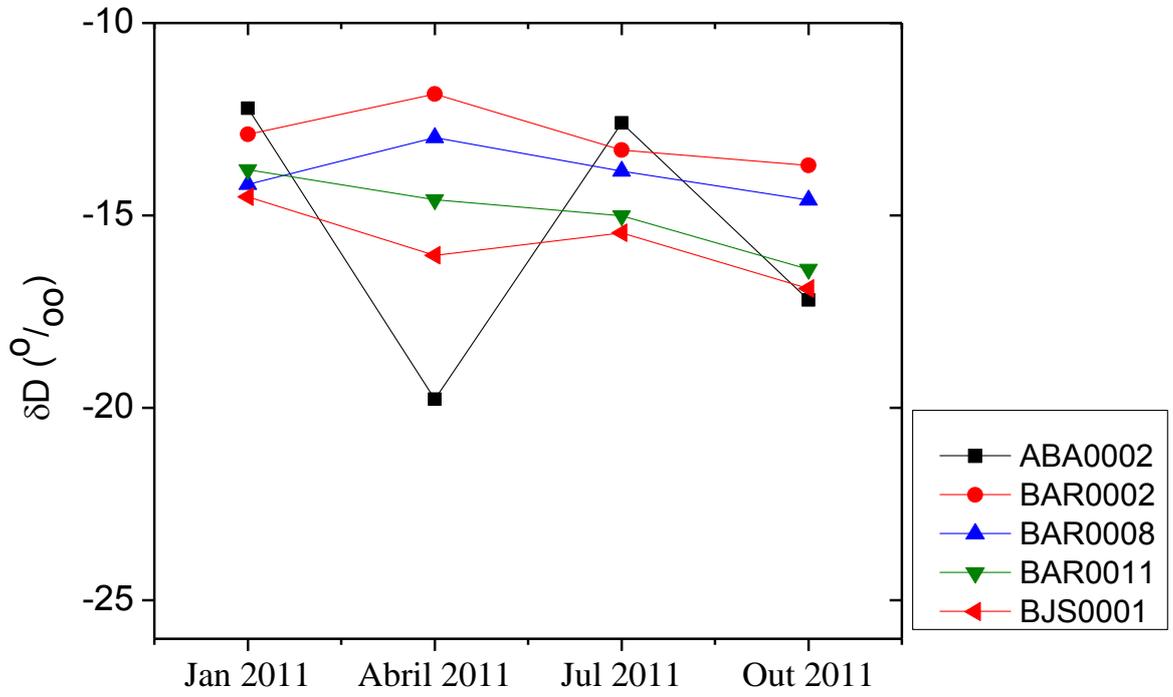
Os resultados mostram que predominam  $\delta^{18}O = -3,2\text{‰}$ , que é o valor das chuvas na região, as medidas dos dois isótopos pouco variaram durante o período de amostragem com exceção do que ocorreu nas amostras dos poços CRT0010, JUN0001, JUN0002, MIV0007, MIV0013 e MIL0001 (Figura 5.6)

**Tabela 5.5** – Concentração Isotópica de  $\delta D\text{‰}$  e de  $\delta^{18}O\text{‰}$  com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS), juntamente com as médias, desvios padrão e medianas

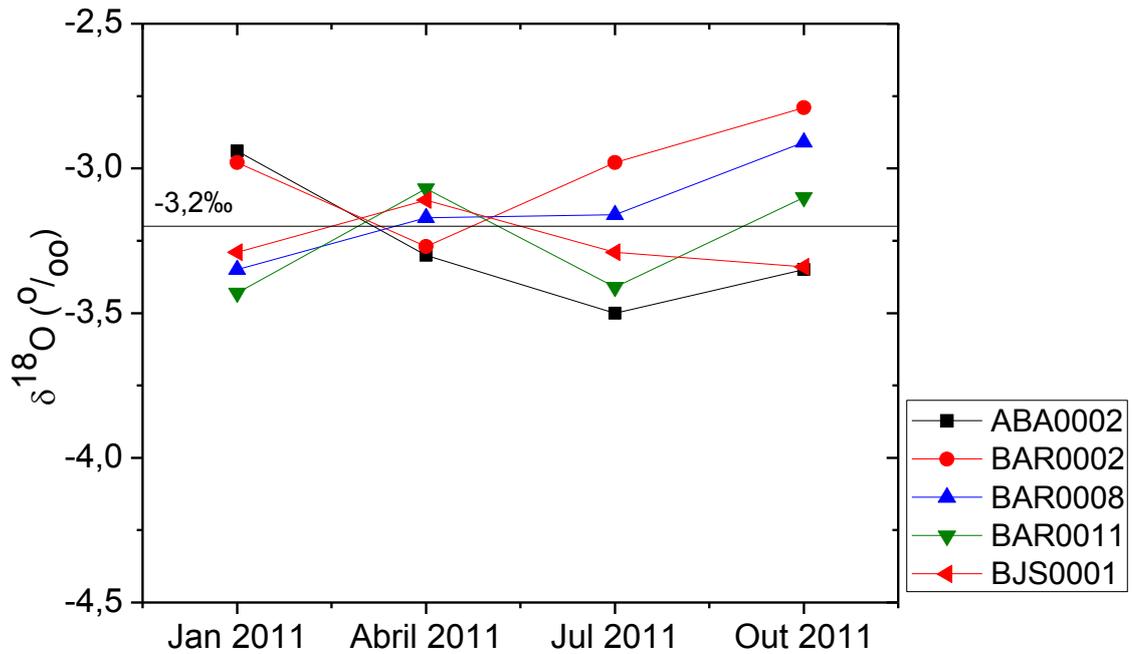
Mês	Poço				
	ABA 0002	BAR 0002	BAR 0008	BAR 0011	BJS 0001
<b><math>\delta D</math> (‰)</b>					
<b>jan/11</b>	-12,22	-12,89	-14,19	-13,81	-14,52
<b>abr/11</b>	-19,78	-11,85	-12,98	-14,59	-16,04
<b>jul/11</b>	-21,60	-13,30	-13,85	-15,01	-15,45
<b>out/11</b>	-17,20	-13,70	-14,60	-16,40	-16,90
<b>Média</b>	-17,70	-14,38			
<b>Desvio padrão</b>	4,07	1,36			
<b>Mediana</b>	-18,49	-14,36			
<b><math>\delta^{18}O</math> (‰)</b>					
<b>jan/11</b>	-2,94	-2,98	-3,35	-3,43	-3,29
<b>abr/11</b>	-3,30	-3,27	-3,17	-3,07	-3,11
<b>jul/11</b>	-3,50	-2,98	-3,16	-3,41	-3,29
<b>out/11</b>	-3,35	-2,79	-2,91	-3,10	-3,34
<b>Média</b>	-3,27	-3,17			
<b>Desvio Padrão</b>	0,24	0,19			
<b>Mediana</b>	-3,33	-3,17			

Considerando os desvios padrão na Tabela 5.5, as amostras de municípios Barbalha (BAR0002, BAR0008, BAR0011) e Brejo Santo (BJS0001) pertencem ao mesmo grupo tendo média de  $\delta D = -14,38 \pm 1,36$  e  $\delta^{18}O = -3,17 \pm 0,19$ .

**Figura 5.1** – Medidas Isotópicas de  $\delta D\text{‰}$  e de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  com o tempo em amostras de águas subterrâneas nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS) (a)  $\delta D\text{‰}$ ; (b)  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ .



(a)



(b)

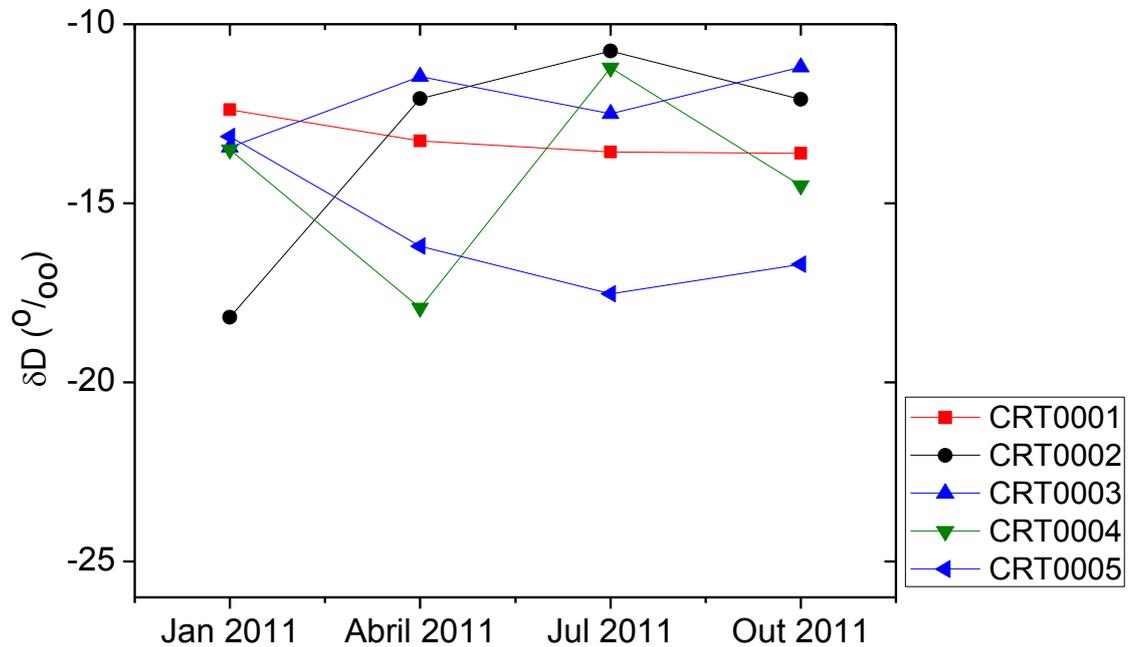
Os gráficos 5.1(a) e 5.1(b) mostram que os valores das concentrações isotópicas de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  sofreram pequenas variações nas quatro coletas, com exceção da amostra do poço ABA0002. Para o poço ABA0002 os valores de  $\delta^{18}O$  diminuíram da primeira para a segunda e da segunda para a terceira coletas e aumentaram da terceira para a quarta coleta, enquanto que os valores de  $\delta D$  apresentou comportamento diferente na época das coletas.

**Tabela 5.6** – Concentração Isotópica de  $\delta D\text{‰}$  e de  $\delta^{18}O\text{‰}$  com o tempo em amostras de água subterrânea do município do Crato (CRT), juntamente com as médias, desvios padrão e medianas

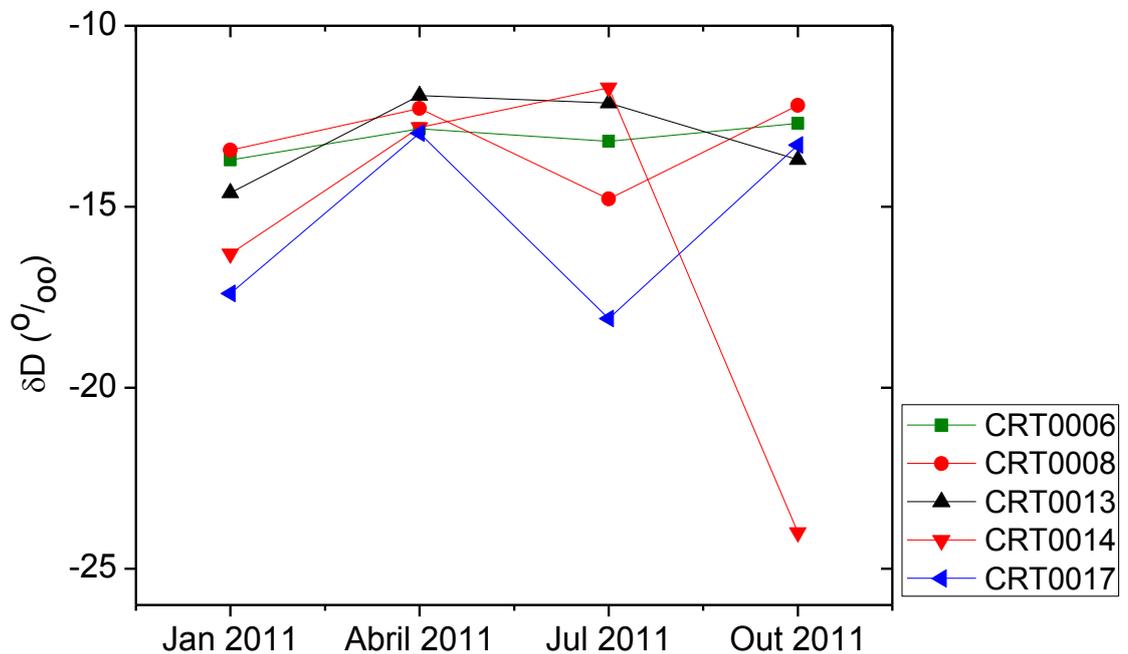
Mês	Poço: CRT									
	0001	0002	0003	0004	0005	0006	0008	0013	0014	0017
<b><math>\delta D</math> (‰)</b>										
<b>jan/11</b>	-12,39	-18,18	-13,44	-13,50	-13,14	-13,71	-13,44	-14,62	-16,30	-17,40
<b>abr/11</b>	-13,26	-12,08	-11,46	-17,92	-16,20	-12,85	-12,28	-11,93	-12,81	-12,97
<b>jul/11</b>	-13,57	-10,75	-12,50	-11,22	-17,53	-13,19	-14,78	-12,13	-11,71	-18,09
<b>out/11</b>	-13,60	-12,10	-11,20	-14,50	-16,70	-12,70	-12,20	-13,70	-24,00	-13,30
<b>Média</b>	-13,98									
<b>Desvio Padrão</b>	2,61									
<b>Mediana</b>	-13,28									
<b><math>\delta^{18}O</math> (‰)</b>										
<b>jan/11</b>	-3,02	-3,68	-3,26	-3,37	-3,22	-3,05	-3,15	-3,23	-3,42	-3,60
<b>abr/11</b>	-3,33	-3,09	-3,07	-3,63	-3,76	-2,73	-3,14	-3,33	-3,19	-3,22
<b>jul/11</b>	-2,98	-2,98	-2,76	-3,37	-3,53	-3,03	-2,84	-2,98	-2,93	-2,83
<b>out/11</b>	-2,95	-3,30	-3,08	-3,23	-3,45	-3,08	-3,11	-3,01	-3,08	-3,03
<b>Média</b>	-3,18									
<b>Desvio Padrão</b>	0,25									
<b>Mediana</b>	-3,13									

Dos 10 poços amostrados em Crato, 05 (CRT0002, CRT0004, CRT0005, CRT0014 e CRT0017) apresentaram significativas variações de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  durante o período de coleta.

**Figura 5.2a** – Medidas Isotópicas de  $\delta D$ ‰ com o tempo em amostras de água subterrânea no município do Crato (CRT)



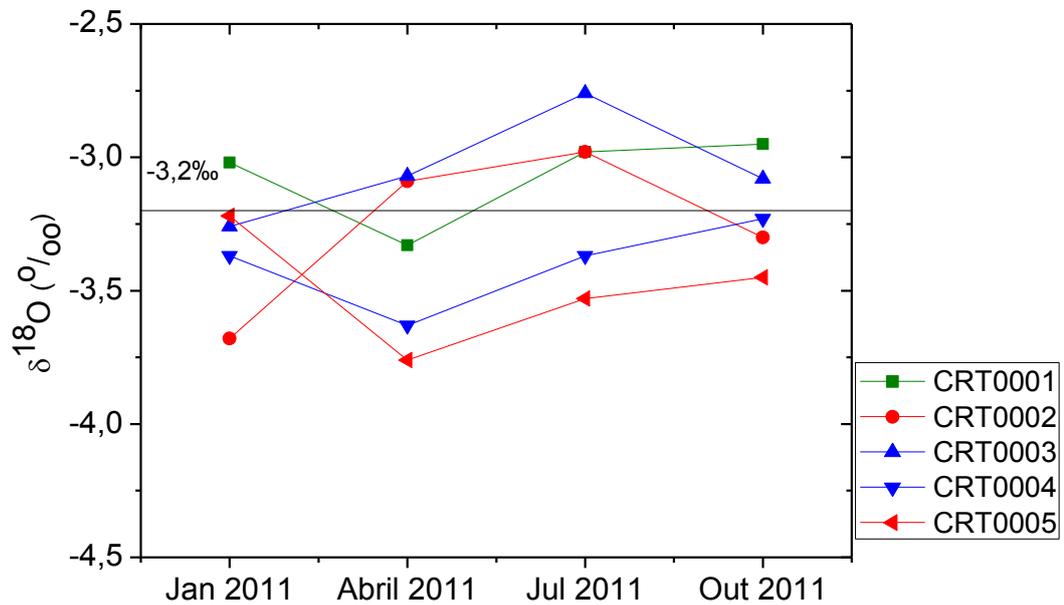
(a)



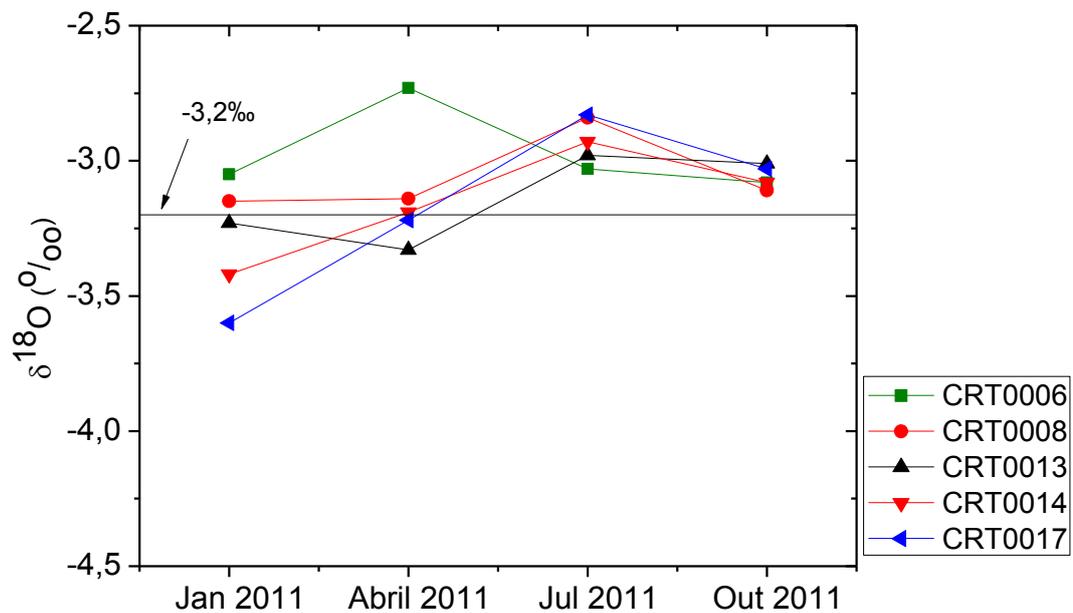
(b)

Os valores de  $\delta D$  para os poços do Crato mostraram pequenas variações, indicando que eles pertencem ao mesmo aquífero, exceção foi o valor de  $\delta D$  para a coleta de outubro do poço CRT0014, que mostrou um valor muito baixo. Este valor é devido a um erro de medida provavelmente causado durante a coleta.

**Figura 5.2b** – Medidas Isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  com o tempo em amostras de água subterrânea no município do Crato (CRT)



(c)



(d)

Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  para os poços do Crato não sofreram grandes variações, ficando em torno de  $-3,2\text{‰}$ , que é o valor de  $\delta^{18}\text{O}$  das águas da chuva na região mostrado em trabalhos anteriores. O comportamento dos valores de  $\delta\text{D}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  para o poço CRT0014 é o mesmo, aumentando nas três primeiras coletas e diminuindo na última coleta, com a variação de  $\delta\text{D}$  da terceira para a quarta coleta sendo mais significativa.

**Tabela 5.7** – Concentração Isotópica de  $\delta D\text{‰}$  e  $\delta^{18}O\text{‰}$  em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas no município de Juazeiro do Norte, juntamente com as médias, desvios padrão e medianas

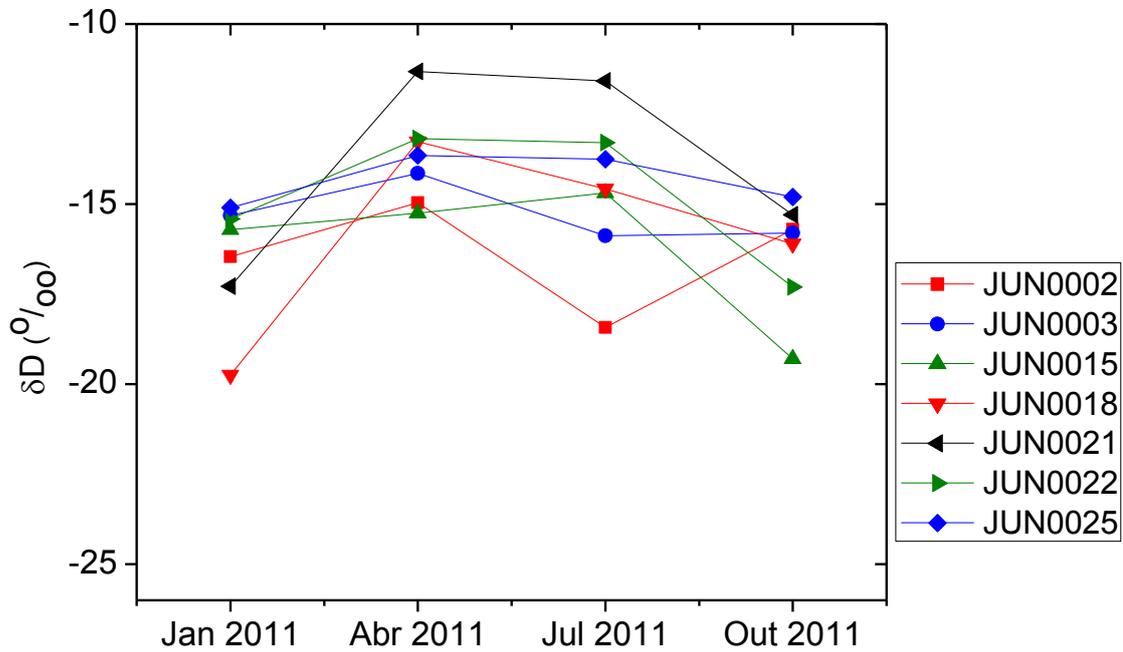
Mês	Poço: JUN						
	0002	0003	0015	0018	0021	0022	0025
<b><math>\delta D</math> (‰)</b>							
<b>jan/11</b>	-16,46	-15,32	-15,71	-19,75	-17,28	-15,1	-15,41
<b>abr/11</b>	-14,96	-14,15	-15,25	-13,27	-11,32	-13,65	-13,18
<b>jul/11</b>	-18,43	-15,88	-14,69	-14,58	-11,58	-13,75	-13,30
<b>out/11</b>	-15,70	-15,80	-19,30	-16,10	-15,30	-14,80	-17,30
<b>Média</b>	-15,26						
<b>Desvio Padrão</b>	1,99						
<b>Mediana</b>	-15,28						
<b><math>\delta^{18}O</math> (‰)</b>							
<b>jan/11</b>	-3,31	-3,27	-3,78	-3,37	-3,72	-3,42	-2,89
<b>abr/11</b>	-3,62	-3,57	-2,75	-3,14	-2,89	-2,84	-3,37
<b>jul/11</b>	-3,15	-3,49	-3,08	-3,46	-3,01	-2,99	-3,04
<b>out/11</b>	-3,27	-3,24	-3,24	-3,37	-2,84	-2,95	-3,21
<b>Média</b>	-3,22						
<b>Desvio Padrão</b>	0,28						
<b>Mediana</b>	-3,24						

Continuação

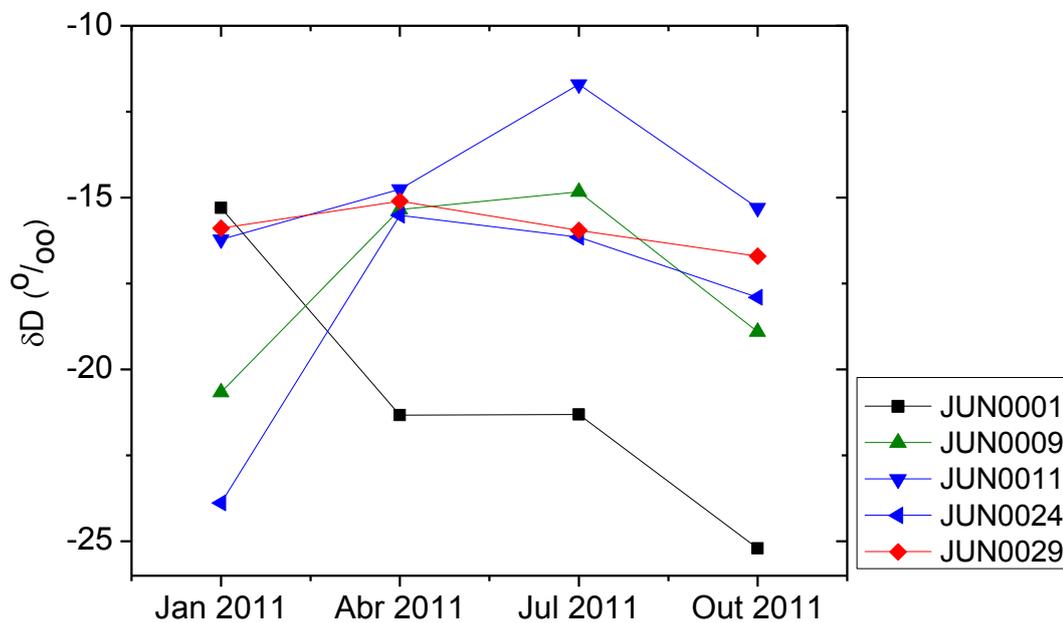
Mês	Poço: JUN				
	0001	0009	0011	0024	0029
<b><math>\delta D</math> (‰)</b>					
jan/11	-15,30	-15,89	-16,22	-20,66	-23,88
abr/11	-21,33	-15,35	-14,76	-15,51	-15,10
jul/11	-21,31	-14,83	-11,70	-16,15	-15,95
out/11	-25,20	-18,90	-15,30	-17,90	-16,70
<b>Média</b>	-20,79	-16,55			
<b>Desvio Padrão</b>	4,09	2,77			
<b>Mediana</b>	-21,32	-15,92			
<b><math>\delta^{18}O</math> (‰)</b>					
jan/11	-3,46	-3,47	-3,51	-3,55	-4,41
abr/11	-4,37	-3,62	-3,07	-3,08	-2,89
jul/11	-4,14	-3,19	-3,14	-3,40	-3,27
out/11	-4,30	-3,29	-3,30	-3,18	-3,31
<b>Média</b>	-4,07	-3,36			
<b>Desvio Padrão</b>	0,42	0,34			
<b>Mediana</b>	-4,22	-3,30			

A maioria dos poços da Tabela 5.7 apresentam os menores valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  em janeiro e outubro e os maiores valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  em abril e julho. As concentrações isotópicas de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  do poço JUN0001 foram mais altas em janeiro e diminuíram nas coletas de abril, julho e outubro, um comportamento diferente dos demais poços.

**Figura 5.3a** – Medidas Isotópicas de  $\delta D\%$  com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Juazeiro do Norte (JUN)



(a)

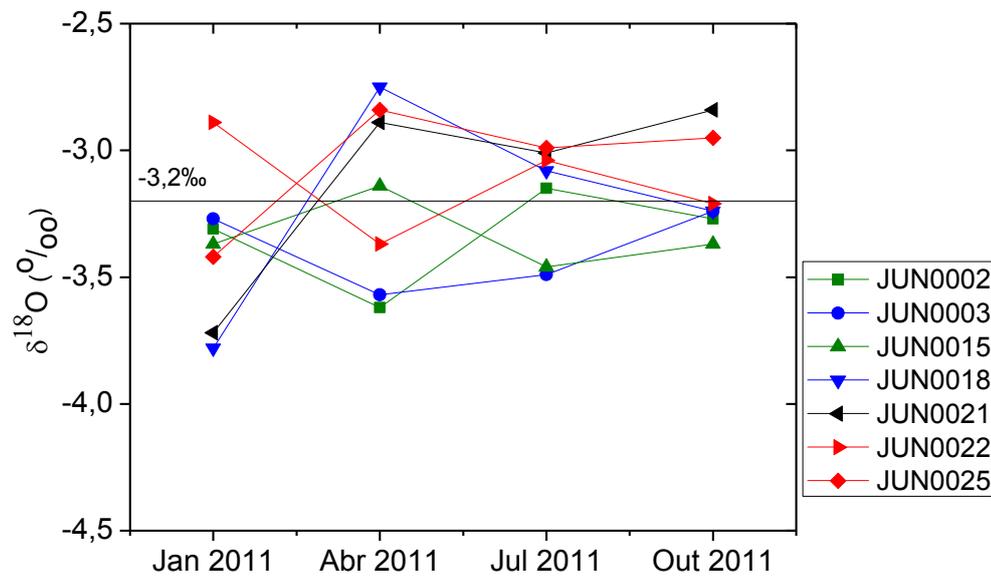


(b)

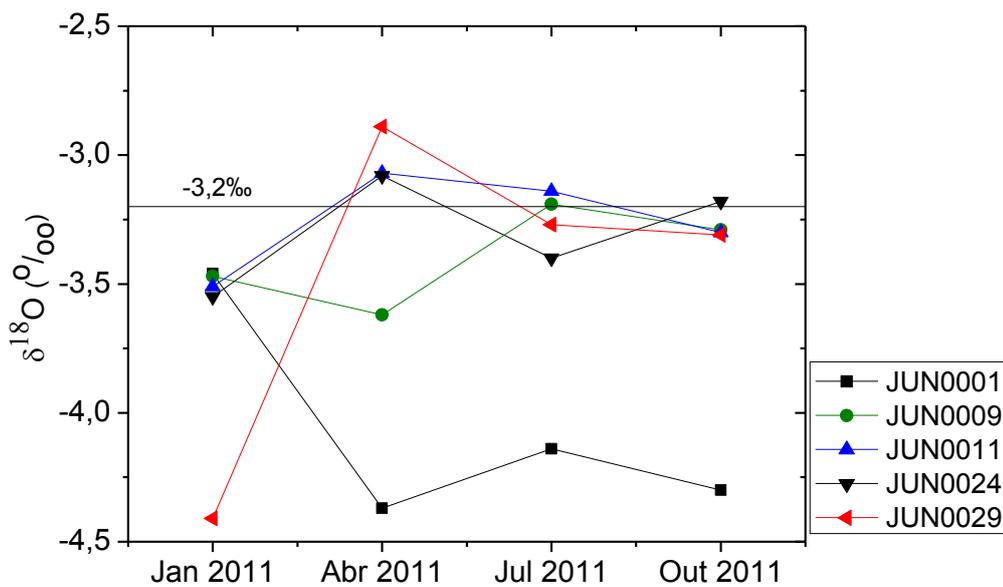
Todos os poços do Juazeiro do Norte sofreram pequenas variações nos valores de  $\delta D$  mostrando que eles pertencem ao mesmo aquífero, exceções foram os poços JUN0001 e JUN0009. O poço JUN0009 apresentou valor baixo de  $\delta D$  na primeira coleta que pode ter

vido causado por mistura de águas recentes com paleoáguas ou devido ao efeito de quantidade, já que no ano da coleta das amostras foi um ano chuvoso. O poço JUN0001 apresentou concentrações de  $\delta D$  que diminuíram a cada coleta caracterizando a mistura de águas recentes com paleoáguas.

**Figura 5.3b** – Medidas Isotópicas de  $\delta^{18}O$ ‰ com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Juazeiro do Norte (JUN)



(c)



(d)

Todos os poços do Juazeiro do Norte sofreram pequenas variações nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  estando o valor médio em torno de  $-3,2\text{‰}$ , que é o valor de  $^{18}\text{O}$  das águas da chuva na região mostrado em trabalhos anteriores, portanto, pertencendo ao mesmo aquífero, exceções foram os poços JUN0001 e JUN0009, exatamente aqueles poços que sofreram variações significativas de  $\delta\text{D}$ . O comportamento nos valores de  $\delta\text{D}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  do poço JUN0001 é praticamente o mesmo, assim como para os valores de  $\delta\text{D}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  do poço JUN0009.

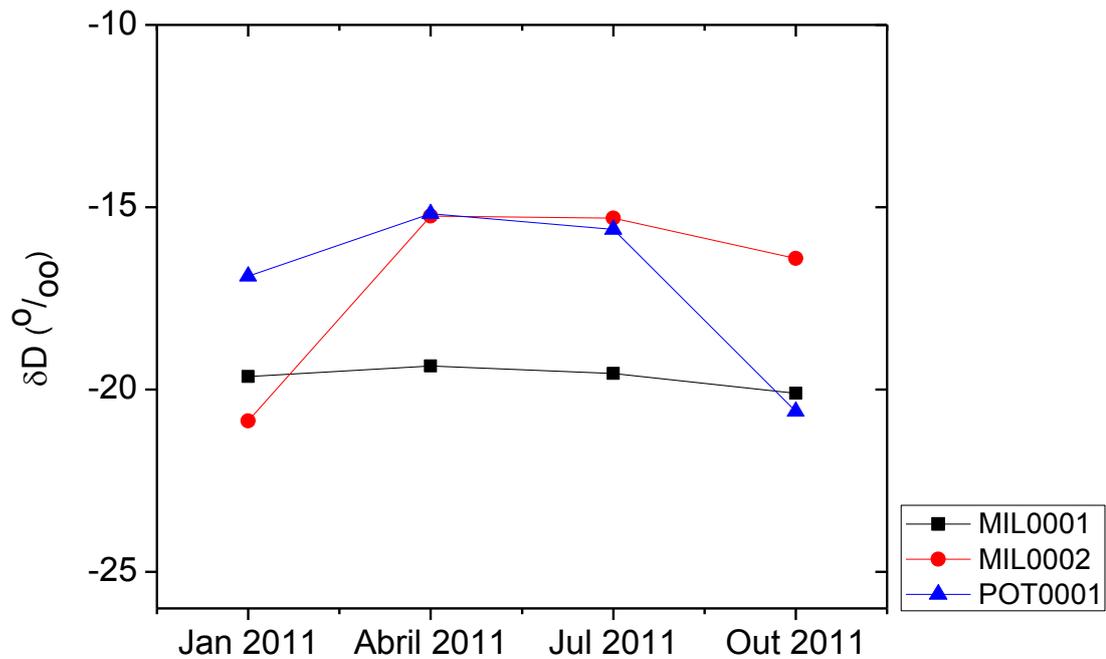
**Tabela 5.8** – Concentração Isotópica de  $\delta\text{D}\text{‰}$  e  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT) juntamente com as médias, desvios padrão e medianas

Mês	Poço		
	MIL 0001	MIL 0002	POT 0001
<b><math>\delta\text{D}</math> (‰)</b>			
<b>jan/11</b>	-19,64	-20,86	-16,89
<b>abr/11</b>	-19,35	-15,24	-15,18
<b>jul/11</b>	-19,56	-15,30	-15,61
<b>out/11</b>	-20,10	-16,40	-20,60
<b>Média</b>	-18,31		-16,89
<b>Desvio Padrão</b>	2,28		-15,18
<b>Mediana</b>	-19,46		-15,61
<b><math>\delta^{18}\text{O}</math> (‰)</b>			
<b>jan/11</b>	-4,21	-4,20	-3,42
<b>abr/11</b>	-3,48	-2,94	-3,02
<b>jul/11</b>	-3,41	-3,09	-3,29
<b>out/11</b>	-3,62	-3,38	-3,33
<b>Média</b>	-3,54		-3,51
<b>Desvio Padrão</b>	0,46		0,54
<b>Mediana</b>	-3,45		-3,38

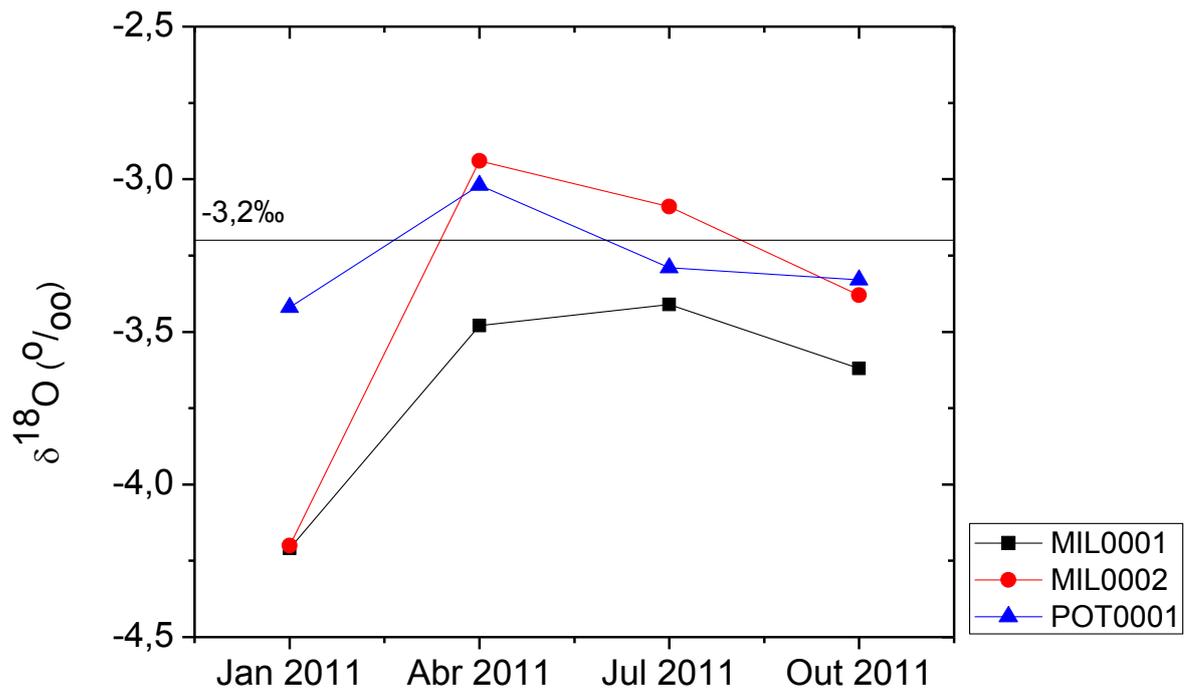
Os dados da Tabela 5.8 revelam que os valores de  $\delta\text{D}$  para amostras do poço MIL0001 não sofreram grandes variações durante o período de coleta, no poço MIL0002, os valores aumentaram na segunda coleta e no POT0001 diminuiu na última coleta. Os valores

de  $\delta^{18}\text{O}$  aumentaram na segunda coleta nas amostras dos poços MIL0001 e MIL0002, mas os três poços apresentaram o mesmo valor médio.

**Figura 5.4** – Medidas Isotópicas de  $\delta\text{D}\text{‰}$  e  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT) (a)  $\delta\text{D}\text{‰}$ ; (b)  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ .



(a)



(b)

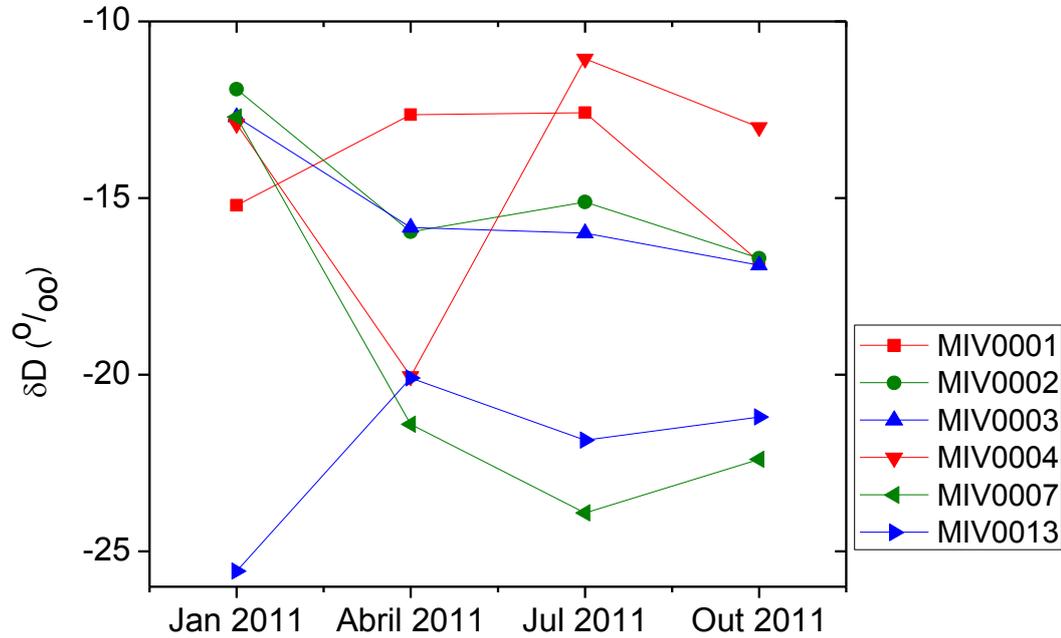
$\delta D$  dos poços MIL0001 e POT0001 apresentaram o mesmo comportamento, mas difere do que já foi observado com as amostras do poço MIL0002. Nas medidas de  $\delta^{18}O$  as amostras dos três poços apresentam o mesmo comportamento. Os valores mais baixo de  $\delta^{18}O$  para os poços de Milagres, é que em geral em Milagres o aquífero é o Mauriti.

**Tabela 5.9** – Concentração Isotópica de  $\delta D\%$  e  $\delta^{18}O\%$  em amostras de água subterrânea das quatro coletas, realizadas no município de Missão Velha (MIV), juntamente com as médias, desvios padrão e medianas

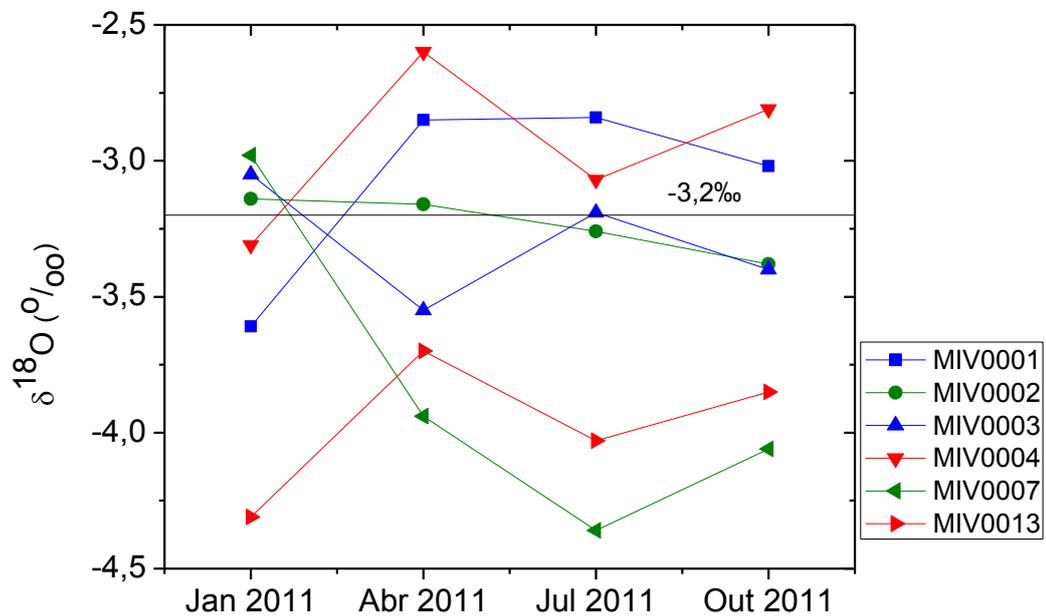
Mês	Poço: MIV					
	0001	0002	0003	0004	0007	0013
<b><math>\delta D</math> (%)</b>						
jan/11	-15,21	-11,92	-12,71	-12,90	-12,71	-25,56
abr/11	-12,64	-15,95	-15,83	-20,05	-21,40	-20,09
jul/11	-12,58	-15,11	-15,99	-11,06	-23,91	-21,85
out/11	-16,80	-16,70	-16,90	-13,00	-22,40	-21,20
<b>Média</b>	-14,71				-21,14	
<b>Desvio Padrão</b>	2,40				3,81	
<b>Mediana</b>	-15,16				-21,63	
<b><math>\delta^{18}O</math> (%)</b>						
jan/11	-3,61	-3,14	-3,05	-3,31	-2,98	-4,31
abr/11	-2,85	-3,16	-3,55	-2,60	-3,94	-3,70
jul/11	-2,84	-3,26	-3,19	-3,07	-4,36	-4,03
out/11	-3,02	-3,38	-3,40	-2,81	-4,06	-3,85
<b>Média</b>	-3,14				-3,90	
<b>Desvio Padrão</b>	0,28				0,43	
<b>Mediana</b>	-3,15				-3,99	

Na Tabela 5.9 estão os dados da coleta de Missão Velha que mostram para os poços MIV0001, MIV0002, MIV0003 e MIV0004 valores médios de  $\delta D = -14,71 \pm 2,40$  e de  $\delta^{18}O = -3,14 \pm 0,28$  e para os poços MIV0007 e MIV0013 valores médios de  $\delta D = -21,14 \pm 3,81$  e de  $\delta^{18}O = -3,90 \pm 0,43$ .

**Figura 5.5** – Medidas Isotópicas de  $\delta D\text{‰}$  e  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Missão Velha (MIV) (a)  $\delta D\text{‰}$ ; (b)  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ .



(a)

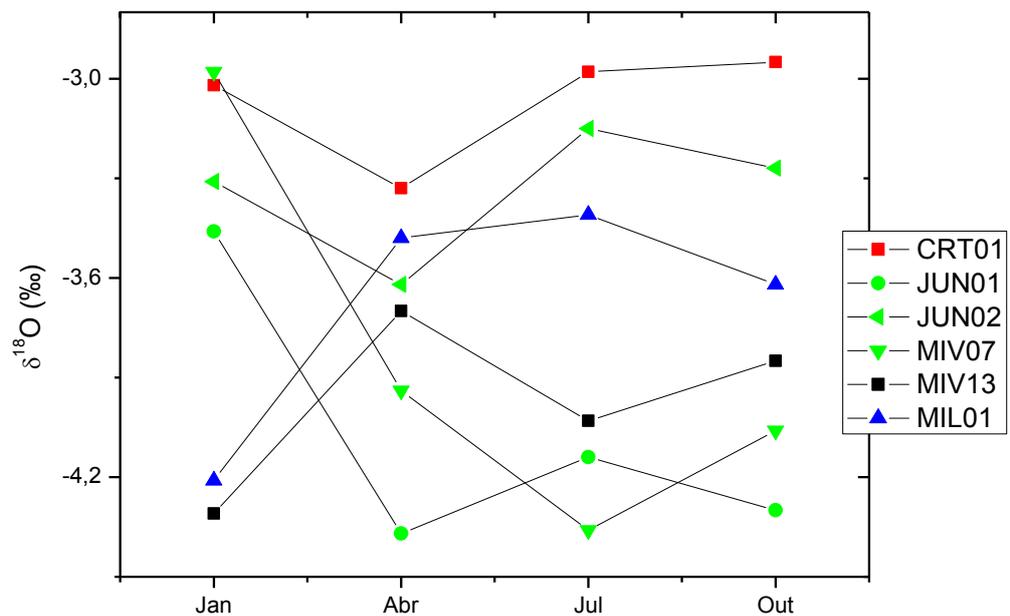


(b)

Todos os poços de Missão Velha apresentaram valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}\text{O}$  com pequenas variações, com o valor médio de  $\delta^{18}\text{O}$  estando em torno de  $-3,2\text{‰}$  que é o valor de  $\delta^{18}\text{O}$  das águas das chuvas na região, mostrados em trabalhos anteriores, todos os poços

pertencendo ao mesmo aquífero. Os poços MIV0007 e MIV0013 foram as exceções pertencendo, portanto a aquíferos diferentes. Os valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  para o poço MIV0007 apresentaram o mesmo comportamento, assim como os valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  para o poço MIV0013.

**Figura 5.6** –  $\delta^{18}O$  de águas coletadas em janeiro, abril, julho e outubro de 2011 com largas faixas de variação



Na figura 5.6 estão os poços, que durante as quatro coletas sofreram as maiores variações de  $\delta^{18}O$ . O poço MIV0017 foi o que sofreu maior variação de  $\delta^{18}O$  durante as quatro coletas.

## 5.2 Condutividade Elétrica com o Tempo

As medidas de condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) em amostras de água subterrânea das quatro coletas estão apresentados:

- (i) Tabela 5.10 e Figura 5.7 com amostras de água subterrâneas dos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS) juntamente com as médias, desvios padrão e medianas;
- (ii) Tabela 5.11 e Figuras 5.8a e 5.8b com amostras de água subterrâneas do município do Crato (CRT);
- (iii) Tabela 5.12 e Figuras 5.9a e 5.9b com amostras de água subterrâneas do município de Juazeiro do Norte;
- (iv) Tabela 5.13 e Figura 5.10 com amostras de água subterrâneas dos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT);
- (v) Tabela 5.14 e Figura 5.11 com amostras de água subterrâneas do município de Missão Velha;

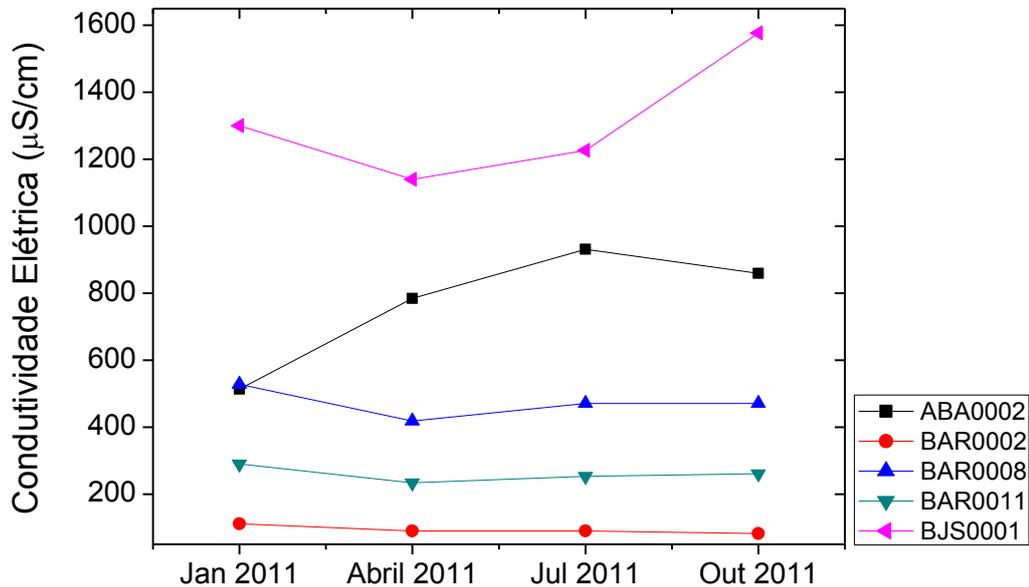
Os valores de condutividade, como os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  se mantiveram em estreitas faixas na maioria dos poços, durante o período de coleta, predominando condutividades elétricas abaixo de  $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Somente amostras do poço BJS0001 apresentou sempre  $\text{CE} > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Tabela 5.10** – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS) e médias, desvios padrão e medianas

	<b>Poço</b>				
	<b>ABA 0002</b>	<b>BAR 0002</b>	<b>BAR 0008</b>	<b>BAR 0011</b>	<b>BJS 0001</b>
<b>Profundidade</b>	70m	88m	134m	100m	60m
<b>Mês</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>				
<b>jan/11</b>	513	111	528	290	1300
<b>abr/11</b>	784	90	418	234	1140
<b>jul/11</b>	931	90	471	253	1226
<b>out/11</b>	859	82	471	261	1577
<b>Média</b>	771,75	274,92			1310,75
<b>Desvio padrão</b>	182,64	164,17			189,16
<b>Mediana</b>	821,50	257,00			1263,00

As condutividades elétricas das amostras de Barbalha são as de menores valores em comparação com as do poço de Abaiara e o de Brejo Santo, que é onde estão os mais altos valores, ou seja, as águas mais salinas. Enquanto que os poços de Barbalha apresentaram condutividade elétrica média de  $274,92 \pm 164,17 \mu\text{S}/\text{cm}$ , o poço de Abaiara apresentou uma condutividade elétrica média de  $771,75 \pm 182,64 \mu\text{S}/\text{cm}$  e o poço de Brejo Santo apresentou uma condutividade elétrica média de  $1370,75 \pm 189,16 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Figura 5.7** – Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Abaiara (ABA), Barbalha (BAR) e Brejo Santo (BJS)



A Figura 5.7 mostra que a condutividade elétrica dos poços de Barbalha é aproximadamente constante no período, e abaixo dos  $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Nas amostras do poço ABA0002 a condutividade elétrica cresceu até julho. No poço BJS0001 a condutividade elétrica diminuiu durante o período da coleta, apresentando grande decréscimo da condutividade na medida de outubro.

Pela Figura 5.7 vê-se que para a maioria dos poços a condutividade elétrica diminuiu no período chuvoso caracterizando o efeito da recarga porque a CE das águas das chuvas é muito menor que a CE das águas subterrâneas. O efeito de recarga é mais notável na figura para os poços que apresentam condutividade elétrica elevada como o poço BJS0001.

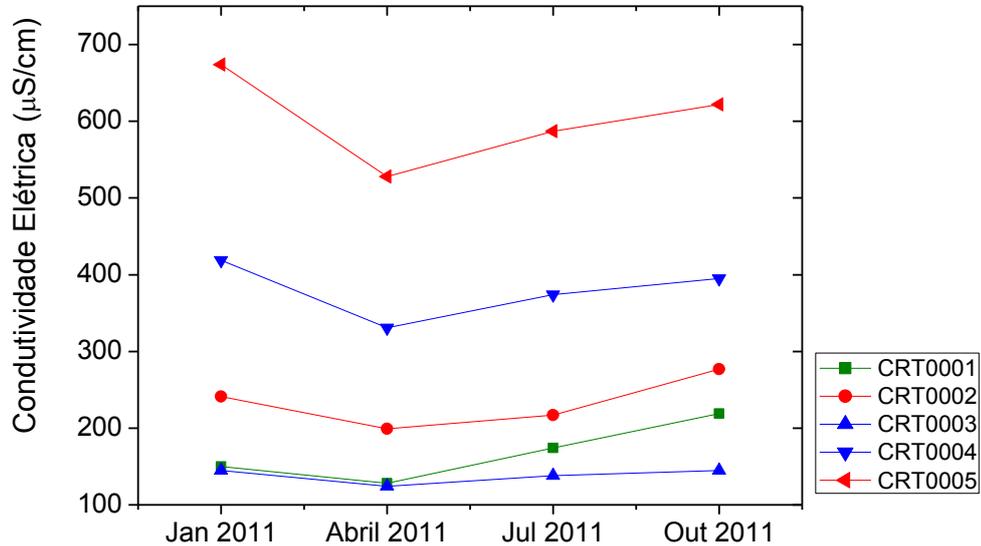
**Tabela 5.11** – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea do município do Crato (CRT) e médias, desvios padrão e medianas

	<b>Poço: CRT</b>									
	<b>0001</b>	<b>0002</b>	<b>0003</b>	<b>0008</b>	<b>0017</b>	<b>0004</b>	<b>0005</b>	<b>0006</b>	<b>0014</b>	<b>0013</b>
<b>Profundidade</b>	-	107,5m	150m	118m	80m	-	-	-	109m	111m
<b>Mês</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>									
<b>jan/11</b>	150	241	145	244	213	419	674	416	544	1103
<b>abr/11</b>	128	199	124	205	177	331	528	335	429	977
<b>jul/11</b>	174	217	138	225	177	374	587	371	469	992
<b>out/11</b>	219	277	145	236	205	395	622	394	482	1099
<b>Média</b>	191,95					460,63				1042,75
<b>Desvio Padrão</b>	43,61					103,65				67,56
<b>Mediana</b>	202,00					424,00				1045,50

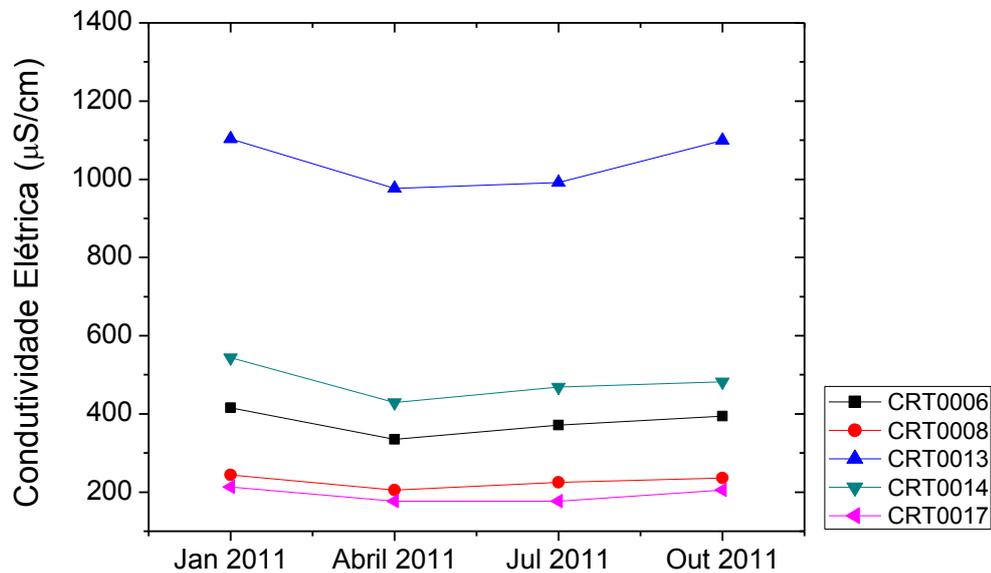
Os valores de condutividade elétrica em 07 poços (CRT0001, CRT0002, CRT0003, CRT0004, CRT0006, CRT0008 e CRT0017) ficaram abaixo de  $420 \mu\text{S}/\text{cm}$  e nos poços CRT0005 e CRT0014 a condutividade elétrica variou de 429 a  $674 \mu\text{S}/\text{cm}$  e nas amostras do poço CRT0013 a condutividade elétrica ficou na faixa de 977 a  $1103 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

A condutividade elétrica média dos poços CRT0001, CRT0002, CRT0003, CRT0008 e CRT0017 foi de  $191,95 \pm 43,61 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; para os poços CRT0004, CRT0005, CRT0006 e CRT0014 a condutividade elétrica média foi de  $460,63 \pm 103,65$  e para o poço CRT0013 que apresentou os valores de condutividade elétrica mais elevados seu valor médio foi de  $1042,75 \pm 67,56 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Figura 5.8** – Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Crato (CRT)



(a)



(b)

Os valores de condutividade elétrica das amostras de todos os poços do Crato apresentaram pouca variação e menores que  $700 \mu\text{S}/\text{cm}$ , exceção das amostras do poço CRT0013 que assinalou valores para a condutividade elétrica acima de  $950 \mu\text{S}/\text{cm}$ . No período chuvoso os valores de condutividade elétrica dos poços do Crato diminuiram

caracterizando o efeito de recarga dos aquíferos, e este efeito são mais bem observados na Figura 5.8 para os poços que apresentam condutividade elétrica elevada como os poços CRT0005 e CRT0013.

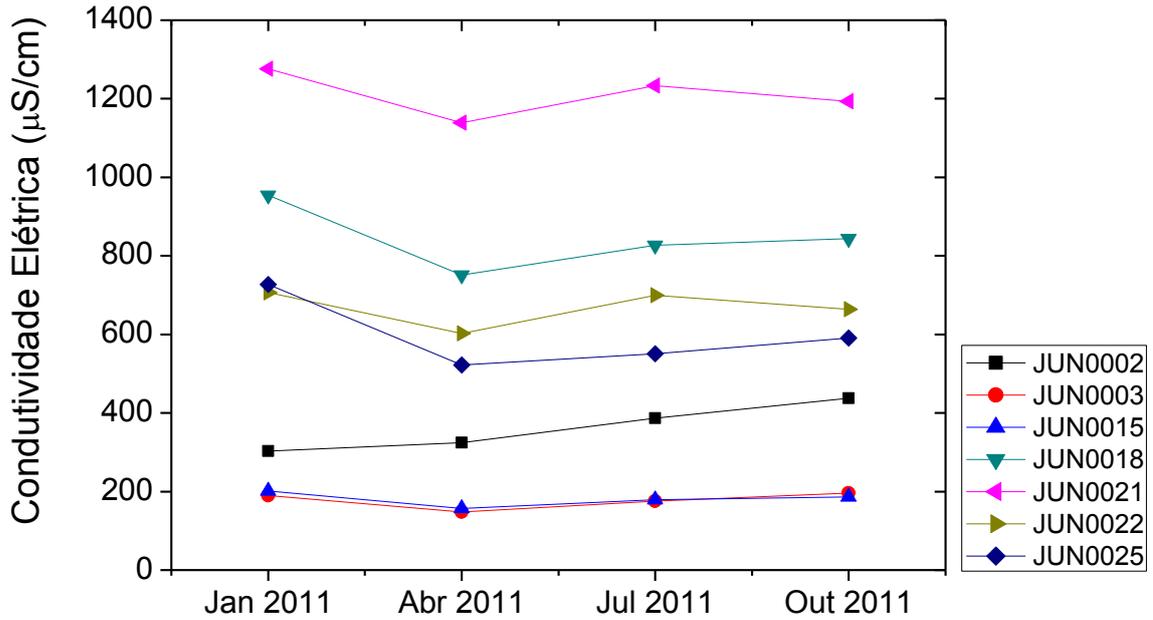
**Tabela 5.12** – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea do município de Juazeiro do Norte (JUN) e as médias, desvios padrão e medianas

	<b>Poço: JUN</b>						
	<b>0002</b>	<b>0003</b>	<b>0009</b>	<b>0011</b>	<b>0015</b>	<b>0024</b>	<b>0029</b>
<b>Profundidade</b>	80m	110m	65m	16m	101m	108m	140m
<b>Mês</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>						
<b>jan/11</b>	303	190	187	312	201	260	476
<b>abr/11</b>	324	148	161	356	157	206	369
<b>jul/11</b>	387	176	181	286	179	277	417
<b>out/11</b>	438	196	213	291	186	235	458
<b>Média</b>	296,39						
<b>Desvio Padrão</b>	98,58						
<b>Mediana</b>	297,00						
	<b>Poço: JUN</b>						
	<b>0001</b>	<b>0022</b>	<b>0025</b>	<b>0018</b>	<b>0021</b>		
<b>Profundidade</b>	110m	-	70m	84m	8m		
<b>Mês</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>						
<b>jan/11</b>	610	707	727	954	1276		
<b>abr/11</b>	530	602	522	751	1139		
<b>jul/11</b>	583	700	551	827	1233		
<b>out/11</b>	570	664	591	844	1193		
<b>Média</b>	613,08			1027,13			
<b>Desvio Padrão</b>	70,31			206,86			
<b>Mediana</b>	596,50			1046,50			

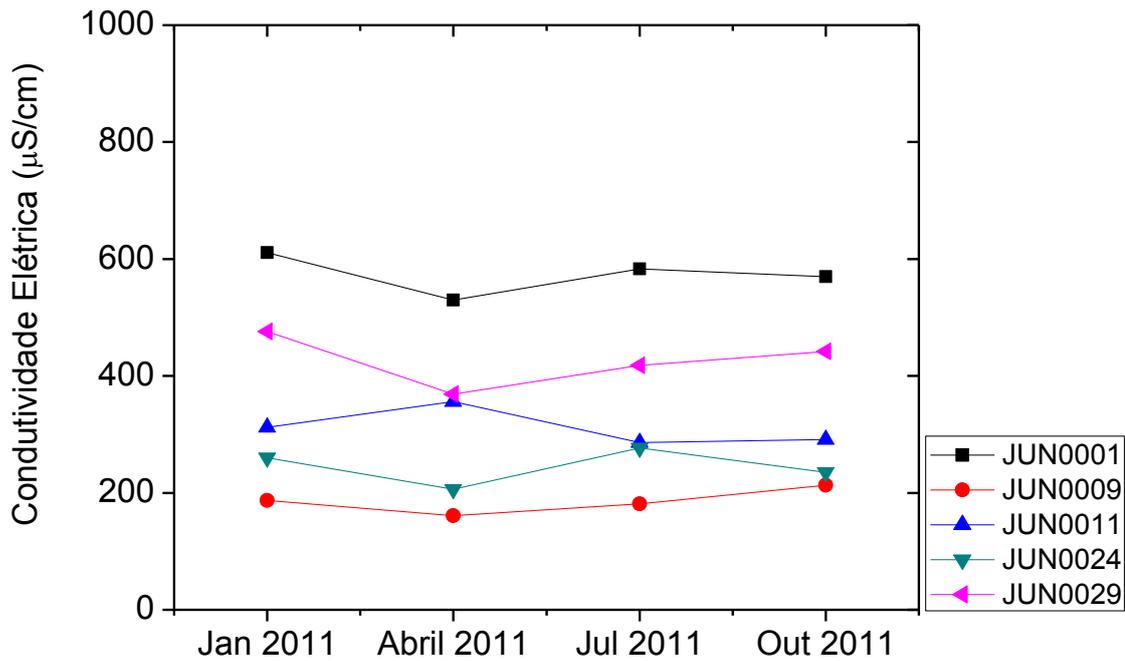
Os poços JUN0002, JUN0003, JUN0009, JUN0011, JUN0015, JUN0024 e JUN0029 apresentam condutividade na elétrica na mesma faixa de valores com média de  $296,39 \pm 98,58 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Os poços JUN0001, JUN0022 e JUN0025 se enquadram em outra

faixa de valores de condutividade elétrica com média de  $613,08 \pm 70,31 \mu\text{S}/\text{cm}$  e os poços JUN0018 e JUN0021 apresentaram na época das coletas os mais elevados valores de condutividade elétrica com média de  $1027,13 \pm 206,86 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Figura 5.9** – Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Juazeiro do Norte (JUN)



(a)



(b)

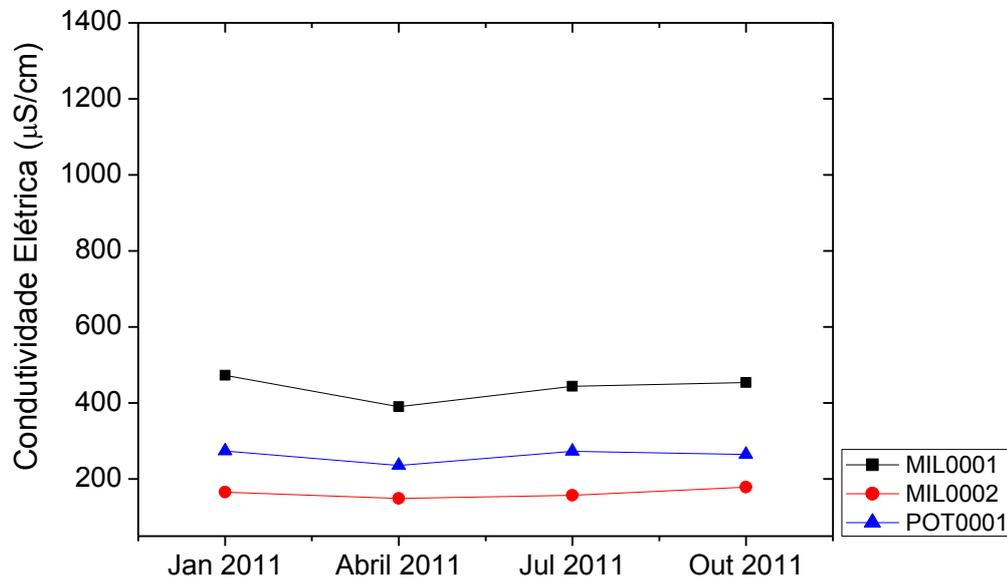
Os valores de condutividade elétrica no período de coleta de todos os poços de Juazeiro do Norte apresentaram pequenas variações em todas as faixas de valores. No período chuvoso os valores de condutividade elétrica diminuíram devido à recarga dos aquíferos a que pertencem esses poços. O efeito de recarga é mais notável no poço JUN0021 pois o mesmo apresenta a condutividade elétrica mais elevada.

**Tabela 5.13** – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea dos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT) e médias, desvios padrão e medianas

	<b>Poço</b>		
	<b>MIL 0001</b>	<b>MIL 0002</b>	<b>POT 0001</b>
<b>Profundidade</b>	60m	-	84m
<b>Mês</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>		
<b>jan/11</b>	473	166	274
<b>abr/11</b>	390	149	236
<b>jul/11</b>	444	157	273
<b>out/11</b>	454	179	265
<b>Média</b>	301,50		262,00
<b>Desvio Padrão</b>	150,39		17,80
<b>Mediana</b>	284,50		269,00

As condutividades elétricas nas amostras dos dois poços de Milagres e no poço de Porteiras são abaixo de  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Figura 5.10** – Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea nos municípios de Milagres (MIL) e Porteiras (POT)



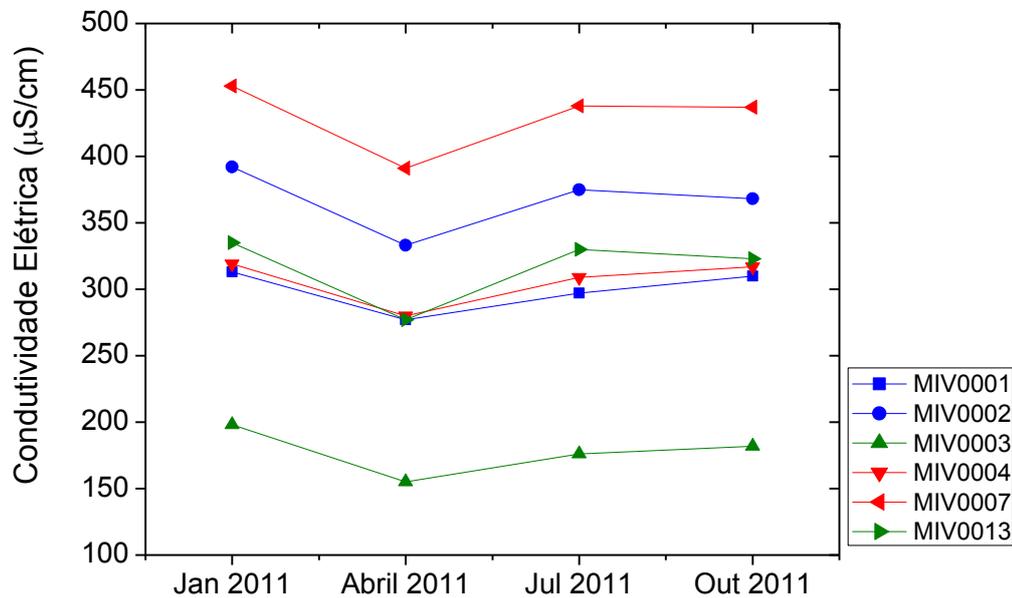
Nos três poços, MIL0001, MIL0002 e POT0001, a condutividade elétrica permaneceu aproximadamente constante com pequenas variações durante o período de coleta. Os poços de Milagres e Porteiras foram recarregados com a condutividade elétrica diminuindo no período chuvoso.

**Tabela 5.14** – Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea do município de Missão Velha (MIV) e médias, desvios padrão e medianas

	<b>Poço: MIV</b>					
	<b>0003</b>	<b>0001</b>	<b>0002</b>	<b>0004</b>	<b>0013</b>	<b>0007</b>
<b>Profundidade</b>	160m	100m	70m	-	180m	90m
<b>Mês</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>					
<b>jan/11</b>	198	313	392	319	335	453
<b>abr/11</b>	155	277	333	280	277	391
<b>jul/11</b>	176	297	375	309	330	438
<b>out/11</b>	182	310	368	317	323	437
<b>Média</b>	177,75	322,19				429,75
<b>Desvio Padrão</b>	17,78	33,71				26,85
<b>Mediana</b>	179,00	318,00				437,50

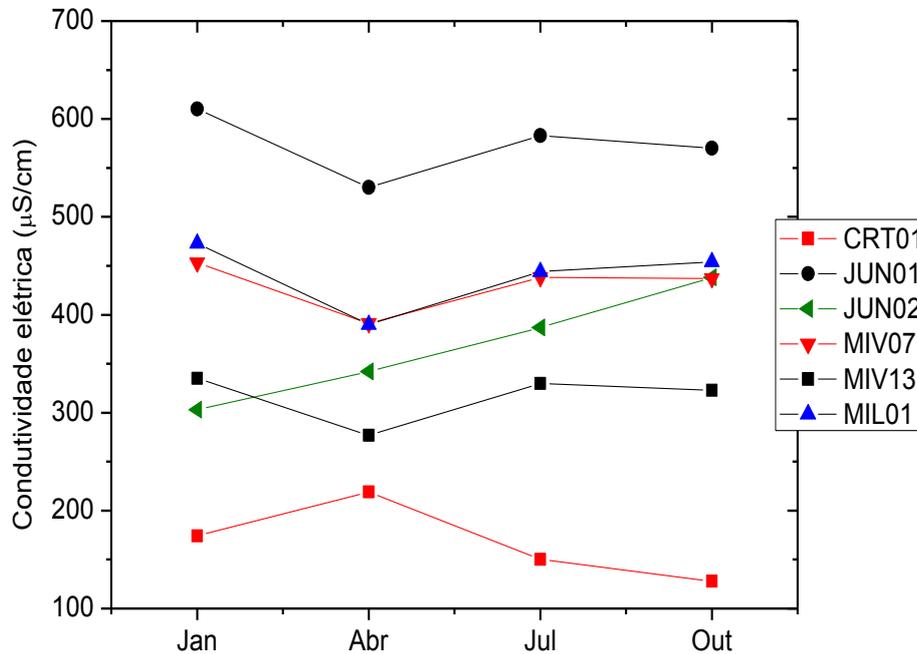
A condutividade elétrica média dos poços de Missão Velha é baixa. Entre todos os poços de Missão Velha o poço MIV0003 apresentou os menores valores de condutividade elétrica e seu valor médio foi de  $177,75 \pm 17,78 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Os poços MIV0001, MIV0002, MIV0004 e MIV0013 apresentaram um valor médio de condutividade elétrica de  $322,79 \pm 33,71 \mu\text{S}/\text{cm}$  e os valores mais elevados de condutividade elétrica nos poços de Missão Velha foram encontrados no poço MIV0007 com valor médio de  $429,75 \pm 26,85 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Figura 5.11** – Medidas de Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com o tempo em amostras de água subterrânea no município de Missão Velha (MIV)



Nos poços de Missão Velha não houve grandes variações de condutividade elétrica durante o período das quatro coletas; seus valores são praticamente constantes para cada poço. A condutividade elétrica dos seis poços não atingiram  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Em todos os poços de Missão Velha a recarga dos aquíferos foi observada com a diminuição da condutividade no período chuvoso. O poço MIV0007 apresenta o maior valor de condutividade elétrica com o efeito de recarga sendo mais perceptível.

**Figura 5.12** – Condutividade elétrica de águas coletadas em janeiro, abril, julho e outubro de 2011 dos poços com largas faixas de variação de  $\delta^{18}\text{O}$



Comparando as figuras 5.6 e 5.12 observou-se que o isótopo traça mudanças que não são observadas na condutividade elétrica.

### 5.3 Relação $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$

A relação  $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$  das amostras coletadas em janeiro (Figura 5.13), início do período chuvoso, mostra duas retas, a primeira com dados de 36 dos quarenta poços expressa por:

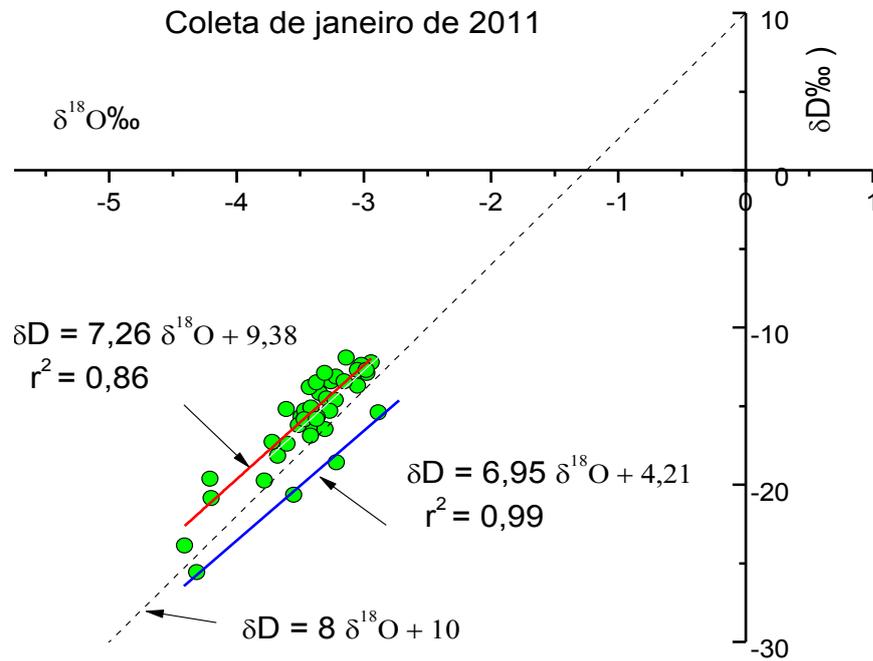
$$\delta\text{D} = 7,26 \delta^{18}\text{O} + 9,38$$

A segunda com dados dos poços (CRT0009, JUN0022, JUN0024 e MIV0013) indica diferente armazenamento em relação aos dados de 33 dos 40 poços. Para estes dados, a reta é:

$$\delta\text{D} = 6,95 \delta^{18}\text{O} + 4,21$$

Esta reta é paralela à Reta Meteorica Mundial – RMM –  $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$  com menor coeficiente angular e menor excesso de deutério indicando leve processo de evaporação, o excesso de deutério, 10 na RMM é  $11,5 \pm 1,6$ .

**Figura 5.13** – Relação  $\delta D - \delta^{18}O$  com amostras da coleta de janeiro de 2011



Pela Figura 5.13, quatro dos 40 poços amostrados apresentam coeficiente angular menor do que 8 (coeficiente angular da reta meteórica obtida por Craig, 1961a) indicando que estes quatro poços foram recarregados com água evaporada em janeiro de 2011 e os 36 poços restantes apresentam coeficiente angular próximo de 8 mostrando que ainda não foram recarregados.

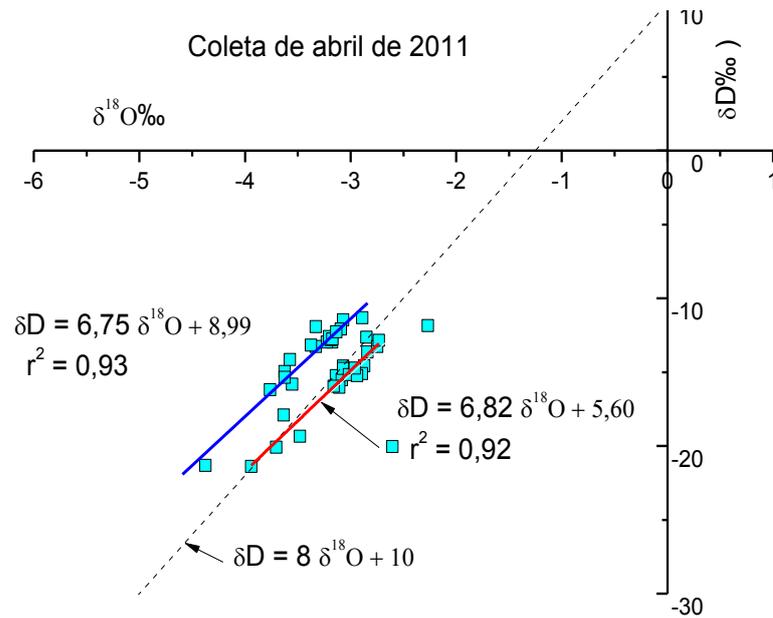
Na coleta de abril, no meio do período chuvoso (Figura 5.14), os dados também se agrupam em duas retas:

$$\delta D = 6,75 \delta^{18}O + 8,99$$

$$\delta D = 6,82 \delta^{18}O + 5,60$$

As duas retas obtidas se mantêm paralelas à RMM com coeficientes angulares menores em relação à reta principal da coleta de janeiro (que envolve 36 dos 40 poços) indicando também leve processo de evaporação nas águas de recarga.

**Figura 5.14** – Relação  $\delta D - \delta^{18}O$  com amostras da coleta de abril de 2011



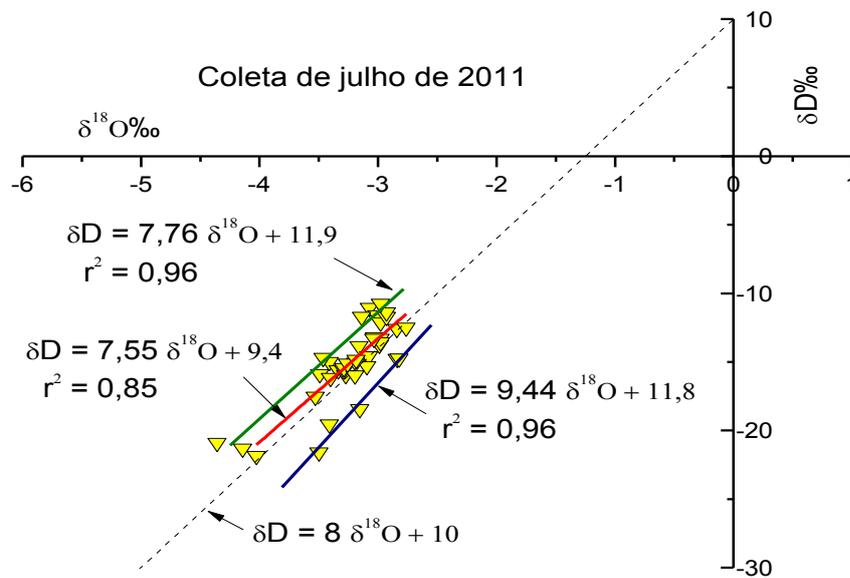
Os dados da coleta de julho, final do período chuvoso (Figura 5.15), se localizam em três retas:

$$\delta D = 7,76 \delta^{18}O + 11,9$$

$$\delta D = 7,55 \delta^{18}O + 9,40$$

$$\delta D = 9,44 \delta^{18}O + 11,6$$

**Figura 5.15** – Relação  $\delta D - \delta^{18}O$  com amostras da coleta de julho de 2011



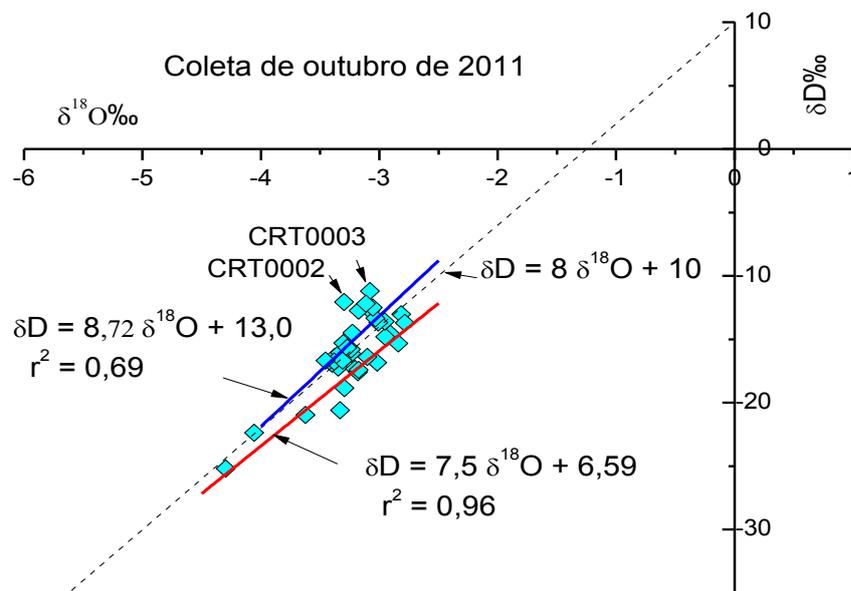
As retas se mantêm paralelas à RMM, mas têm coeficientes angulares e as interseções de duas delas mais altos que com os dados da segunda coleta. Na coleta de julho os dados mostram que os últimos poços estão sendo recarregados e com alguns deles já carregados completamente.

Os dados da coleta de outubro, no meio do período seco (Figura 5.16), se localizam em suas retas:

$$\delta D = 8,72 \delta^{18}O + 13,0$$

$$\delta D = 7,50 \delta^{18}O + 6,59$$

**Figura 5.16** – Relação  $\delta D - \delta^{18}O$  com amostras da coleta de outubro de 2011

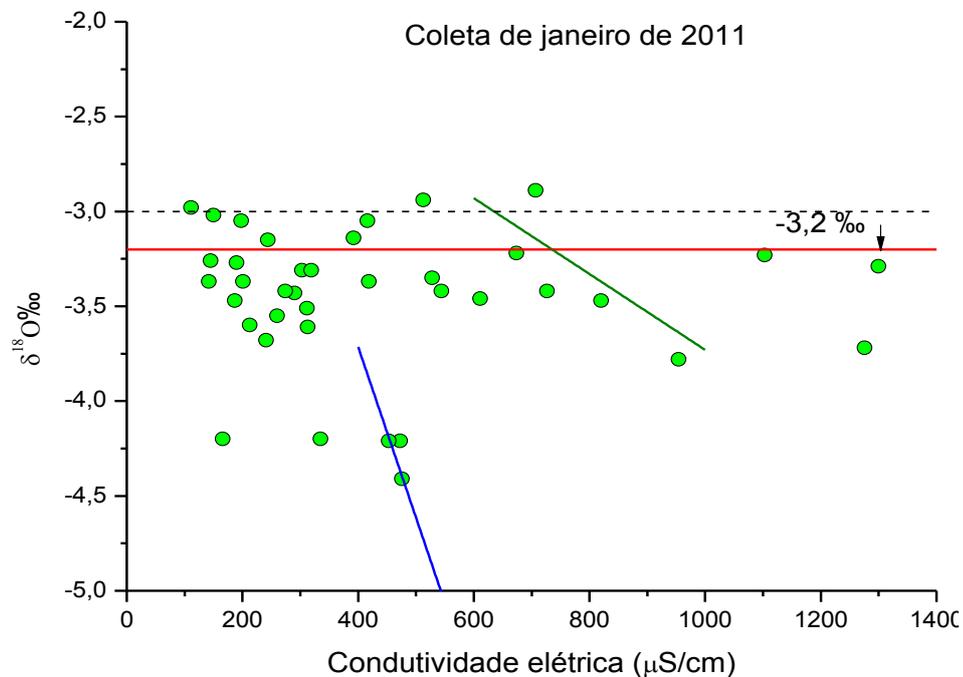


Nesta quarta coleta, os dados continuam se separando em dois conjuntos, com coeficiente angulares das duas retas próximas à RMM mostrando que já não há mais recarga dos aquíferos com água evaporada. Os aquíferos se encontram praticamente recarregados e eles já estão se estabilizando em outubro.

## 5.4 Condutividade elétrica versus $\delta^{18}\text{O}$ ‰

Medidas de condutividade elétrica versus  $\delta^{18}\text{O}$  da coleta de janeiro de 2011 estão apresentadas na Figura 5.17 mostrando três retas características dos aquíferos Rio da Batateira (vermelha), do Missão Velha (azul) e do Mauriti (verde). (Santiago et al. 1997). As águas deste trabalho foram coletadas predominantemente do aquífero Rio da Batateira e do Missão Velha.

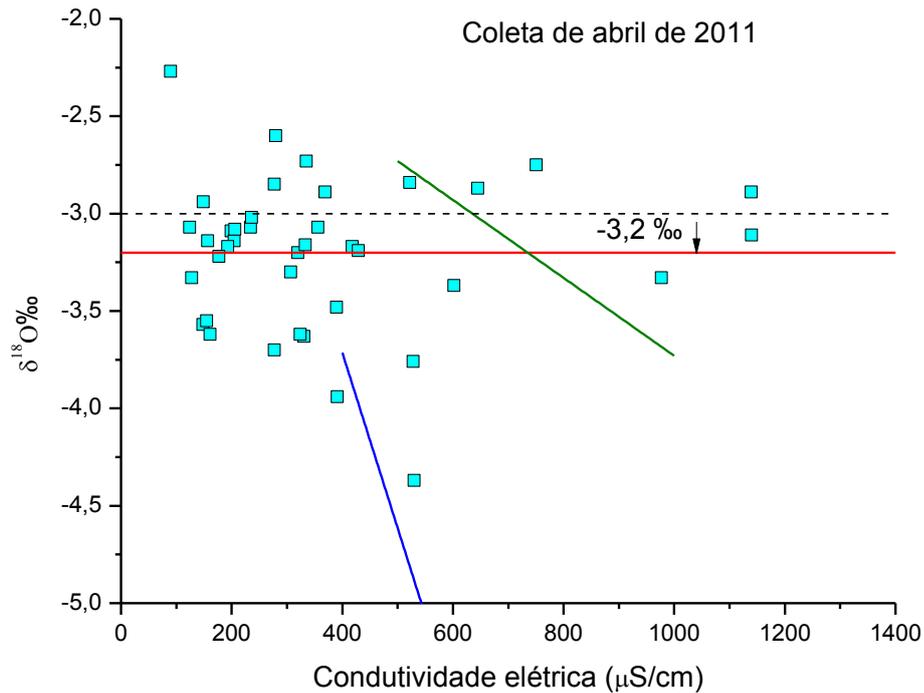
**Figura 5.17** – Relação CE -  $\delta^{18}\text{O}$  com amostras da coleta de janeiro



Pela Figura 5.17 a maioria dos poços amostrados em janeiro está localizada no aquífero Rio da Batateira apresentando um valor médio de  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-3,2$  ‰, que é o valor das concentrações de  $\delta^{18}\text{O}$  de águas das chuvas na região pois o aquífero Rio da Batateira é um aquífero livre. Para efeito de comparação, alguns poucos poços apresentaram valores de  $\delta^{18}\text{O}$  acima de  $-3$  ‰.

Na Figura 5.18 estão medidas de CE versus  $\delta^{18}\text{O}$  nas amostras coletadas no período chuvoso. Em relação às amostras de janeiro mais poços apresentaram valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mais próximos de  $-3,2\text{‰}$ .

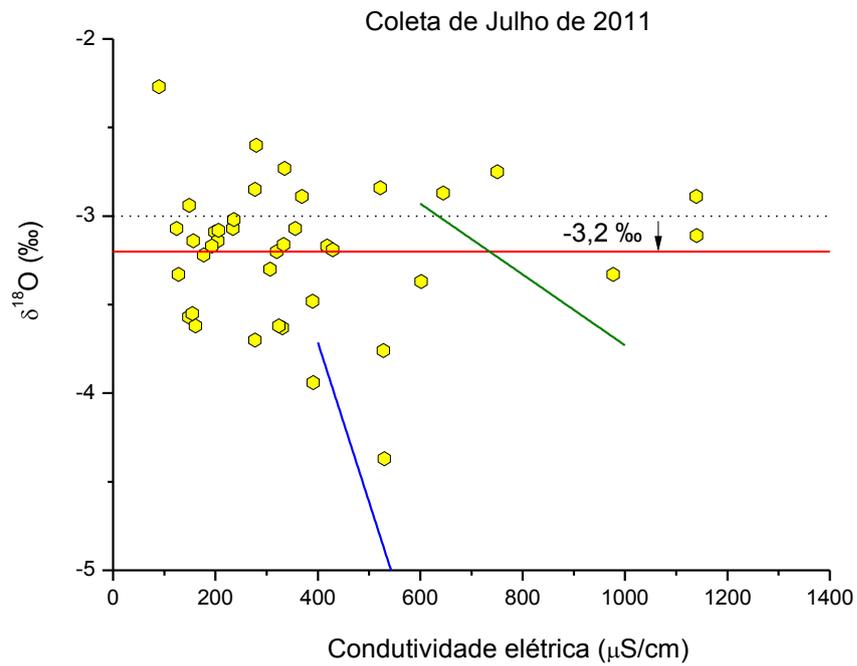
**Figura 5.18** – Relação CE -  $\delta^{18}\text{O}$  com amostras da coleta de abril



Nestes dados aparecem mais poços com valores de  $\delta^{18}\text{O}$  superiores a  $-3\text{‰}$  em comparação à janeiro, ou seja, a faixa de valores nas concentrações de  $\delta^{18}\text{O}$  aumentou caracterizando a recarga dos aquíferos além das grandes flutuações porque há mistura de águas.

Na Figura 5.19 estão medidas de CE versus  $\delta^{18}\text{O}$  nas amostras coletadas julho. Em relação às amostras de abril não houve aumento significativo no número de poços que apresentassem valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mais próximos de  $-3,2\text{‰}$ .

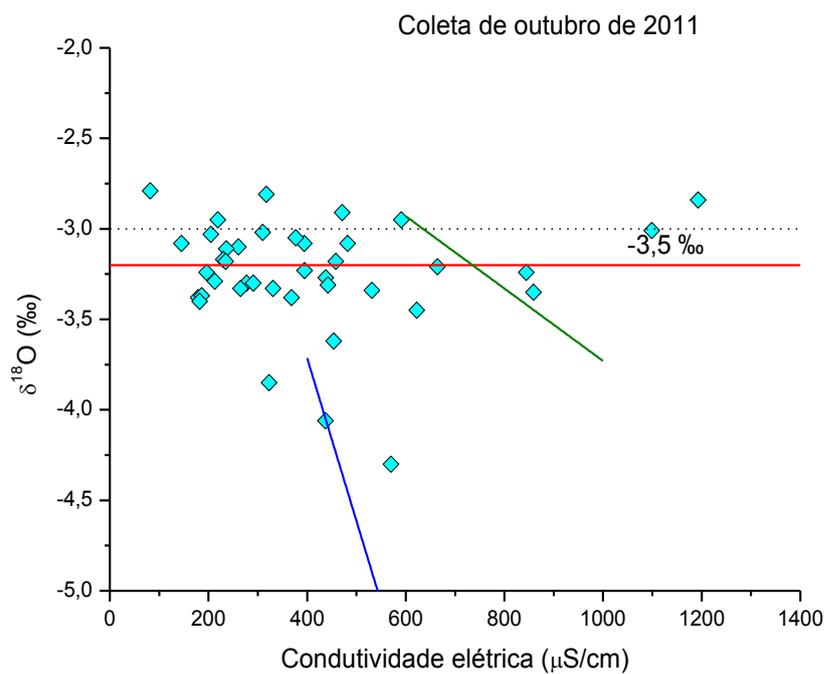
**Figura 5.19** – Relação CE -  $\delta^{18}\text{O}$  com amostras da coleta de julho



As grandes flutuações observadas anteriormente não são tão intensas na coleta de julho, mas alguns poços estão ainda sendo recarregados.

Na Figura 5.20 é mostrada a relação entre condutividade elétrica e  $\delta^{18}\text{O}$  com as amostras coletadas em outubro de 2011.

**Figura 5.20** – Relação CE -  $\delta^{18}\text{O}$  com amostras da coleta de outubro

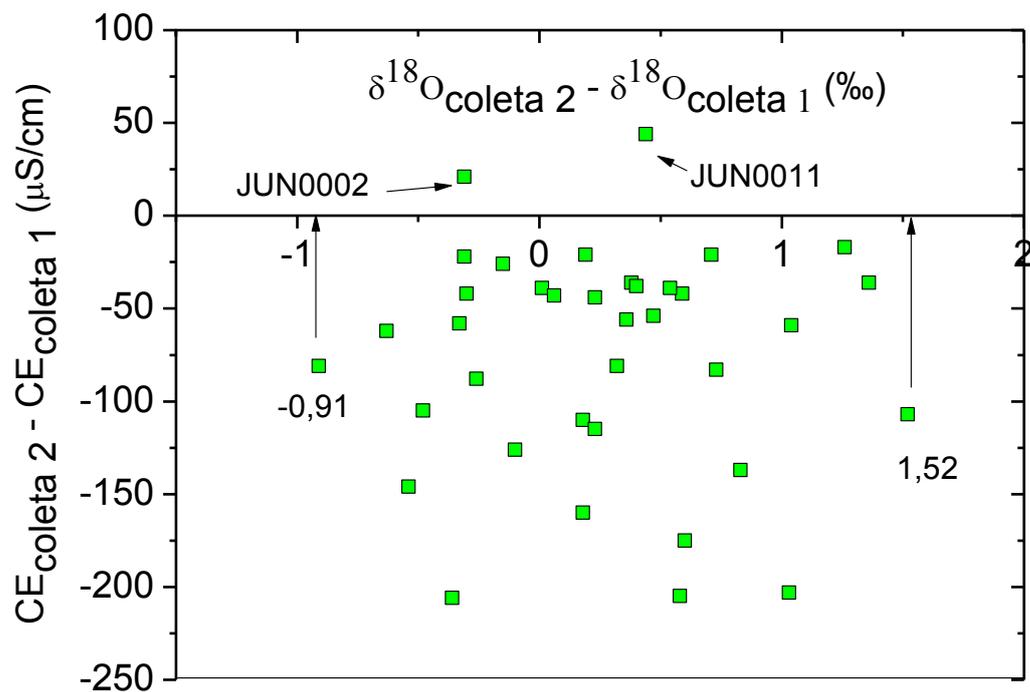


Na Figura 5.20 nota-se que não há grandes flutuações, os poços foram recarregados e os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  tendem a se estabilizar, desta forma, os valores de condutividade elétrica e de  $\delta^{18}\text{O}$  caracterizam em outubro que os aquíferos estão se homogeneizando.

### 5.5 Variação de CE versus variação de $\delta^{18}\text{O}$

A Figura 5.21 mostra a diferença entre a condutividade elétrica nas amostras da coleta de abril, no período chuvoso, e os valores da coleta de janeiro no início do período chuvoso; os valores negativos indicam a chegada de água com menor condutividade elétrica, ou seja, a recarga no período úmido. O gráfico mostra que nos locais dos poços JUN0002 e JUN0011 ainda não havia tido recarga na época da segunda coleta.

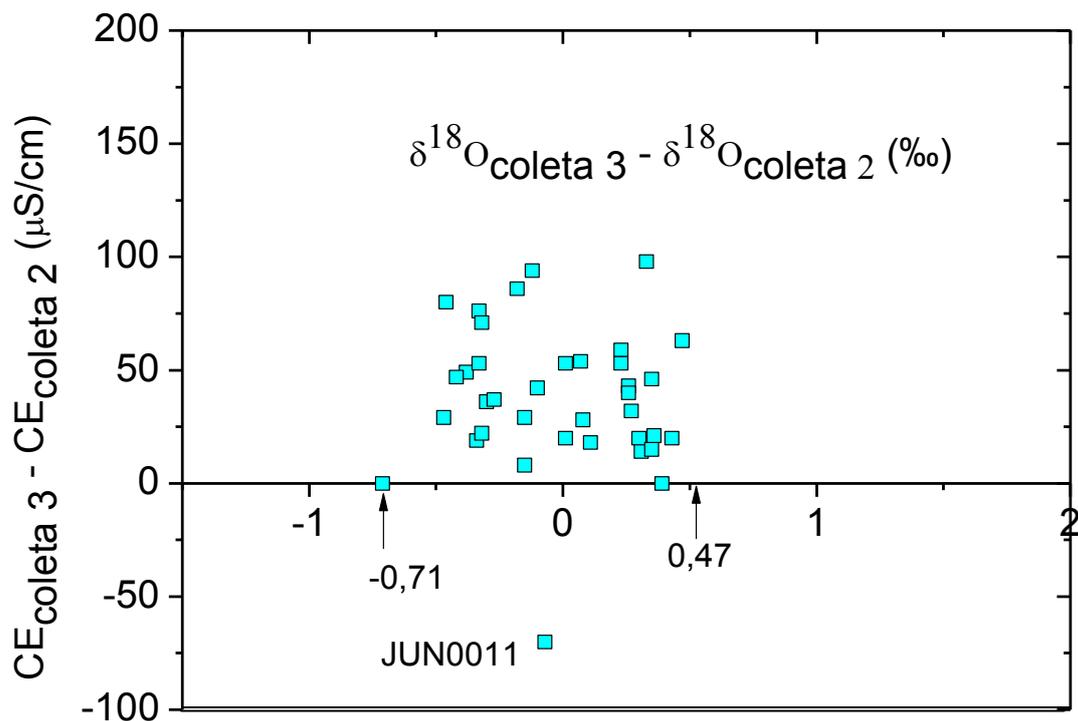
**Figura 5.21** – Diferença de valores de CE e de  $\delta^{18}\text{O}$  entre as coletas de abril e de janeiro



Pela Figura 5.21 observa-se que a faixa de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  no período de janeiro a abril variou entre -0,91‰ a 1,52 ‰ e que os valores ainda estão dispersos devido as misturas de águas.

A Figura 5.22 mostra a diferença entre a condutividade elétrica nas amostras da coleta de julho e os valores da coleta de abril. No período de abril a julho de 2011 o único poço que foi recarregado foi o poço JUN0001 que ainda não havia sido recarregado no período anterior.

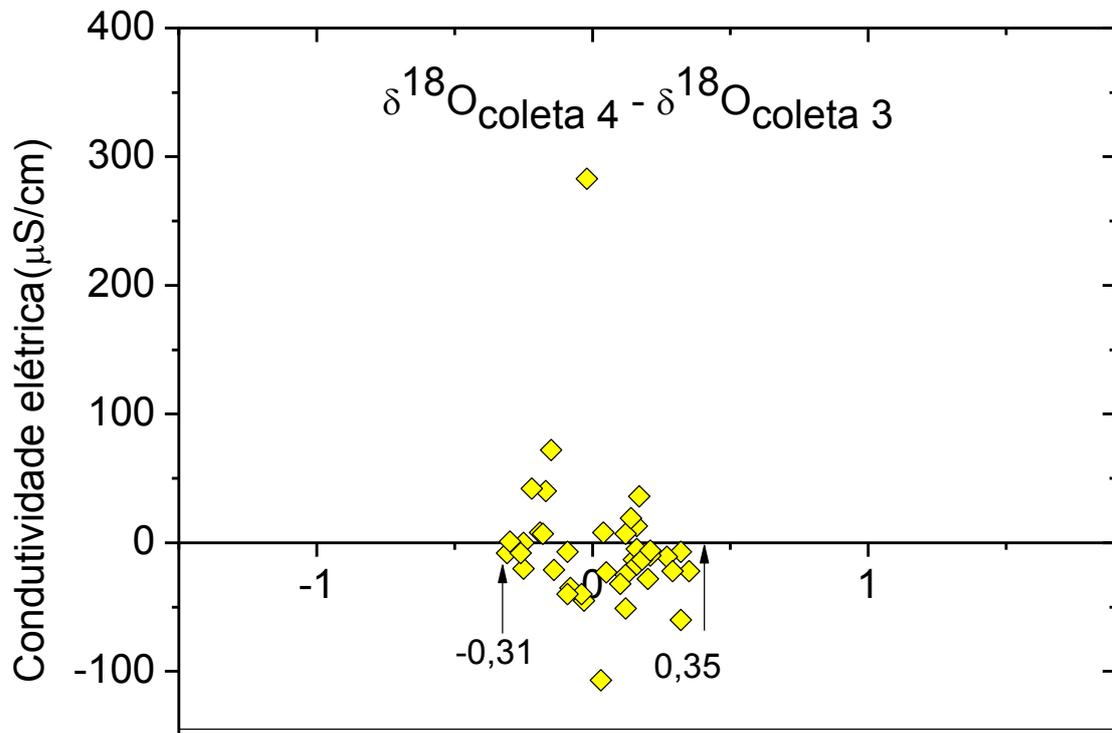
**Figura 5.22** – Diferença de valores de CE e de  $\delta^{18}\text{O}$  entre as coletas de julho e de abril



A faixa de valores para as concentrações de  $\delta^{18}\text{O}$  no período de abril a julho diminuiu variando de -0,71‰ a 0,47‰. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  no período estão menos disperso que no período de janeiro a abril, os poços estão recarregados e se uniformizando.

A Figura 5.23 mostra a diferença entre a condutividade elétrica nas amostras da coleta de outubro e os valores da coleta de julho.

**Figura 5.23** – Diferença de valores de CE e de  $\delta^{18}\text{O}$  entre as coletas de outubro e de julho



Neste período todos os poços já foram recarregados, as flutuações são pequenas e as variações nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  diminuíram no período oscilando entre -0,31 ‰ e 0,35 ‰, mostrando a estabilidade dos aquíferos após a recarga.

## 6. CONCLUSÕES

A água subterrânea mantém as características isotópicas das águas de recarga, que dependem das chuvas locais e de processo de evaporação da umidade do solo na área de recarga que se mistura com as chuvas no processo de recarga.

Na extensa área dos poços amostrados, a camada não saturada do solo não tem as mesmas características, como tipo e profundidade, variando as características isotópicas da recarga e, portanto, das águas subterrâneas embora predominando na faixa de valores das chuvas locais.

Esta heterogeneidade da camada semiúmida é responsável pela existência de retas  $\delta D - \delta^{18}O$  nas águas subterrâneas serem paralelas à RMM com predominância de coeficiente angular menor do que 8 caracterizando o efeito de evaporação durante a precipitação das chuvas e evaporação da umidade do solo, produzidas pelas condições climáticas de região semiárida.

A mistura de águas recentes com paleoáguas, identificada em trabalhos anteriores na área, foi observada em alguns poços; como predominam águas de composição isotópica das águas recentes e no período chuvoso houve recarga em todos os locais dos poços amostrados (com exceção de dois), somente nestes poços.

Portanto, as pequenas variações isotópicas ocorridas durante o período de amostragem com valores das chuvas atuais na região, reforçam a inexistência de mistura com paleoáguas na quase totalidade das águas exploradas.

A larga faixa de salinidade das águas, expressa pela condutividade elétrica é explicada, pelos processos geoquímicos da água com as rochas armazenadoras, ou seja, do aquífero. Como a Bacia Sedimentar do Araripe por seu intenso tectonismo apresenta uma sequência de horsts e grabens deslocando as camadas aquíferas, e as faixas de salinidades; estas estruturas explicam porque as faixas de salinidade não são exatamente as mesmas.

Três faixas de salinidades são observadas identificando diferentes sistemas aquíferos, o Rio da Batateira, o Missão Velha e o Mauriti, que são explorados em poços de diferentes municípios. As águas amostradas nos poços CRT0013 e o BJS0001 são as de mais elevada salinidade (1139 a 1577  $\mu S/cm$ ).

Em todos os municípios com mais de um poço amostrado, as águas são armazenadas em dois sistemas aquíferos com diferentes faixas de salinidade.

## REFERÊNCIAS

- ALLISON, G.B. The relationships between  $^{18}\text{O}$  and deuterium in water in sand columns undergoing evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 55, p. 163-169. 1982.
- ALLISON, G.B.; BARNES, C.J.; HUGHES, M.W.; LEANEY, F.W.J. Effect of climate and vegetation on oxygen-18 and deuterium profiles in soils. *In: ISOTOPE HYDROLOGY, IAEA SYMPOSIUM 270.*, 1983, Vienna. **Anais...** Vienna, 1983. p. 105-123.
- CARNEIRO, C.E.C.D.; SANTIAGO, M.M.F.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J.; FOSTER, M. Oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica para caracterização da água subterrânea no Vale do Gurguéia. *In: CONGRESSO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10.*, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1998. v. 2, 95-114.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 2012. **Serviços técnicos** referentes a 10 (dez) campanhas de coletas e análises hidroquímicas, bacteriológicas, agrotóxicos, BTEX, metais pesados e isótopos dos aquíferos das Bacias, Potiguar [06 (seis) campanhas] e Araripe [04 (quatro)], no Estado do Ceará. Em andamento.
- COSTA FILHO, W.D.; SANTIAGO, M.M.F.; COSTA, W.D.; MENDES FILHO, J. Isótopos estáveis e a qualidade das águas subterrâneas na Planície do Recife. *In: X CONGRESSO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.* 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1998. v. 2, p. 232-240.
- CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. **Science**, New York, v.133, p. 1702 – 1703. 1961a.
- CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, New York, v.133, p.1833-1834. 1961b.
- CRAIG, H. & GORDON, L. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines. **Science**, v.154, p. 1544 – 1547. 1966.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Hidrogeologia da Porção Oriental da Bacia sedimentar do Araripe. *In: Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semiárida do Nordeste do Brasil.* **Anais...** 2007. 128 p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil 2008. Hidrogeologia da Porção Oriental da Bacia Sedimentar do Araripe. *In: Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semiárida do Nordeste do Brasil.* **Anais...** 2008.
- DANSGAARD, W. The isotopic composition of natural waters. **Meddelsers on Groenland Bd**, v. 165, p. 1-20. 1961.
- DANSGAARD, W. Stables isotopes in precipitation. **Tellus**, [S.I.], v. 16, n. 4, p. 136. 1964.
- DANSGAARD, W. & TAUBER, H. Glaciers oxygen-18 content and Pleistocene ocean temperatures. **Science**. v. 166, p. 499. 1969.

FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M.M.F. e BRASIL, R. Aspectos Hídricos do Cariri. *In: SIMPÓSIO SOBRE A BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE*, 1990, Crato. **Anais...** Crato: Ed. DNPM, 2009. p. 99-110.

GAT, J.R.; MAZOR E.; MERCADO, A. Potential Applications of isotope and Geochemical Techniques to the Hydrological Problems of North-Eastern Brazil. **Relatório de Atividades 1968**. Apresentado à Comissão Nacional de energia Nuclear e à Sudene. 23p. 1968.

GRANJEIRO, M.L.; SANTIAGO, M.M.F.; SILVA, C.M.S.V.; MENDES FILHO, J.; FRISCHKORN, H.; VERÍSSIMO, L. S. Caracterização isotópica e hidroquímica das águas subterrâneas da bacia sedimentar Lavras da Mangabeira, Ceará. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2007.

JOUZEL, J. Isotopes in cloud physics: multistep and multistage process. *In: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, v.2. Amsterdam: Elsevier, 1996, p. 61-112.

MAZOR, E. **Applied chemical and isotopic groundwater hidrology**. New York: Halsted Press, 1991.

MENDONÇA, L.A; FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M.F. e MENDES FILHO, J. Estudo da conexão hidráulica dos aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha por análise isotópica e de condutividade elétrica. *In: SIMPÓSIO SOBRE A BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE*, 2., 1997. Crato **Anais...** Crato, 1997, p. 9.

MERLIVAT, L.; BOTTER, R.; NIEF, G. Fractionment Isotopique au Cours de la Destillation de L'eau. **Journal de Chimie Physique**, Paris, v. 60, p. 56-59. 1963.

MERLIVAT, L. Problèmes Lirs à L'étude Quantitative de Bilans de Lacs à L'aide des Concentrations em Deuterium et Oxygen – 18. **Dans l'eau**. Rapport CEA Conf. n. 1538. 1970.

MONT'ALVERNE et al. **Projeto Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Programa Nacional de Estudos dos Distritos Mineiros 1996**. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, Distritos Regionais Pernambuco e Ceará. Recife, 101 p. 1996.

NASCIMENTO, S.A.M.; BARBOZA, J.S.F. Origem da Água Subterrânea do Alto Cristalino de Salvador, Bahia. **Revista de Geologia**, v. 22, p. 86-95. 2009.

PEREIRA, E.R.S.; CRUZ, M.J.M.; COSTA, A.B. Aspectos da composição isotópicas das águas subterrâneas da Ilha de Itaparica, Bahia, Brasil. **Cadernos de Geociências**, v. 7, p. 88-92. 2010.

PEREIRA, L.; SANTIAGO, M.M.F.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J.C. de; MENDES FILHO, J.; ZUCCHI, M.R.; FONTES, A.S. Evaporação das águas superficiais e subterrâneas na Bacia da Gameleira, Município de Aiuaba/CE. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2007.

PEREIRA, L.; SANTIAGO, M.M.F.; MENDONÇA, L.A.R.; FRISCHKORN, H.; LIMA, J.O.G. de; MENDES FILHO, J. Medidas hidroquímicas e isotópicas em águas subterrâneas que abastecem o município de São Luis – Maranhão. **Rev. Águas Subterrâneas**, v. 18, p. 103-119. 2004.

PEREIRA, L.; SANTIAGO, M.M.F.; MENDONÇA, L.A.R.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J. Caracterização isotópica das águas subterrâneas da Ilha de São Luís/MA-Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABAS, 2002.

PLATA, A.; SANCHEZ, W.; SZULAK, C. Estudo dos Aquíferos das Bacias dos rios Gurguéia e Fidalgo, Estado do Piauí, utilizando isótopos ambientais. **Publicação I.E.A.** N° 315. 1973.

PONTE, F. C.; APPI, C. J. Proposta de Revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36., 1990, Natal. **Anais...** Natal, 1990.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L; GONFIANTINI, R. Isotopic patterns in modern global precipitation. 1993. *In*: SWART, P.K. et al. (Ed.). **Climate change in continental isotopic records**. Washington, D.C.; American Geophysical Union: 1-36. (Geophysical Monograph Series, 78).

SANTIAGO, M.F.; H. FRISCHKORN; SILVA, C.M.V.; SEREJO, A.N.; MENDES FILHO, J. Groundwater Resources in the Araripe Plateau and the Cariri Basin. 1995. *In*: Isotope Hydrology Investigations in Latin America. 1994. IAEA, Viena. IAEA-TECDOC-835: 43-56.

SANTIAGO, M.F.; SILVA, C. M. S.; MENDES FILHO, J. FRISCHKORN, H. Characterization of groundwater in the Cariri (Ceará/Brazil) by environmental isotopes and electric conductivity. **Radiocarbon**, v. 39, n. 1, p. 49-60, 1997.

SANTIAGO, M.M.F.; SILVA, C.M.S.V.; FRISCHKORN, H.; TEIXEIRA, Z.A.; MENDES FILHO, J. Oxigênio-18 e deutério nas águas dos Aquíferos Jandaíra e Açú no Ceará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS, 16., 2010, São Luís. **Anais...** São Luís: ABAS, 2010.

SILVA, C.M.S.V.; SANTIAGO, M.M.F.; VASCONCELOS, M.B.; DEMÉTRIO, J.G.A.; FEITOSA, F.A.C. 2004. Medidas de oxigênio-18 usadas para identificar conexão entre água superficial e água subterrânea. *In*: CONGRESSO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004. **Anais...** 2004.

SILVA, C.M.V.S.; SANTIAGO, M.M.F.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J.; VERÍSSIMO, L.S. 2006. Isótopos ambientais como identificadores de Aquíferos explorados na Bacia Sedimentar do Cariri. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2006. **Anais...** 2006.

SILVA, R.B. da. **Estudo hidroquímico e isotópico das Águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. 110f. Tese. (Doutorado em Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1983.

SILVEIRA, C.S.; SILVA JÚNIOR, G.C. da. O Uso de Isótopos Ambientais em Estudos Hidrogeológicos no Brasil: Uma Resenha Crítica. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, 25., p. 25-43. 2002.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – Diagnóstico (v. 1); Estudos de Base I (v. 2); Estudos de Base II (v. 3); planejamento (v. 4)**. Fortaleza, 1992.

SUASSUNA J. **O processo de salinização das águas superficiais e subterrâneas no Nordeste**. Disponível em: <<http://www.fundaj.gov.br/docs/tropico/desat/orig2.html>>. Acesso em: jul. 2007.

VILLAR, H.P.; LIMA, R.A.; ANTONINO, A.C.D.; MENEZES, M.O.A.; LIRA, C.A.B.O.; VIANNA, A.A.G.; BANDEIRA, J.V. A Aplicação de Técnicas Isotópicas ao Estudo de Fugas na Barragem de Tapacurá, Pernambuco. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 143-147. 2001.