

**MODELO FENOMENOLÓGICO PARA A CIRCULAÇÃO DE ÁGUA  
NA BACIA SEDIMENTAR DO CARIRI COM BASE EM  
ISÓTOPOS E HIDROQUÍMICA**

Carla Maria Salgado Vidal Silva

**ORIENTADORA: Maria Marlúcia Freitas Santiago**

TESE SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA, COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

FORTALEZA - OUTUBRO/1996

MODELO FENOMENOLÓGICO PARA A CIRCULAÇÃO DE ÁGUA  
NA BACIA SEDIMENTAR DO CARIRI COM BASE EM  
ISÓTOPOS E HIDROQUÍMICA

Carla Maria Salgado Vidal Silva

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará,  
como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor.

Comissão Julgadora:

---

Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago (UFC)  
-orientadora-

---

Dr. Josué Mendes Filho (UFC)

---

Dr. João Lucas Marques Barbosa (UFC-FUNCAP)

---

Dr. Aldo da Cunha Rebouças (USP)

---

Dr. Spero Penha Morato (IPEN -SP)

*Aos meus pais, Alfredo e Germana, e  
às minhas irmãs, Mirna e Lorna.*

*Os rios não nascem no mar  
e no seu percurso  
drenam, evaporam, escoam, se misturam e seguem em frente.*

## AGRADECIMENTOS

À Prof. Maria Marlúcia Freitas Santiago, minha orientadora, pelos ensinamentos e valiosas discussões durante toda a minha vida profissional, pela dedicação, paciência e pelo carinho e amizade que sempre me dedicou.

Ao Prof. Josué Mendes Filho, meu incentivador, pelas valiosas discussões no decorrer deste trabalho, pelo entusiasmo constante e pela agradável convivência e amizade de sempre.

Ao Prof. Horst Frischkorn, pelas horas de trabalho em conjunto e discussões.

À técnica Maria do Carmo Germano, pelas análises de carbono-14, pela presteza e amizade a mim concedida.

À HYDROISOTOP, na pessoa do Dr. Markus Forster, pelas análises de oxigênio-18, deutério e carbono-13 e ao Dr. Markus Forster pelo tempo dedicado a mim e pelas discussões no Laboratório durante o meu estágio na HYDROISOTOP.

Ao Departamento de Solos da UFC, na pessoa da Dra. Inácia, pelas análises químicas e pela atenção que sempre nos dedicou.

Ao Prof. Franquiberto Pessoa dos Santos, pelas valiosas discussões dos métodos fatoriais e pelo carinho com que sempre me tratou.

Ao DNPM-PE, nas pessoas dos Drs. Alarico Antônio Frota Mont'Alverne, José Robison Alcoforado Dantas, Alípio Agra Lima, Waldir Duarte Costa, José Betimar Melo Figueira, Antônio Honório Melo Jr., Sérgio Amaral e Carlos Fernando Lopes, pelas proveitosas discussões no campo e pelos dados geológicos fornecidos.

Ao Jeanlex Soares de Sousa, Antônio Themóteo Varela e Newton Martins Barbosa Neto, pela ajuda na confecção dos desenhos.

Ao Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire, pela revisão do texto e por todos os anos de convivência e amizade.

À Dra. Ana Helena Moreira, pela ajuda no texto da metodologia da parte de química e pela grande amizade e companheirismo a mim concedidos.

Ao Dr. Spero Penha Morato, pelas facilidades na aquisição de materiais estratégicos e pela atenção que sempre me dedicou.

Ao Fernando Antonio Carneiro Feitosa, pela revisão final referente a parte de Geologia e pelo apoio concedido a mim no período final da tese.

Ao Departamento de Física da UFC, pelo apoio logístico.

Aos professores do Departamento de Física, que participaram direta e indiretamente da realização deste trabalho.

A todos os amigos que estiveram presentes nos momentos de alegria e de tristeza, com o apoio tão necessário nos momentos difíceis.

À todos da Pós-Graduação e Secretaria, pela presteza.

À prefeitura de Juazeiro do Norte, na pessoa do Dr. Manoel Salviano, pela hospitalidade e por parte do financiamento nas viagens de campo.

Ao Dr. Francisco Hélio Germano, da URCA, pelo apoio logístico e pela dedicação que sempre intermediou nossos interesses na região do Cariri.

Ao escritório regional da CAGECE em Juazeiro do Norte, na pessoa do Dr. Expedito Galba, pelo apoio recebido.

À Pró-Reitoria de Extensão, pelo transporte, em parte das viagens, essencial ao trabalho de campo.

Ao Prof. Rogério Wayne Brasil da URCA, pela atenção e participação no trabalho de campo.

À FUNCEME/SRH, na pessoa do Dr. Francisco Lopes Viana, pelo apoio a esse trabalho.

À FUNCAP, na pessoa do Dr. João Lucas Marques Barbosa, pela confiança e atenção que sempre nos dedicou.

À UFC, ao CNPq, e à CAPES pelo apoio financeiro.

---

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na região do Cariri, no sul do Estado do Ceará, que tem a maior e mais importante reserva de água subterrânea do Estado. É composta de um planalto, a Chapada do Araripe, e de um vale, o Vale do Cariri. A importância do estudo dessas reservas subterrâneas está no fato de que o abastecimento doméstico, agrícola, pastoril e industrial é quase que exclusivamente feito por estas águas. O objetivo deste trabalho foi estudar a dinâmica dessas águas utilizando medidas isotópicas de carbono-14, carbono-13, oxigênio-18, trítio e deutério, medidas químicas dos íons mais abundantes e condutividade elétrica e perfis geológicos. Com esse conjunto de dados elaboramos um modelo fenomenológico da circulação de água em toda a Bacia Sedimentar do Cariri que permitiu, na Chapada, identificar três tipos distintos de exutórios, que são fontes nos contatos das formações aquíferas e percolação para as formações mais profundas, e, no Vale, identificar a recarga dos aquíferos profundos através de infiltração local das águas pluviais nas áreas de recarga e por percolação pela Chapada do Araripe. Identificamos também recarga direta do aquífero mais profundo em áreas de intenso tectonismo como no "horst" do Mauriti e constatamos a importante contribuição dos aluviões para alimentação dos aquíferos livres. O uso de técnicas estatísticas fatoriais mostrou que os dados escolhidos como representativos de cada armazenamento são bem aferidos.

---

## ABSTRACT

The study area of this thesis is the Cariri region, in the south of Ceará State. It has the most important underground water resources of the State and comprises a plateau, the Araripe Plateau, and a sedimentary basin on its northern foot, the Cariri Valley. The importance of the study is found in the fact that irrigation, industrial and domestic water supply depend totally on these groundwaters. The main objective of this thesis is to study the dynamics of these waters with the help of environmental isotopes (carbon-14, carbon-13, oxygen-18, tritium, and deuterium), chemical analyses of the major ions, the electric conductivity and in the interpretation of geologic profiles. Through a synoptic vision of these data we design a conceptual hydrogeologic model for the underground waters of the Cariri. Waters from the Plateau discharges partly from springs at the interfaces of aquifer/aquiclude formations and in part percolate through the Santana Formation forming, that way, a contribution to the recharge of the Cariri Valley aquifers. In the Valley local recharge even of the deep aquifers can be identified in areas of strong tectonic features like the horst of Mauriti. Unconfined aquifers receive recharge mainly through alluvial deposits. Factorial statistics confirm that the parameters taken as characteristic are well chosen.

---

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE QUADROS .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. ÁREA .....	05
2.1. Aspectos fisiográficos .....	05
2.2. Unidades estratigráficas .....	08
2.2.1. Formação Mauriti .....	15
2.2.2. Formação Brejo Santo .....	16
2.2.3. Formação Missão Velha .....	17
2.2.4. Formação Abaiara .....	17
2.2.5. Formação Rio da Batateira .....	18
2.2.6. Formação Santana .....	19
2.2.7. Formação Arajara .....	21
2.2.8. Formação Exu .....	22
2.3. Água subterrânea .....	23
2.3.1. Água subterrânea na Chapada do Araripe .....	23
2.3.2. Água subterrânea no Vale do Cariri .....	25
2.4. Trabalhos anteriores .....	28
3. ISÓTOPOS DO CARBONO, OXIGÊNIO E HIDROGÊNIO .....	30
3.1. Isótopos do carbono .....	33

3.1.1. Modelos de correção de idade com $^{14}\text{C}$ .....	39
3.1.1.1. Modelo de Pearson .....	39
3.1.1.2. Modelo de Tamers .....	40
3.1.1.3. Modelo de Cheng .....	41
3.2. Deutério e oxigênio-18 .....	43
3.2.1. Correlação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ (reta meteórica) .....	44
3.2.2. Aplicações de $^{18}\text{O}$ e $^2\text{H}$ .....	44
3.3. Trítio .....	48
4. METODOLOGIA .....	50
4.1. Análise de trítio .....	50
4.1.1. Sistema de detecção (cintilação líquida) .....	53
4.2. Análise de Carbono-14 .....	55
4.2.1. Sistema de detecção (contador proporcional) .....	58
4.3. Análise de Deutério, oxigênio-18 e carbono-13 .....	60
4.4. Medidas Químicas .....	61
4.4.1. Cálculo do índice de saturação de calcita (SIC) .....	62
5. ANÁLISE ESTATÍSTICA FATORIAL.....	66
5.1. Análise geral .....	67
5.2. Análise fatorial de componentes principais .....	73
5.3. Análise fatorial das correspondências .....	73
5.4. Análise fatorial discriminante .....	78
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	85
6.1. Água subterrânea na Chapada do Araripe .....	85
6.1.1. Hidroquímica das fontes na Chapada do Araripe .....	89

6.2. Água subterrânea no Vale do Cariri .....	90
6.2.1. Água nos aluviões .....	99
6.2.2. Correlação $\delta^2\text{H}$ x $\delta^{18}\text{O}$ .....	102
6.2.3. Hidroquímica dos poços no Vale do Cariri .....	105
6.2.4. Carbono-13 .....	108
6.3. Análise fatorial .....	114
6.3.1. Análise fatorial das correspondências .....	114
6.3.2. Análise fatorial discriminante .....	117
6.4. Modelo fenomenológico .....	120
6.4.1. Água subterrânea na Chapada do Araripe .....	122
6.4.2. Água subterrânea no Vale do Cariri .....	124
7. CONCLUSÕES .....	126
8. REFERÊNCIAS .....	128
ANEXO I - Perfis construtivos e litológicos dos poços .....	143

## LISTA DE FIGURAS

2.1. Localização da área de trabalho .....	05
2.2. Posição da Chapada do Araripe em relação ao Vale do Cariri .....	06
2.3. Estratigrafia da Chapada do Araripe com base na perfuração de dois poços de pesquisa .....	10
2.4. Mapa geológico da Bacia Sedimentar do Cariri .....	12
2.5. Seção geológica esquemática representativa dos cortes AB e CD representados na Figura 2.4 .....	15
3.1. Concentração de $^{14}\text{C}$ na atmosfera no Hemisfério Sul .....	34
3.2. Ciclo natural do carbono, relevante para a datação de águas subterrâneas .....	34
3.3. Correlação entre os valores médios ponderados de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação (reta meteórica) .....	45
3.4. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para águas que sofreram processos de evaporação ....	45
4.1. Esquema geral do sistema de enriquecimento eletrolítico .....	52
4.2. Sistema de detecção (cintilação líquida) .....	54
4.3. Linha de vidro a vácuo .....	57
4.4. Sistema de detecção (contador proporcional) .....	58
6.1. Diagrama de Piper para fontes no Cariri .....	90
6.2a. $\delta^{18}\text{O}$ em função da condutividade elétrica para poços no Grupo 1 .....	96
6.2b. $\delta^{18}\text{O}$ em função da condutividade elétrica para poços no Grupo 2 .....	96
6.2c. $\delta^{18}\text{O}$ em função da condutividade elétrica para poços no Grupo 3 .....	96
6.2d. $\delta^{18}\text{O}$ em função da condutividade elétrica para poços no Grupo 4 .....	96

6.3a. $\delta^{18}\text{O}$ em função da percentagem do carbono moderno para poços no Grupo 1 ..	98
6.3b. $\delta^{18}\text{O}$ em função da percentagem do carbono moderno para poços no Grupo 2 ..	98
6.3c. $\delta^{18}\text{O}$ em função da percentagem do carbono moderno para poços no Grupo 3 ..	98
6.3d. $\delta^{18}\text{O}$ em função da percentagem do carbono moderno para poços no Grupo 4 ..	98
6.4a. Condutividade elétrica em função da percentagem do carbono moderno de poços no município de Crato .....	101
6.4b. Condutividade elétrica em função da percentagem do carbono moderno de poços no município de Juazeiro do Norte .....	101
6.5. Oxigênio-18 em função de deutério para poços na região do Cariri .....	104
6.6. Variação do pMC em função de oxigênio-18 e deutério .....	104
6.7. Diagrama de Piper para poços na região do Cariri .....	108
6.8. Histograma de $\delta^{13}\text{C}$ de poços no Cariri .....	110
6.9. Correlação entre SIC e $\delta^{13}\text{C}$ .....	112
6.10. Fator de correção de Pearson versus fator de correção de Cheng .....	113
6.11. Representação plana da análise das correspondências .....	115
6.12. Representação da análise discriminante em uma dimensão .....	118
6.13. Representação da análise discriminante em duas dimensões .....	120
6.14. Fluxos de água na Chapada do Araripe e no Vale do Cariri .....	121

## LISTA DE TABELAS

2.1. Sequências tectônicas, cronoestratigrafia e litoestratigrafia para as formações na Bacia do Cariri .....	13
2.2. Era geológica, período geológico, idades e fatos importantes associados .....	13
2.3. Litologia da Bacia do Cariri .....	24
6.1. Condutividade elétrica e oxigênio-18 para as fontes de maior vazão na região do Cariri .....	86
6.2. Condutividade elétrica e oxigênio-18 para outras fontes na região do Cariri .....	87
6.3. Trítio em cisternas e fontes na região do Cariri .....	88
6.4. Hidroquímica de fontes no Cariri .....	89
6.5. Trítio em poços na região do Cariri .....	92
6.6. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica para poços no Grupo 1 .....	93
6.7. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica para poços no Grupo 2 .....	93
6.8. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica para poços no Grupo 3 .....	94
6.9. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica para poços no Grupo 4 .....	94
6.10. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica para poços no aluvião dos municípios de Crato e Juazeiro do Norte .....	100
6.11. Deutério, oxigênio-18 e pMC de poços na região do Cariri .....	103
6.12. Hidroquímica de poços no Grupo 1 .....	105

6.13. Hidroquímica de poços no Grupo 2 .....	106
6.14. Hidroquímica de poços no Grupo 3 .....	106
6.15. Hidroquímica de poços no Grupo 4 .....	106
6.16. Hidroquímica de poços no aluvião dos municípios de Crato e Juazeiro do Norte	107
6.17. Carbono-13, fatores de correção de Cheng e Pearson, idades corrigidas de Cheng e Pearson, idade convencional e índice de saturação de cálcio dos 4 grupos .....	109

---

## LISTA DE QUADROS

2.1. Quadro comparativo das colunas estratigráficas propostas para a Bacia Sedimentar do Araripe .....	09
2.2. Parâmetros hidrodinâmicos. Fonte: GASPARY et. al. (1967) .....	26
2.3. Parâmetros hidrodinâmicos. Fonte: FRACALOSSI (1986) .....	27
2.4. Parâmetros hidrodinâmicos. Fonte: MONT'ALVERNE et. al. (1995b) .....	27
6.1. Aferição da classificação dos poços através da análise discriminante em uma dimensão .....	118
6.2. Aferição da classificação dos poços através da análise discriminante em duas dimensões .....	119

## 1 - INTRODUÇÃO

A região do Cariri com uma área de 11.000 km<sup>2</sup>, no sul do Estado do Ceará, apresenta a maior e mais importante reserva de água subterrânea do Estado. Ela é composta de um planalto, a Chapada do Araripe, com área de 7.500 km<sup>2</sup> e com altitude média de 750 m e de um vale no sopé da Chapada, o Vale do Cariri, com uma área de 3.500 km<sup>2</sup> (ANJOS, 1963).

A importância do estudo das reservas de água subterrânea no Cariri está no fato de que os aquíferos da região atendem a uma demanda superior a 30 milhões de m<sup>3</sup>/ano somente para o abastecimento público, sendo a exploração das águas subterrâneas responsável pelo atendimento de 93 % da população urbana da região (RIBEIRO & CAVALCANTE, 1996) e pelo abastecimento agrícola, pastoril e industrial.

A região do Cariri é muito importante economicamente para o Estado do Ceará; a região metropolitana de Fortaleza contribui com cerca de 75 % do PIB, a região do Cariri com cerca de 10 % e o restante do Estado com 15 % do PIB. A região do Cariri possui uma densidade populacional de 83,4 habitantes por km<sup>2</sup>, comparável à densidade populacional do Estado de São Paulo que é de 76,7 habitantes por km<sup>2</sup> (SOUZA, 1979).

O turismo religioso, para homenagear o Padre Cícero no município de Juazeiro do Norte, é intenso e nos períodos de "romaria" a população praticamente dobra, aumentando consideravelmente o consumo de água. Este município é abastecido por 17 poços tubulares profundos, 7 perfurados no aluvião do Riacho dos Macacos e 10 no bairro Lagoa Seca, totalizando um bombeamento de 2.552 m<sup>3</sup>/h (CAGECE, 1988).

Uma das principais culturas da região é a cana-de-açúcar para a produção de álcool e açúcar utilizando intensa irrigação. A maior usina da região, a Usina Manuel Costa Filho em Barbalha, processa 2.500 toneladas de cana por dia. Para esta atividade, o consumo de água na usina é de 200 m<sup>3</sup>/h e na irrigação da cana-de-açúcar é de 400 m<sup>3</sup>/h, totalizando um volume de 600 m<sup>3</sup>/h, o que corresponde a aproximadamente 4 % do consumo de Fortaleza. O abastecimento de água é feito através de baterias de poços particulares.

Em todos os outros municípios o abastecimento é feito através de poços da CAGECE e de poços particulares. Naqueles no sopé da Chapada as fontes contribuem com percentual significativo para o seu abastecimento. É o caso, por exemplo, de Crato onde as fontes são usadas também para a agricultura e completam a bateria de poços do SAAEC.

Assim, em vista da importância da água subterrânea nesta região, este trabalho de tese tem como objetivo estudar a dinâmica dessas águas utilizando medidas isotópicas de carbono-14, oxigênio-18, trício, deutério e carbono-13, medidas químicas dos íons mais abundantes (Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e CO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e condutividade elétrica e seções geológicas.

Com este conjunto de medidas, elaboramos um modelo fenomenológico para a circulação de água em toda a Bacia Sedimentar, tanto na Chapada do Araripe quanto no Vale do Cariri, possibilitando reconhecer tipos distintos de captação de água dos diferentes aquíferos da região que são: Rio da Batateira, Missão Velha e Mauriti, além de distinguir águas provenientes dos aluviões de águas provenientes dos aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte. Vale salientar que o modelo fenomenológico considera as quatro dimensões (espaciais e temporal), diferente das análises pontuais dos perfis dos poços que são feitas instantaneamente sem considerar o tempo.

Através das medidas de carbono-13 evidenciamos que parte da recarga dos aquíferos no Vale ocorre por infiltração local direta das águas pluviais e outra parte pelas infiltrações profundas na Chapada do Araripe.

Usamos também duas técnicas fatoriais, a análise fatorial das correspondências e a análise fatorial discriminante, que são técnicas puramente matemáticas, para comparar os resultados do modelo fenomenológico.

Apesar dos resultados da análise das correspondências refletir os diferentes tipos de armazenamento, este modelo não consegue descrever a complexidade da geologia da área que é marcante em virtude do tectonismo da região. A análise fatorial discriminante concorda em mais de 70 % com a classificação dos poços de acordo com o modelo fenomenológico.

Este tipo de estudo é muito importante para o gerenciamento das águas, uma vez que descreve os diferentes tipos de armazenamento subterrâneo com os seus diferentes graus de mistura e quantifica os tempos envolvidos no processo.

Para facilitar a leitura e a organização das idéias, este trabalho está apresentado em 8 capítulos. O capítulo 1 descreve a importância e o objetivo deste trabalho. O capítulo 2 descreve a área de estudo, onde, em paralelo, é feita uma revisão bibliográfica dos trabalhos realizados na região. O capítulo 3 descreve as propriedades e aplicações dos isótopos do carbono, oxigênio e hidrogênio, que são a ferramenta básica deste trabalho. O capítulo 4 apresenta a metodologia das análises isotópicas e hidroquímicas. O capítulo 5 trata da descrição dos métodos fatoriais, análise fatorial das correspondências e análise fatorial discriminante, que são métodos puramente matemáticos. O capítulo 6 apresenta os resultados experimentais, propõe um modelo fenomenológico para os fluxos subterrâneos na Chapada do Araripe e no Vale do Cariri e também apresenta os resultados obtidos com

os métodos fatoriais. O capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e o capítulo 8 a lista de referências bibliográficas.

---

## 2- ÁREA

### 2.1. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

A Bacia Sedimentar do Cariri, situada entre os meridianos  $38^{\circ}30'$  e  $41^{\circ}55'$  de longitude oeste e  $7^{\circ}10'$  e  $7^{\circ}50'$  de latitude sul, engloba parte dos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí (Figura 2.1). Nesta região estão contidos 28 municípios. Os pontos de coleta deste trabalho se restringiram ao Estado do Ceará, destacando-se os municípios de Crato, Barbalha e Juazeiro do Norte. Predominam na região do Cariri atividades ligadas à agricultura como culturas de feijão, milho, mandioca e cana-de-açúcar, no lado cearense, e atividades de mineração como extração e beneficiamento da gipsita para produção de gesso, no lado pernambucano. É uma região economicamente rica onde o abastecimento doméstico, agrícola, pastoril e industrial é quase que exclusivamente proveniente da água subterrânea.

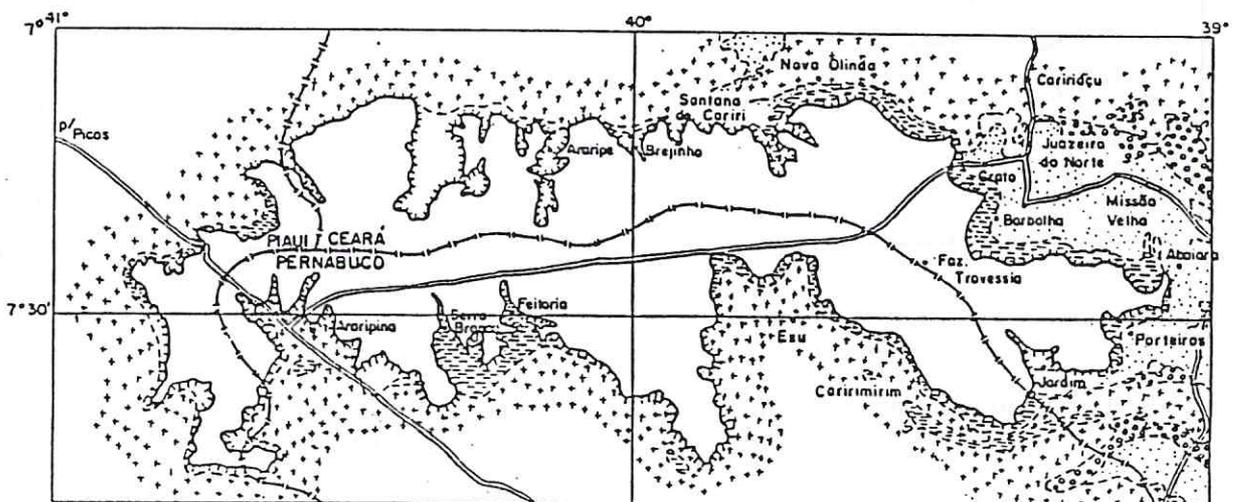


Figura 2.1. Localização da área de trabalho.

A região tem clima semi-árido caracterizado por duas estações distintas; uma chuvosa, ou “inverno”, de janeiro a abril e outra seca, ou “verão”, que perdura no restante do ano. A média anual de precipitação está entre 700 e 1.000 mm, o que supera muitas áreas do Estado do Ceará.

A região do Cariri é constituída geologicamente por uma sequência sedimentar sobreposta ao embasamento cristalino. Morfologicamente estes sedimentos constituem um planalto com uma área de 7.500 km<sup>2</sup> e altitude média de 750 m, a Chapada do Araripe, e uma região rebaixada, com um desnível de 300 m em relação a Chapada, que se estende para leste e conhecida como Vale do Cariri. A posição geográfica da Chapada em relação ao Vale foi determinada utilizando-se métodos geofísicos por RAND & MANSO (1984) e está mostrada na Figura 2.2.

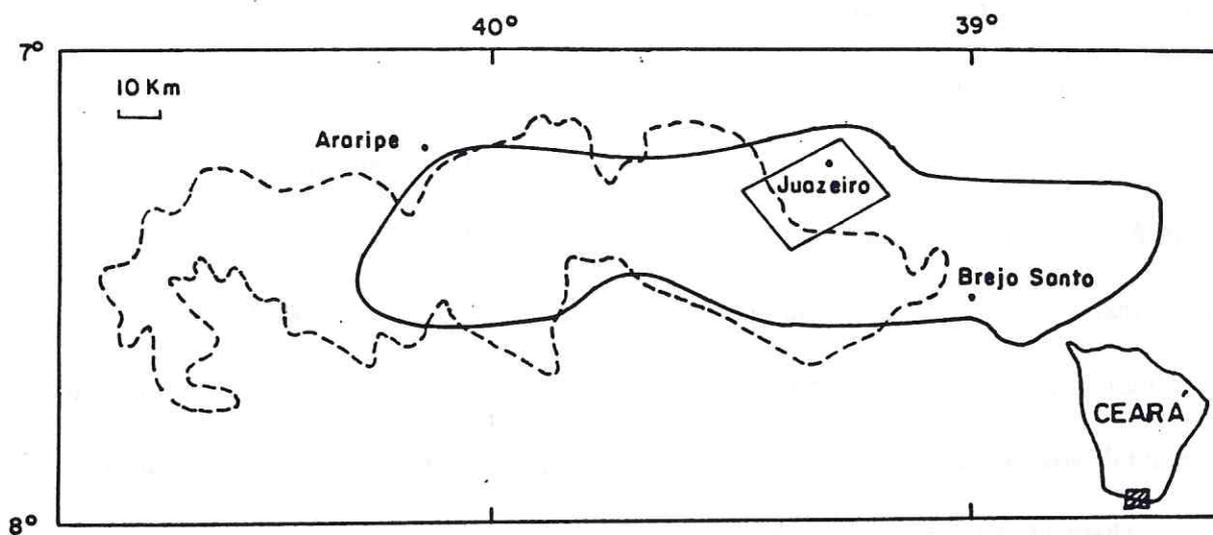


Figura 2.2. Posição da Chapada do Araripe (---) em relação ao Vale do Cariri (—).  
Fonte: RAND & MANSO, 1984.

Fisiograficamente podem ser distinguidas três zonas na região do Cariri (DANTAS & LOPES, 1995): zona de Chapada, zona de Talude e zona de Pediplano, mostrando características peculiares do ponto de vista de litologia, relevo, clima, hidrografia e vegetação.

**Zona de Chapada (Chapada do Araripe):** é constituída de arenitos da Formação Exu e apresenta relevo quase plano. Devido ao solo arenoso, a infiltração é muito rápida. Mesmo poucas horas após chuva intensa, nenhuma acumulação de água na superfície é encontrada. Desta forma, praticamente não existe sistema de drenagem superficial no topo da Chapada devido às características do solo que a recobre. Só existem alguns poços de produção na escarpa da Chapada que estão um na fazenda Janaguba e quatro no Colégio Agrícola, em Crato. Entretanto, devido a presença de camadas de argila na Formação Exu existem aquíferos suspensos que alimentam “cacimbas” que são utilizadas para o abastecimento de pequenas comunidades. Nesta zona, a vegetação nativa é uniforme, densa e de médio a grande porte. Extensas áreas encontram-se cultivadas, destacando-se a lavoura de mandioca utilizada na fabricação de farinha.

**Zona de Talude:** bordeja o sopé da Chapada incluindo as Formações Arajara e Santana. O solo de baixa acidez é espesso, pouco permeável e bastante fértil, desenvolvendo-se nele uma drenagem relativamente densa e ramificada, possuindo essa zona uma vegetação exuberante. Os contatos Exu/Arajara e Arajara/Santana definem um nível de cerca de 120 fontes maiores que aparecem principalmente no desfiladeiro e em outras localizações afetadas pela erosão, onde a resistência para o fluxo d'água é reduzida. As fontes nesta zona são utilizadas para irrigação e abastecimento dos municípios.

**Zona de Pediplano (Vale do Cariri):** constitui uma vasta depressão emoldurada ao sul, pelas falésias escarpadas da Chapada do Araripe e ao norte e nordeste pelos arenitos

siluro-devonianos da Formação Mauriti (PONTE, 1991a). Esta zona engloba as Formações Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha e Brejo Santo, estando este conjunto ora sobre os arenitos da Formação Mauriti ora sobre as rochas do embasamento cristalino.

Os solos podem ter uma composição argilo-síltica-arenosa (Formações Rio da Batateira e Abaiara), arenosa (Formação Missão Velha) e argilosa (Formação Brejo Santo). A vegetação nativa é de caatinga.

Um dos principais cursos d'água que drenam o Vale do Cariri é o Rio da Batateira, afluente do Rio Salgado, cujos riachos tributários são alimentados constantemente pelas fontes da Chapada. A espessura das aluviões destes rios varia entre 2,5 m e 10 m e os municípios da região encontram-se predominantemente às margens dos rios.

## **2.2. UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS**

A estratigrafia da Bacia do Cariri vem sendo proposta e ao longo dos anos as estratigrafias mais simples foram cedendo lugar às estratigrafias mais completas e detalhadas (Quadro 2.1). O registro mais antigo sobre a litoestratigrafia da Bacia do Araripe foi feito por SMALL (1913) que reconheceu uma série sedimentar constituída por quatro seções, denominadas (da base para o topo), de Conglomerado Basal, Arenito Inferior, Calcário de Sant'Anna e Arenito Superior e incluídas no cretáceo, com base nas datações de peixes fósseis feitas por AGASSIZ em 1841 e JORDÁN & BRANNER em 1908. GASPARY & ANJOS (1964) definiram a Chapada do Araripe como sendo composta de duas Formações: do topo para a base, Exu, também denominada Feira Nova por alguns

Quadro 2.1. Quadro comparativo das colunas estratigráficas propostas para a Bacia Sedimentar do Cariri.

	Small 1913	Beurlen 1962	Beurlen 1963	Moraes 1963	Gaspar & Anjos 1964	Braun 1966	Beurlen 1971	Dantas 1974	
Série Araripe	Arenito Superior	Form. Exu	Form. Exu	Form. Arajara	Form. F.Nova	Form. Exu	Form. Exu	Form. Exu	
	Calcário de Sant'anna	Form. Santana	Membro Superior	Form. Santana	Form. Santana	Form. Santana	Form. Santana	Membro Romualdo	Form. Santana
			Membro Gipsífero					Membro Superior	
			Membro Inferior	Form. Crato				Membro Inferior	
	Arenito Inferior	Form. M. Velha	Form. M. Velha	Form. M. Velha	Form. M. Velha	Form. M. Velha	Form. Sergí	Form. M. Velha	Form. Sergí
					Form. B. Santo		Form. Aliança		Form. B. Santo
Conglom. Basal	Form. Cariri	Form. Cariri	Form. Cariri	Form. Mauriti	Form. Mauriti	Form. Tacaratu	Form. Cariri	Form. Tacaratu	

	Moraes et al 1976	Lima 1979	Silva 1983 1986b	Brito Neves 1990	Ponte & Appi 1990	Berthou 1990	Martill & Wilby 1993	
Form. Santana	Form. Exu	Form. Exu	Form. Exu	Form. Exu	Form. Exu F. Arajara	Form. Exu	Form. Exu	
	Facies argilo-siltica e evaporítica	Form. Santana	Form. Santana	Form. Santana	Form. Santana	Membro Romualdo	Membro Romualdo	Form. Santana
			Form. Araripina			Membro Ipubí	Membro Ipubí	Form. Ipubí
						Form. Crato	Membro Crato	Membro Crato
	Facies carbonática	Membro Crato			Form. Rio Batateira			
					Form. Abaiara			
Form. M. Velha	Form. M. Velha	Form. Sergí	Form. M. Velha	Gr. Vale do Cariri	Form. M. Velha	Form. M. Velha	Form. Rio Batateira	
Form. B. Santo		Form. Aliança			Form. B. Santo	Form. B. Santo	Form. M. Velha	
Form. Cariri		Form. Tacaratu	Form. Tacaratu		Form. Mauriti	Form. Mauriti	Form. Cariri	Form. B. Santo
			Form. Iara				Form. Cariri	

Fonte: Adaptada de PONTE e APPI (1990) e MARTILL e WILBY (1993).

autores, e Santana. Logo abaixo da Formação Santana estão as Formações Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti, que compõem o Vale.

PONTE & APPI (1990) identificaram outras Formações na proposta de GASPARY & ANJOS (1964) propondo a seguinte estratigrafia, do topo para a base: Formações Exu, Arajara, Santana, Rio da Batateira, Abaiara (aparecendo somente em alguns pontos), Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti repousando sobre o embasamento cristalino. Esta estratigrafia foi proposta com base na perfuração de dois poços de pesquisa na Chapada, distantes um do outro 15 km, um no município de Araripe-CE com profundidade de 1.498 m (2-AP-1-CE, PETROBRÁS, 1986) e o outro no município de Bodocó-PE com 916 m (4-BO-1-PE, DNPM, 1994); ambos atingiram o embasamento cristalino (Figura 2.3). A estratigrafia de PONTE & APPI (1990) será adotada por nós.

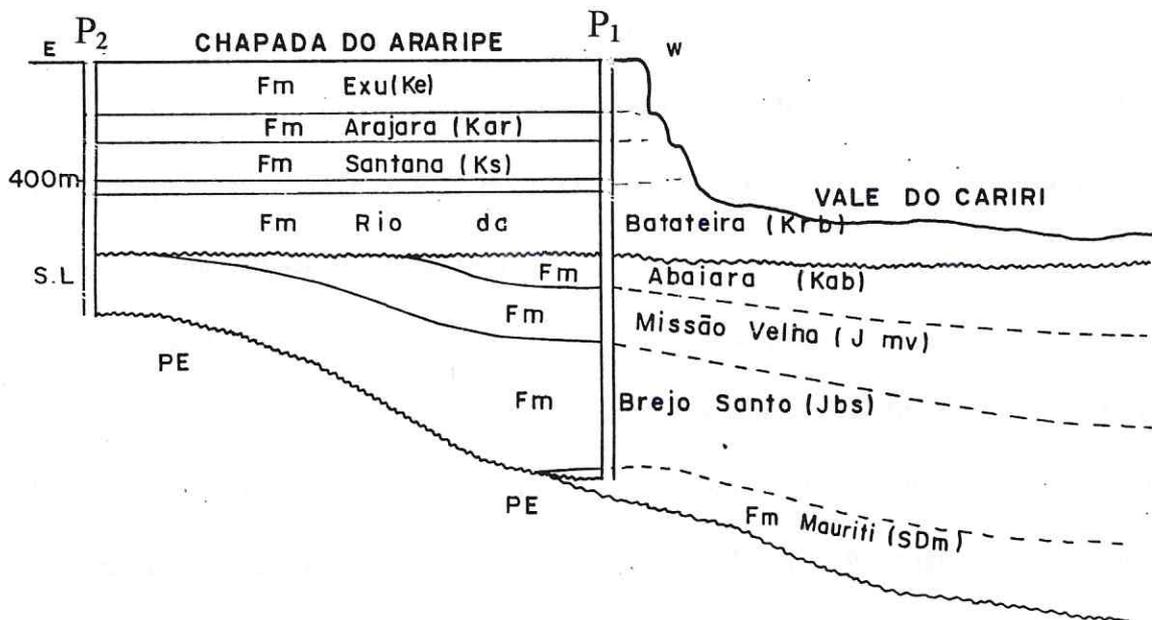


Figura 2.3. Estratigrafia da Chapada do Araripe com base na perfuração de dois poços de pesquisa. Fonte: PETROBRÁS, DIRGEO/SEPRAV, 1994.

Em função das características litológicas desta sequência, com alternâncias de arenitos e folhelhos, as formações apresentam comportamentos hidrogeológicos distintos, principalmente no que se refere a permeabilidade e a porosidade, originando aquíferos e aquíferos. Desta forma, as Formações Rio da Batateira, Missão Velha e Mauriti representam os aquíferos da região, responsáveis praticamente por toda a água explorada para o abastecimento da população, enquanto que as Formações Santana, Abaiara e Brejo Santo funcionam como aquíferos, isolando as formações aquíferas e lhes conferindo um comportamento que varia de confinado a semi-confinado.

A Figura 2.4 apresenta um mapa geológico da região do Cariri onde aparecem em superfície as Formações Exu, Arajara, Santana, Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti. Nesta figura podem ser vistas duas legendas, uma que é utilizada em Geologia e uma legenda colorida, escolhida por nós, para facilitar a visualização.

A Bacia Sedimentar do Cariri é caracterizada por um forte tectonismo tendo sido formada por quatro sequências tectono-sedimentares (MONT'ALVERNE et al. 1995a). Estas sequências, juntamente com a cronoestratigrafia e com a litoestratigrafia das formações, podem ser vistas na Tabela 2.1. A Tabela 2.2 apresenta as idades e os eventos importantes relacionados com as eras e os períodos geológicos.

Na sequência Pós-Rifte estão as Formações Rio da Batateira, Santana, Arajara e Exu, sendo a Formação Santana dividida em três membros, da base para o topo, denominados Membro Crato, Membro Ipubi e Membro Romualdo. Essa sequência apresenta três sistemas deposicionais distintos:

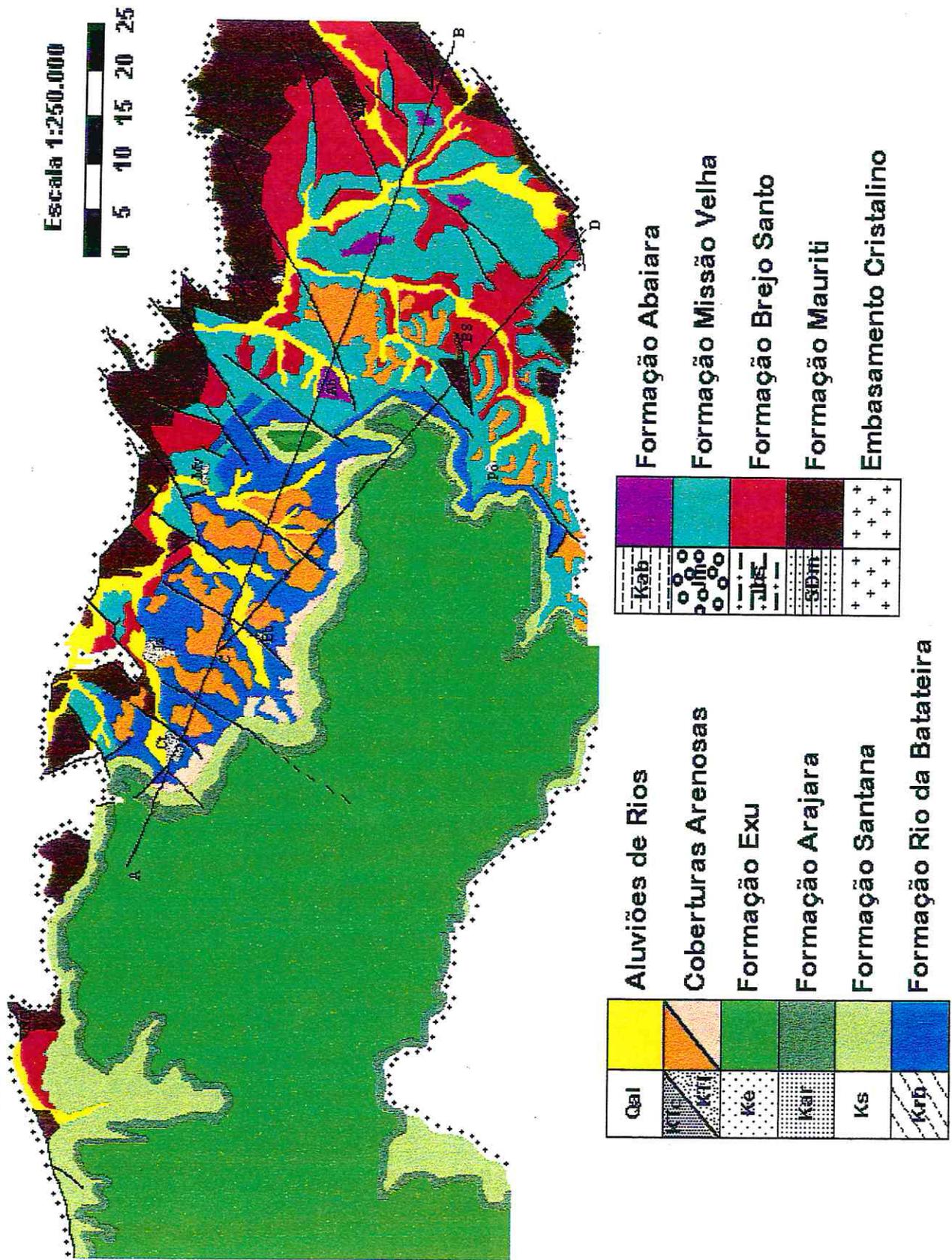


Figura 2.4. Mapa geológico da Bacia Sedimentar do Cariacica. AB e CD são seções geológicas que podem ser vistas na Figura 2.5.

Tabela 2.1. Sequências tectônicas, cronoestratigrafia e litoestratigrafia para as formações na Bacia do Cariri. Fonte: DNPM, 1996.

Evento Tec. Sedimentar	Cronoestratigrafia		Litoestratigrafia
	Era	Período	Formação
	Cenozóica	Quaternário Terciário	(Aluviões)
Estágio Pós-Rift	Mesozóica	Cretáceo	Exu Arajara Santana Rio da Batateira
Estágio Rift			Inferior
Estágio Pré-Rift		Jurássico Superior	Missão Velha Brejo Santo
Ciclo Gama	Paleozóica	Devoniano Siluriano	Mauriti

Tabela 2.2. Era geológica, período geológico, idade e fatos importantes associados. Fonte: SIMPSON, 1983.

Era	Período	Idade (até) anos x 10 <sup>6</sup>	Fato importante
Cenozóico	Holoceno	0,1	Grandes vertebrados morrem, aparecimento do homem
	Pleistoceno	2,5	
	Pliocênico	6	Primeiros Romenídeos
	Miocênico	26	Especialização crescente dos mamíferos
	Oligocênico	38	
	Eocênico Paleocênico	55 65	Aumento da distribuição espacial dos mamíferos primitivos
Mesozóico	Cretáceo	135	Extinção dos dinossauros, primeiros primatas, espalham-se plantas com flores
	Jurássico	190	Primeiras aves, primeiros mamíferos, primeiros dinossauros
	Triássico	225	
Paleozóico	Pérmico	280	Grande onda de extinção de invertebrados
	Carbônico	345	Primeiros répteis
	Devoniano	395	Primeiros anfíbios, primeiras matas, primeiros animais aeróbicos, primeiras plantas terrestres
	Silúrico	430	
	Ordovícico	500	Primeiros vertebrados, proliferação de invertebrados no mar
	Cambriano	570	
Pré-Cambriano		700	Primeiros animais
		3400	Possivelmente bactérias e cianobactérias
		4600	Criação da Terra

- 1) Sistema Flúvio Lacustre Carbonático: Formação Rio da Batateira e Membro Crato da Formação Santana.
- 2) Sistema Transicional Evaporítico e Marinho raso: Membros Ipubi e Romualdo da Formação Santana.
- 3) Sistema Fluvio Entrelaçado Meandrante: Formação Exu.

Estudos recentes realizados por MONT'ALVERNE et. al. (1995a) confirmaram a grande movimentação tectônica na Bacia Sedimentar do Cariri, a qual se encontra totalmente compartimentada em blocos, "grabens" e "horsts", como pode ser observado nas seções geológicas esquemáticas AB e CD apresentadas na Figura 2.5. GHIGNONE et. al. (1986), estudando a porção da bacia sedimentar correspondente ao Vale do Cariri, individualizou sete blocos estruturais distintos com três feições estruturais mais importantes, que são o bloco de Crato-Corredores, com "grabens" e "horsts" arqueados, o meio-graben da Serra das Cacimbas e entre eles, o "horst" regional, central de Mauriti. A tectônica que afetou a Bacia foi comprovada em subsuperfície pelos levantamentos geofísicos pelo método de resistividade elétrica realizados em Juazeiro do Norte, Missão Velha, Brejo Santo, Milagres, Mauriti e Barro (FRACALOSSO, 1986).

Segundo GOMES et. al. (1981) a Formação Mauriti sofreu de forma mais acentuada a atuação da tectônica rúptil, sendo-lhe imprimida uma porosidade secundária marcante de fraturas.

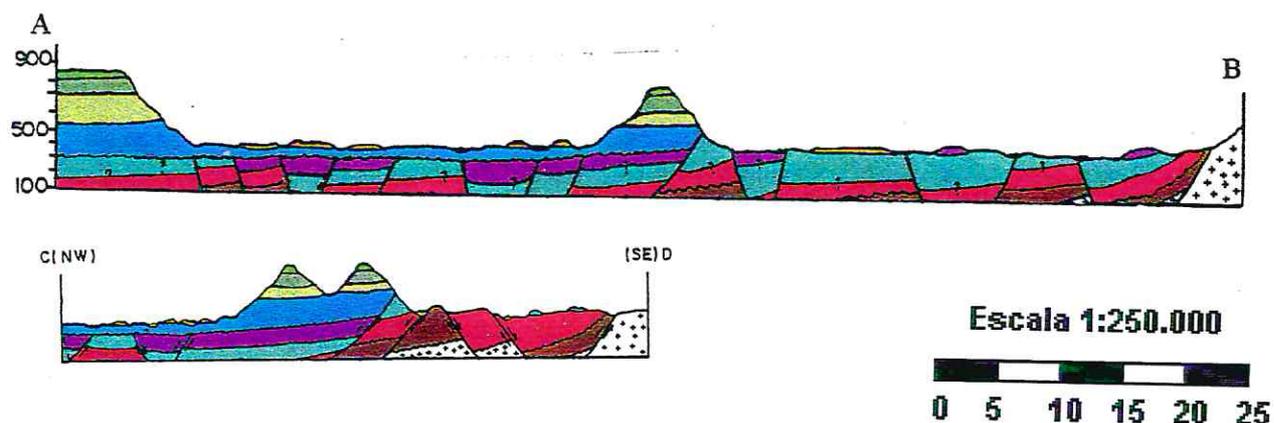


Figura 2.5. Seções geológicas esquemáticas representativas dos cortes AB e CD mostrados na Figura 2.4. Fonte: DNPM, 1996. (Código de cores, ver Figura 2.4).

### 2.2.1. FORMAÇÃO MAURITI

A Formação Mauriti (DANTAS & LOPES, 1995) é litologicamente constituída por uma sequência monótona de arenitos quartzosos e/ou feldspáticos, de cor clara (branca, acinzentada), de granulometria média a grosseira, com grãos sub-angulares, mal selecionados. Geralmente são silificados, principalmente em áreas próximas as falhas e no topo da unidade. O grau de litificação é um importante limitador de capacidade de acumulação de água subterrânea nesta unidade, sendo esta a razão pela qual a água é encontrada sobretudo nas fraturas. Quando friáveis mostram-se com boa porosidade.

Em algumas exposições desta unidade é possível reconhecer uma gradação granulométrica decrescente em direção ao topo, que se inicia com níveis conglomeráticos na base, sucedidos por arenitos médios com estratificações cruzadas de médio porte. Fechando o ciclo deposicional, ocorrem leitos delgados de siltitos e arenitos finos de cor cinza.

Os arenitos feldspáticos (branco-rosados) e níveis de ortoconglomerados bem preservados e fragmentos de rochas do embasamento ocorrem, predominantemente, na base da sequência e gradam para tipos quartzosos, com granulometria fina.

As áreas de exposição são restritas ao Estado do Ceará e as mais significativas e extensas localizam-se nas porções leste (Folha Milagres) e norte da Bacia (Folha Crato), onde em contato discordante ou falhado com o embasamento cristalino, emolduram as unidades que lhes sobrepõem.

Estratigraficamente, a Formação Mauriti é uma unidade arenítica afossilífera, datada, provavelmente do Siluro-Devoniano, com espessura variável entre 10 e 50 m (BEURLIN, 1963; VEIGA, 1966).

### **2.2.2. FORMAÇÃO BREJO SANTO**

GASPARY & ANJOS (1964) aplicaram a denominação de Formação Brejo Santo para designar a sequência de folhelhos, argilitos e arenitos que ocorre tipicamente nos arredores da cidade de Brejo Santo. As exposições mais significativas e extensas aparecem principalmente na folha Milagres e na folha de Crato, muito embora aflorem também nas folhas São José do Belmonte e Jardim.

A Formação Brejo Santo (DANTAS & LOPES, 1995) é reconhecida em subsuperfície na cidade de Nova Olinda. Nos poços de pesquisa 2-AP-1-CE é encontrada entre 1.023 e 1.498 m com uma espessura de 475 m e no poço 4-BO-1-PE é encontrada de 729 a 916 m com uma espessura de 187 m.

Litologicamente é constituída, na base, por uma alternância bem estratificada de arenitos finos, siltitos e argilitos vermelhos, contendo, localmente, intercalações de arenitos

vermelhos, exibindo estratificação cruzada. No topo, ocorrem argilitos e folhelhos vermelhos ou marrom escuro estratificados e esporádicos leitos de folhelhos verdes.

### **2.2.3. FORMAÇÃO MISSÃO VELHA**

A Formação Missão Velha (DANTAS & LOPES, 1995) aflora exclusivamente no Vale do Cariri, sendo constituída de arenitos grosseiros, mal selecionados, de coloração esbranquiçada ou amarelada, mostrando estratificação cruzada e leitos conglomeráticos.

Aparecem excelentes exposições situadas a leste da cidade de Missão Velha e nas proximidades norte de Abaiara. Mostram superposições de ciclos deposicionais fluviais granodecrescentes, começando na base, por arenitos conglomeráticos e culminando, no topo, por leitos delgados de arenitos finos, argilosos e siltitos avermelhados. A ocorrência de troncos de madeira fóssil é comum nos leitos conglomeráticos.

A espessura da Formação Missão Velha verificada em subsuperfície foi de 187 m no poço 2-AP-1-CE (intervalo de 836 a 1.023 m) enquanto que no poço 4-BO-1-PE de acordo com DNPM (1994) não se faz presente.

### **2.2.4. FORMAÇÃO ABAIARA**

O termo Formação Abaiara foi proposto por PONTE & APPI (1990) para designar o pacote de sedimentos que constitui a parte superior do Grupo Vale do Cariri e que ocorre

tipicamente ao sul da cidade de Abaiara na área compreendida entre os riachos Camelô e Olho d'Água do Milho.

As associações litológicas e paleontológicas da Formação Abaiara permitem, segundo PONTE FILHO e PONTE (1992), sua perfeita identificação, tanto em superfície, como em subsuperfície. Essa Formação foi encontrada no intervalo de 712 a 836 m no poço 2-AP-1-CE (124 m de espessura). ASSINE em 1990 aplicou a mesma denominação para caracterizar a coluna sedimentar contida no intervalo de 722 a 837 m de profundidade do mesmo poço. Mas CAVALCANTI & VIANA (1992) denominaram de Membro Olho D'Água Comprido da Formação Missão Velha a seção que aflora na localidade homônima, a leste do município de Missão Velha e correlacionaram com a Formação Abaiara de PONTE & APPI. O poço 4-BO-1-PE atingiu o embasamento cristalino sem atravessá-la. As áreas de exposição são modestas e restritas ao Vale do Cariri.

Litologicamente a Formação Abaiara (DANTAS & LOPES, 1995) é composta por alternâncias bem estratificadas de arenitos micáceos cinzas, amarelos ou avermelhados, predominantemente finos, argilosos e semi-friáveis e siltitos argilosos e folhelhos de cores variegadas (verde oliva, vermelho, cinza e amarelo). Este conjunto apresenta-se bem estratificado, com leitos que variam de grosseiros a delgados.

#### **2.2.5. FORMAÇÃO RIO DA BATATEIRA**

A área de afloramento da Formação Rio da Batateira é restrita ao Vale do Cariri, se estende, amplamente, desde o sopé da Chapada do Araripe, a oeste da cidade de Crato, até a Serra da Mãozinha, entre as cidades de Barbalha e Missão Velha. A partir daí sua área de

exposição se estreita consideravelmente e, contornando a Chapada do Araripe, se estende em direção ao sul, até próximo a cidade de Jardim onde se acunha e desaparece por sob a Chapada. De acordo com os conhecimentos atuais não aflora no restante da Bacia Sedimentar, sendo reconhecida apenas em subsuperfície, através dos poços de pesquisa 2-AP-1-CE e 4-BO-1-PE nos quais foi atravessada nos intervalos de 514 a 712 m (198 m de espessura) e 448 a 729 m (281 m de espessura), respectivamente. Segundo PONTE & APPI (1990) a espessura da Formação Rio da Batateira é da ordem de 200 m.

Litologicamente a Formação Rio da Batateira (DANTAS & LOPES, 1995) se inicia por bancos de arenitos fluviais médios a grosseiros, gradando, ascendentemente, para arenitos médios a finos, siltitos argilosos bem estratificados e se encerra com uma seção de folhelhos negros, orgânicos, fossilíferos.

Entre as Formações Missão Velha e Rio da Batateira existe a Unidade Fundão, com 10 m de espessura, composta essencialmente de folhelhos negros e marrons, as vezes betuminosos.

Os folhelhos betuminosos que ocorrem no topo da Formação Rio da Batateira foram chamados de "Camada Batateira" por HASHIMOTO et al (1987).

#### **2.2.6. FORMAÇÃO SANTANA**

BEURLIN (1971) subdividiu a Formação Santana em três membros: Membro Crato (inferior), Membro Ipubi (médio) e Membro Romualdo (superior).

### **Membro Crato**

Situado na seção inferior da Formação, o Membro Crato constitui um pacote que apresenta uma espessura média da ordem de 50 m (PONTE & APPI, 1990) e compreende da base para o topo, folhelhos cinzas, castanhos, calcíferos, laminados; calcários micríticos cinza claro e creme e finalmente laminados (DANTAS & LOPES, 1995).

MORAES et al (1976), considerando que esta unidade é composta predominantemente de calcários contendo intercalações de folhelhos e siltitos mais ou menos calcíferos, margas e calcarenitos, aplicaram a denominação de "Fáceis Carbonatadas".

Ainda com relação ao seu conteúdo litológico, PONTE (1992) se refere a uma associação de litofáceis que se inicia com arenitos grosseiros, conglomeráticos, gradando em direção ao topo para terrígenos finos bem estratificados e para calcários argilosos laminados e culminando com uma camada de folhelhos orgânicos, negros, papiráceos, na base do Membro Ipubi.

### **Membro Ipubi**

O Membro Ipubi que repousa sobre o Membro Crato em contato normal e gradacional, é constituído predominantemente por bancos estratiformes de gipsita, contendo, subordinadamente, intercalações de folhelhos cinzas e verdes. Sua espessura média é de 30 m e seu contato superior é nítido e brusco com discordância regional (SILVA, 1983 e 1986a; PONTE & APPI, 1990).

Essa unidade é a de maior interesse econômico em toda a Bacia do Cariri, pela presença de grandes depósitos de gipsita.

### **Membro Romualdo**

Localizado no topo da Formação Santana, o Membro Romualdo é muito importante do ponto de vista paleontológico por apresentar folhelhos e margas fossilíferos, cinza esverdeados onde ocorre um horizonte rico em concreções carbonáticas de dimensões variadas, contendo na sua grande maioria peixes fósseis de grande valor científico (DANTAS & LOPES, 1995).

Intercalados nos folhelhos, ocorrem ainda calcários argilosos, fossilíferos e lentes de arenitos friáveis. O contato inferior com o Membro Ipubi é marcado por uma fina camada (1 a 2 m) de micro-conglomerado ou arenito conglomerático com estratificação cruzada a canalada, contendo concreções argilosas e seixos de quartzo e gipsita. Segundo MORAES et al (1976) a espessura do Membro Romualdo varia de 2 a 15 m.

No poço 4-BO-1-PE a espessura atingida pela Formação Santana foi de 169 m (intervalo de 279 a 448 m) não tendo sido constatada a presença do Membro Ipubi.

### **2.2.7. FORMAÇÃO ARAJARA**

Esta Formação é uma sequência de siltitos, argilitos e arenitos e está sobreposta ao Membro Romualdo da Formação Santana e sotoposta a Formação Exu (DANTAS & LOPES, 1995). O nome deriva do povoado de Arajara, localizado cerca de 12 km (em linha

reta) ao sul da cidade de Crato e em cujos arredores observam-se boas exposições desta unidade.

O fato dessa Formação ser reconhecida em várias outras localidades e a peculiaridade de suas características morfológicas e fotogeológicas levam a crer tratar-se de uma unidade contínua ou quase contínua, que aflora por toda extensão da Bacia, bordejando o sopé da escarpa da Chapada do Araripe.

Litologicamente é composta por siltitos, argilitos, arenitos finos argilosos e/ou caulínicos, bem estratificados, exibindo estruturas sedimentares, marcas onduladas, laminações cruzadas e, eventualmente estruturas de fluidização e coloração variegada, predominando as tonalidades vermelha e amarela.

Seu contato inferior com o Membro Romualdo da Formação Santana é gradacional, enquanto que com a Formação Exu, a unidade que lhe sobrepõe, o contato é bem marcado por uma discordância erosiva regional, conforme afirma SILVA (1983, 1986b) e PONTE & APPI (1990).

A espessura da Formação, levando em conta os dados de superfície, é difícil de ser estimada. Em subsuperfície as espessuras reveladas pelos poços 2-AP-1-CE e 4-BO-1-PE, são de 100 m (237 a 337 m) e 36 m (243 a 279 m), respectivamente.

#### **2.2.8. FORMAÇÃO EXU**

Trata-se da unidade que encerra a Chapada do Araripe, constituindo uma capa contínua em toda a extensão da Chapada. É representada por uma sequência monótona de arenitos vermelhos friáveis, argilosos, em geral caulínicos, de granulometria variável,

contendo leitos intercalados de arenitos grosseiros e conglomeráticos (DANTAS & LOPES, 1995).

As espessuras aflorantes desta Formação são variáveis, atingindo valores máximos (150 a 200 m) na parte leste da Chapada e valor mínimo em torno de 100 m na extremidade oeste. Em subsuperfície, foram constatadas as espessuras de 237 m no poço 2-AP-1-CE e 243 m no poço 4-BO-1-PE.

Um esquema resumido da litoestratigrafia de todas as formações na Bacia do Cariri pode ser visto na Tabela 2.3, juntamente com a legenda geológica representada no mapa da Figura 2.4.

## **2.3. ÁGUA SUBTERRÂNEA**

### **2.3.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA NA CHAPADA DO ARARIPE**

A Chapada do Araripe é constituída pelas Formações Exu, Arajara e Santana. Com base em suas características geológicas, as duas primeiras podem ser consideradas como aquíferos, embora com diferenças significativas de permeabilidade ( $K_{EXU} \gg K_{ARAJARA}$ ). A Formação Santana apresenta um comportamento típico de aquitarde. Neste contexto, quando a precipitação infiltra no topo da Chapada, nos contatos Exu/Arajara e principalmente Arajara/Santana, em função da diferença de permeabilidade, o fluxo vertical sofre um decréscimo em favor do fluxo horizontal, o que resulta num fluxo natural mais acentuado na zona de contato entre estas formações, originando a grande quantidade de fontes que existem ao longo da escarpa no lado cearense da Chapada.

Tabela 2.3. Litologia da Bacia do Cariri. FONTE: DNPM, 1986.

Legenda Geológica	Descrição Litológica
	Aluviões de rios (Qal): Quaternário aluvião.
	Coberturas arenosas e arenoargilosas (Qtc): Quaternário-Terciário.
	Depósito de talus relacionados com as Formações Arajara e Santana (QtT): Quaternário-Talus.
	Arenitos grossos a médios avermelhados, friáveis e mal selecionados (Ke): Cretáceo Exu.
	Arenitos finos, as vezes caulínicos e siltitos amarelos e roxos finamente estratificados (Kar): Cretáceo Arajara.
	Margas e folhelhos cinza escuro (topo) calcário, gipsita e folhelhos negros betuminosos (médio) calcários laminados e marga na base (Ks): Cretáceo Santana.
	Arenitos médios a finos, argilosos amarelos e cinza, siltitos e folhelhos cinza, bem estratificados e leitos de folhelho negros betuminosos (Krb): Cretáceo Rio da Batateira.
	Arenitos micáceos argilosos intercalados com siltitos e folhelhos castanhos cinza e verde bem estratificados (Kab): Cretáceo Abaiara.
	Arenitos brancos e amarelos, grosseiros, mal selecionados, friáveis contendo madeira fóssil (Jmv): Jurássico Missão Velha.
	Folhelhos, siltitos de cores variegadas com intercalações de arenitos finos, argilosos e vermelhos (Jbs): Jurássico Brejo Santo.
	Arenitos quartzosos, grosseiros a médio, duros com estratificação cruzada (SDm): Siluro Devoniano Mauriti.
	Granitos, migmatitos, gnaisses, xistos, filitos, etc.

As intercalações aquíferas existentes na Formação Exu retêm localmente uma certa quantidade de água formando os chamados aquíferos suspensos, explorados localmente pela população para o autoabastecimento, como é o caso da localidade de nome Cacimbas.

A rede hidrográfica é praticamente inexistente na parte superior da Chapada, em função de uma topografia plana e da alta permeabilidade, fatores que favorecem a infiltração. Assim, apenas uma proporção mínima das chuvas que caem na Chapada escoam superficialmente, uma parcela infiltra e a maior parte é interceptada pelos processos de evapotranspiração.

A recarga dos aquíferos é feita por infiltração direta das águas das chuvas, logo, admitindo uma pluviometria média da ordem de 700 mm/ano e considerando a área da Chapada de 7.500 km<sup>2</sup> a taxa de recarga anual pode ser avaliada em 5,2 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (GASPARY, et. al., 1967).

O nível freático do sistema aquífero Exu/Arajara é muito profundo (cerca de 150 m), fato que dificulta a realização de testes de aquífero para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos. GASPARY, et. al. (1967) indicaram um valor para a transmissividade de  $T = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  para a Formação Exu.

### **2.3.2. ÁGUA SUBTERRÂNEA NO VALE DO CARIRI**

Na região rebaixada conhecida como Vale do Cariri os principais aquíferos estão representados pelas Formações Rio da Batateira, Missão Velha e Mauriti. Em termos potenciais os dois primeiros são mais representativos, já que o aquífero Mauriti, em função da litificação acentuada sofrida pelos arenitos, tem sua potencialidade hídrica associada a

uma porosidade secundária representada por falhas e fraturas, além de conter águas com um índice de salinização mais elevado.

A alimentação destes aquíferos é feita por infiltração pluvial direta e por contribuições fluviais através de rios influentes. Segundo GASPARY et. al. (1967), a contribuição das águas pluviais chega a atingir  $2,5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Quanto as contribuições fluviais GASPARY et. al. (1967), considerando a área drenada da Bacia com aproximadamente  $1.000 \text{ km}^2$  e admitindo uma lâmina média infiltrada de  $30 \text{ mm/ano}$ , determinou um volume de  $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Ainda segundo GASPARY et.al. (1967) a vazão total das fontes foi estimada como sendo  $28 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

A partir de ensaios de bombeamento GASPARY et. al. (1967) determinaram valores dos parâmetros hidrodinâmicos para o aquífero Missão Velha Superior, no município de Juazeiro do Norte e para o aquífero Missão Velha Inferior, no município de Missão Velha. O Quadro 2.2 sintetiza os resultados alcançados.

Quadro 2.2. Parâmetros hidrodinâmicos. T: transmissividade, S: coeficiente de armazenamento e K: condutividade hidráulica. Fonte: GASPARY et. al. (1967).

Aquífero	Parâmetros hidrodinâmicos		
	T ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	S	K ( $\text{m/s}$ )
Missão Velha Superior	$10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-5}$
Missão Velha Inferior	$10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$

FRACALOSI (1986) considerando a sequência estratigráfica de GASPARY & ANJOS (1964), que consideram como aquíferos na região do Vale do Cariri apenas as Formações Missão Velha e Mauriti, determinam valores médios para a transmissividade e

para a condutividade hidráulica destes aquíferos analisando testes de bombeamento de 26 e 14 poços, respectivamente. Os resultados podem ser vistos no Quadro 2.3.

Quadro 2.3. Parâmetros hidrodinâmicos. T: transmissividade e K: condutividade hidráulica. Fonte: FRACALOSSI (1986).

Aquífero	Parâmetros hidrodinâmicos	
	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
Missão Velha	10 <sup>-3</sup>	1,6 x 10 <sup>-5</sup>
Mauriti	10 <sup>-3</sup>	1,6 x 10 <sup>-5</sup>

MONT'ALVERNE et. al. (1995b) considerando a similaridade das características hidrogeológicas e a imprecisão na descrição de grande parte dos perfis geológicos dos poços perfurados propõem a seguinte divisão hidrogeológica para a Bacia do Cariri: 1) Sistema Aquífero Superior (Formações Exu e Abaiara); 2) Aquiclude Santana; 3) Sistema Aquífero Médio (Formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha); 4) Aquiclude Brejo Santo; 5) Sistema Aquífero Inferior (Formação Mauriti e parte basal da Formação Brejo Santo). Estudando os Sistemas Aquíferos Médio e Inferior os autores calcularam os parâmetros hidráulicos que podem ser vistos no Quadro 2.4.

Quadro 2.4. Parâmetros hidrodinâmicos. T: transmissividade, S: coeficiente de armazenamento e K: condutividade hidráulica. Fonte: MONT'ALVERNE et. al. (1995b).

Sistema Aquífero	Parâmetros hidrodinâmicos		
	T (m <sup>2</sup> /s)	S	K (m/s)
Médio	5 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-4</sup>	5 x 10 <sup>-5</sup>
Inferior	3 x 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	4 x 10 <sup>-6</sup>

Assim, os aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha apresentam melhor potencial para exploração do que o aquífero Mauriti. Segundo FREEZE & CHERRY (1979) transmissividades maiores do que  $0,015 \text{ m}^2/\text{s}$  representam "bons" aquíferos para exploração da água subterrânea. Segundo os mesmos autores o coeficiente de armazenamento (S) em aquíferos confinados está entre  $5 \times 10^{-5}$  e  $5 \times 10^{-3}$  e para o aquíferos livres está entre  $10^{-1}$  e  $4 \times 10^{-1}$ .

#### 2.4. TRABALHOS ANTERIORES

Embora a água subterrânea na região do Cariri seja um dos mais importantes recursos para o desenvolvimento e a economia regional, são poucos os estudos sobre estas reservas. PONTE (1991b) fez um levantamento bibliográfico sobre as bacias interiores do nordeste onde podemos constatar que a maioria dos trabalhos na Bacia do Cariri são sobre Paleontologia e Paleoecologia, o autor cita 187 em número.

O autor cita trabalhos desenvolvidos na Bacia do Cariri sobre variados assuntos: 77 sobre Estratigrafia e Sedimentologia, 22 sobre Geologia Estrutural e Tectônica, 22 sobre Geologia Econômica e Estrutural e 9 sobre Bioestratigrafia. São citados também 30 mapas e 40 descrições de poços e sondagens. Esta bibliografia foi utilizada para a descrição da área neste trabalho.

O primeiro trabalho sobre Hidrogeologia é de 1871 quando o autor (MACEDO, 1871), estudando as secas do Ceará, faz observações a cerca das fontes do Cariri e somente em 1936 (OLIVEIRA, 1936) foi feito um estudo sobre as águas subterrâneas na Chapada. Depois destes trabalhos somente na década de 60 novos trabalhos foram realizados com o

apoio da SUDENE. Em 1961 aparece o primeiro estudo de reconhecimento hidrogeológico da Chapada do Araripe (TALTASSE et. al. 1961), seguido em 1962 (DUARTE, 1962) por um cadastro hidrogeológico do Cariri; em 1964 GASPARY & ANJOS fazem um estudo hidrogeológico no município de Juazeiro do Norte e TEIXEIRA, em 1967, faz um estudo hidrogeológico da Bacia no Estado de Pernambuco. Da mesma época datam os trabalhos de REBOUÇAS & GASPARY (1966) e de REBOUÇAS (1973) que quantificam os recursos hídricos da região. Em 1984 MARQUES et. al. realizam um trabalho no intuito de aplicar resistividade elétrica à prospecção da água subterrânea. Em 1989 SANTIAGO et. al. e em 1990 FRISCHKORN et. al. realizam trabalhos para estudar as águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Cariri utilizando isótopos.

---

### 3- ISÓTOPOS DO CARBONO, OXIGÊNIO E HIDROGÊNIO

Os isótopos ambientais mais utilizados na Hidrologia são os do hidrogênio ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ), os do carbono ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ), os do nitrogênio ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$ ), os do oxigênio ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) e os do enxofre ( $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ ), pois estes elementos são muito abundantes em sistemas biológicos e também participam da maioria das reações geoquímicas. Além destes, os isótopos do estrôncio ( $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ ) e urânio ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) têm adquirido importância em investigações hidrogeológicas e sedimentológicas (FRITZ & FONTES, 1980).

Neste trabalho, usamos os isótopos do carbono, oxigênio e hidrogênio. O hidrogênio e o oxigênio fazem parte da molécula da água, portanto estão presentes em todo o ciclo hidrológico e o carbono encontra-se na atmosfera, na forma de  $\text{CO}_2$ , sendo também encontrado dissolvido na água como  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_2$ .

Desprezando o  $^{17}\text{O}$ , por sua concentração relativamente baixa e o  $^3\text{H}$ , que também é muito raro, a água consiste principalmente das seguintes moléculas (onde escrevemos H para  $^1\text{H}$  e D para deutério):



sendo as três espécies mais abundantes (DANSGAARD, 1961) e suas abundâncias relativas aproximadas em um milhão:



997291 : 299 : 2039

Medindo as abundâncias relativas com precisão nota-se pequenos mas importantes desvios. Na natureza, as faixas de valores extremos para as moléculas mais pesadas da água são dadas por:

$$\text{HD}^{16}\text{O} : 180 \text{ a } 340 \text{ ppm}$$

$$^1\text{H}_2^{18}\text{O} : 1900 \text{ a } 2040 \text{ ppm}$$

São exatamente estes desvios que a hidrologia isotópica explora. Eles são medidos por Espectrometria de Massa e os resultados expressos em relação a um padrão como discutido a seguir.

Para os isótopos estáveis, suponha que em uma mistura isotópica temos  $N_1$  e  $N_2$  moléculas das espécies isotópicas 1 e 2 ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  ou  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  ou  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ). A razão isotópica,  $R$ , é definida como

$$R = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.1)$$

onde,  $N_2$  representa o isótopo menos abundante. Se, como resultado de algum processo, moléculas são removidas do conjunto de tal modo que

$$\frac{dN_2}{dN_1} \neq \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.2)$$

houve fracionamento entre os isótopos.

Os processos que mais influenciam o fracionamento isotópico são os processos físico-químicos (evaporação, condensação, cristalização, etc).

Como as razões isotópicas são da ordem de  $1,5 \times 10^{-4}$  para  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $10^{-3}$  para  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  e  $10^{-2}$  para  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  (NIER, 1950), é muito difícil medir a abundância isotópica absoluta. Felizmente o valor absoluto não tem importância nas aplicações, mas sim o enriquecimento (ou empobrecimento) em relação a um padrão. Por isso, a variação dos isótopos estáveis é expressa como diferença em “delta por mil” ( $\delta^\circ/\text{oo}$ ) em relação a um padrão

$$\delta(\text{‰}) = \left( \frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padraoa}}} - 1 \right) \cdot 10^3. \quad (3.3)$$

Para o oxigênio-18 e o deutério o padrão utilizado é o SMOW, “Standard Mean Ocean Water”, (CRAIG, 1961b) que é uma “água média do oceano”. Como os oceanos são o maior reservatório de água, sua composição isotópica representa praticamente o valor médio da composição mundial, sendo quase constante e independente do lugar, da profundidade e do tempo. Hoje em dia, este padrão é preparado nos laboratórios do “National Bureau of Standards” (NBS) dos Estados Unidos, independentemente de uma amostra natural, porque na natureza sempre há uma possibilidade de mudanças imprevistas, provocadas, por exemplo, por mudanças climáticas.

Para o  $^{13}\text{C}$  o padrão utilizado é o PDB que é uma belemnita de um calamar pré-histórico (nome científico: *belemnitella americana*) numa formação geológica no Vale de Peedee nos Estados Unidos.

### 3.1. ISÓTOPOS DO CARBONO

O radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) é naturalmente produzido na alta atmosfera pela interação de nêutrons de baixa energia da radiação cósmica, principalmente com nitrogênio-14, em uma reação exotérmica do tipo  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ . Desintegra-se em nitrogênio-14 com emissão de partículas  $\beta^-$  de energia máxima de 157 KeV ( $^{14}\text{C} \rightarrow \beta^- + ^{14}\text{N}$ ) e tem meia-vida de 5.730 anos (GODWIN, 1962).

LAL & SUESS (1968) estimaram a produção natural de  $^{14}\text{C}$  como sendo da ordem de 0,25 átomos/cm<sup>2</sup>/s. Após sua formação, o  $^{14}\text{C}$  é oxidado produzindo dióxido de carbono que se mistura com o CO<sub>2</sub> da atmosfera.

A concentração de  $^{14}\text{C}$  na atmosfera (Figura 3.1) era constante até 1950. Esta concentração é tomada como referencial na escala “pMC” (percentagem de carbono moderno) atribuindo-se a ela o valor de 100 pMC. Mas com o início dos testes nucleares se elevou atingindo um pico de  $\approx 160$  pMC, no Hemisfério Sul, em 1965 (NYDAL e LÖVSETH, 1983) e a partir daí a concentração começou a diminuir como consequência de uma moratória das explosões termonucleares na atmosfera.

Em contrapartida aos testes nucleares, as indústrias contribuem para a diminuição da concentração do radiocarbono na atmosfera, através da queima de petróleo e carvão que são combustíveis fósseis (isentos de  $^{14}\text{C}$ ), liberando para a atmosfera dióxido de carbono “morto” em grandes quantidades. Este processo de diminuição da concentração de  $^{14}\text{C}$  na atmosfera é conhecido como Efeito Suess (SUESS, 1955).

O  $^{14}\text{C}$  é usado na Hidrologia como um traçador natural que permite determinar o tempo de residência da água no aquífero. Como o carbono não pertence à molécula da água, em princípio não poderia ser utilizado na sua datação. No entanto, encontra-se

carbono dissolvido na água, na forma de bicarbonatos. MÜNNICH (1957) foi quem, pela primeira vez, propôs o uso de  $^{14}\text{C}$  para datação das águas subterrâneas. A Figura 3.2 apresenta um esquema do ciclo natural do carbono, relevante para a datação de águas subterrâneas.

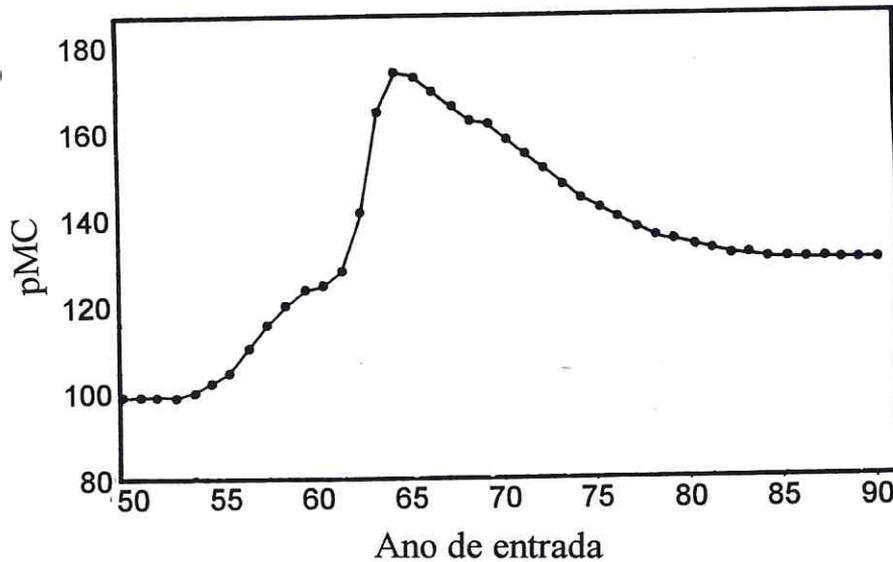


Figura 3.1. Concentração de  $^{14}\text{C}$  na atmosfera no Hemisfério Sul. Curva construída a partir dos valores de NYDAL & LOVSETH, 1983.

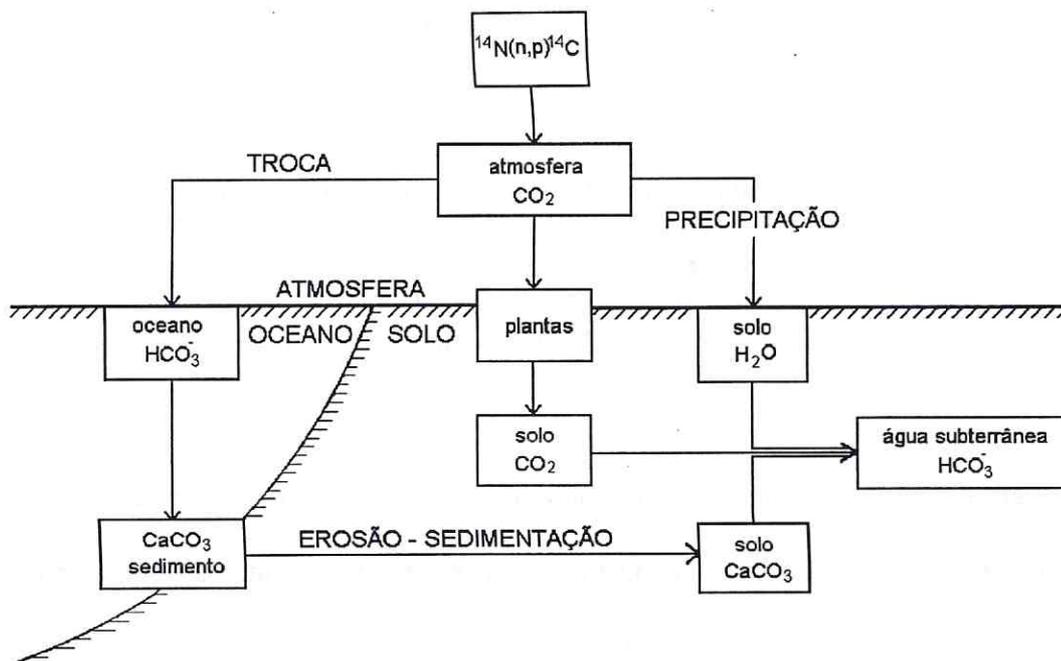


Figura 3.2. Ciclo natural de carbono, relevante para a datação de águas subterrâneas. Fonte: MOOK, 1980.

São muitos os processos que envolvem as fontes de carbono inorgânico na forma de bicarbonatos dissolvidos nas águas subterrâneas (MOOK, 1980):

1) O CO<sub>2</sub> produzido pela decomposição da matéria orgânica no solo ou por respiração das raízes, na zona não saturada do solo, quando dissolvido na água, produz ácido carbônico capaz de dissolver os carbonatos do solo através da seguinte reação:



O CO<sub>2</sub> proveniente da respiração das raízes e o CO<sub>2</sub> proveniente da decomposição da matéria orgânica possuem <sup>14</sup>C enquanto que os carbonatos não possuem <sup>14</sup>C. Assim, parte dos bicarbonatos produzidos possui <sup>14</sup>C, proveniente do equilíbrio com a atmosfera e outra parte é proveniente dos carbonatos mortos que não contém <sup>14</sup>C, sendo necessário um fator de correção da atividade inicial de <sup>14</sup>C na datação.

2) O CO<sub>2</sub> atmosférico pode ser dissolvido pela água da chuva como no processo anterior, mas este processo, normalmente, dá contribuição muito pequena em relação ao primeiro, a não ser em áreas sem ou com pouca vegetação. A concentração de ácido carbônico que chega ao solo através da pluviosidade (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) é insignificante quando comparada com a contribuição do CO<sub>2</sub> do solo, uma vez que a concentração desta espécie nas precipitações depende da concentração do CO<sub>2</sub> na atmosfera, que não excede 2 x 10<sup>-5</sup> Molal (PEARSON & HANSHAW, 1970). O CO<sub>2</sub> do processo 1 tem uma pressão parcial

de várias ordens de grandeza maior do que na atmosfera (LERMAN, 1972a; LERMAN, 1972b).

3) Em regiões livres de carbonatos e onde ocorre intemperismo de silicatos, o CO<sub>2</sub> dissolvido na água produz a dissolução de silicatos, formando bicarbonatos:



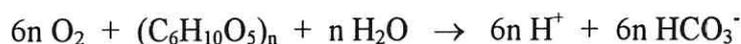
Esse processo não precisa de correção, uma vez que carbono morto não está envolvido. O carbono inorgânico dissolvido (DIC) gerado por intemperismo de silicatos deve ter atividade de <sup>14</sup>C similar ao do CO<sub>2</sub> do solo e valores de δ<sup>13</sup>C enriquecidos por cerca de 1 % relativo ao CO<sub>2</sub> do solo, devido ao fracionamento isotópico entre o CO<sub>2</sub> da atmosfera e o CO<sub>2</sub> úmido do solo (FONTES, 1983). GALLO (1979) observou evidências desse processo em águas subterrâneas do aquífero Botucatu em Ribeirão Preto.

4) Em águas ácidas pode ocorrer dissolução de CaCO<sub>3</sub> produzindo bicarbonatos:



Esse processo é mais uma fonte de carbono morto, necessitando uma correção ainda maior.

5) Carbonato pode ser adicionado através da oxidação da matéria orgânica:



seguido por:



Nas condições da primeira reação não é necessário um fator de correção, mas na segunda reação os carbonatos estão envolvidos, o que torna necessário uma correção da atividade específica inicial dos bicarbonatos.

6) Na ausência de oxigênio livre pode ocorrer redução de sulfato,



7) Se a concentração de  $\text{Ca}^{++}$  decresce devido a troca cálcio/magnésio, carbonato adicional pode ser dissolvido.

8) A atividade vulcânica constitui uma fonte de  $\text{CO}_2$  que não contém  $^{14}\text{C}$ .

9) Trocas de carbono entre o carbonato do solo ou calcário.

A descrição desses processos mostra que é difícil determinar a concentração inicial de  $^{14}\text{C}$  da água que chega ao aquífero, sendo necessário o desenvolvimento de modelos que auxiliem na determinação deste parâmetro. O  $^{13}\text{C}$  é muitas vezes utilizado para identificar a origem dos bicarbonatos dissolvidos na água subterrânea, uma vez que os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  no carbono inorgânico dissolvido (DIC) na água subterrânea refletem as reações que controlam os processos de sua produção.

Grandes variações naturais na concentração de  $^{13}\text{C}$  no solo são observadas para os diferentes tipos de vegetação na área de recarga. Dependendo dos processos de fotossíntese de assimilação do  $\text{CO}_2$ , três grupos de plantas terrestres apresentam valores médios de  $\delta^{13}\text{C}$  no  $\text{CO}_2$  do solo (MOOK, 1980) que são:

- O grupo do ciclo de Calvin com  $\delta^{13}\text{C} = -25 \pm 5 \text{‰}$
- O grupo do ciclo de Hatch-Slack com  $\delta^{13}\text{C} = -13 \pm 4 \text{‰}$
- O tipo *crassulacean acid metabolism* com  $\delta^{13}\text{C} = -17 \text{‰}$  (LERMAN, 1972a; TROUGHTON, 1972).

Em climas temperados o  $\text{CO}_2$  no solo tem em média  $\delta^{13}\text{C} = -25 \text{‰}$  (GALIMOV, 1966). Em regiões semi-áridas as plantas frequentemente obedecem ao ciclo de Hatch-Slack. O valor médio de  $\delta^{13}\text{C}$  observado por RIGHTMIRE (1967) no Oeste do Texas foi de  $\delta^{13}\text{C} = -17 \text{‰}$  e WALLICK (1976) encontrou  $\delta^{13}\text{C} = -12 \text{‰}$  na Bacia de Tucson, Arizona.

Em um modelo simples, o  $\text{CO}_2$  de subsuperfície se mistura com os carbonatos mortos resultando em um ponto de partida de 100 pMC para o  $^{14}\text{C}$  e de  $-12,5 \text{‰}$  para o  $^{13}\text{C}$ , se consideramos o ciclo de Calvin, por exemplo. As concentrações iniciais podem ter valores diferentes dependendo se o sistema é fechado (sem contato com a atmosfera) ou aberto (em contato com a atmosfera). Um sistema em contato com a atmosfera ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{atmosfera}} = -8 \text{‰}$ , SRDOC et al., 1986;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{atmosfera}} = -6,4 \text{‰}$  CRAIG & KEELING, 1963) pode ter valores de  $\delta^{13}\text{C}$  maiores do que  $-12,5 \text{‰}$  por troca isotópica, uma vez que o  $\delta^{13}\text{C}$  na atmosfera é mais elevado. Segundo DEINES et. al. (1974) e WIGLEY (1975), em condições de sistema aberto os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  devem estar entre  $-19 \text{‰}$  e  $-13 \text{‰}$  dependendo do pH e da temperatura.

### 3.1.1. MODELOS DE CORREÇÃO DE IDADE COM $^{14}\text{C}$

A aplicação das medidas de  $^{14}\text{C}$  para datação em Hidrologia requer o conhecimento da atividade do carbono dissolvido na água que chega ao reservatório ( $A_0$ ), o que representa uma das dificuldades do método. Os modelos que surgiram para determinar o valor de  $A_0$  são discutidos a seguir.

#### 3.1.1.1. MODELO DE PEARSON

O modelo de PEARSON (1963) utiliza medidas de  $\delta^{13}\text{C}$  para determinar o fator de correção  $Q$ , considerando as contribuições do carbono do solo e do carbono dos minerais, usando a seguinte equação de mistura:

$$[\delta^{13}\text{C}]_{\text{amostra}} = Q \cdot [\delta^{13}\text{C}]_{\text{solo}} + x \cdot [\delta^{13}\text{C}]_{\text{minerais}} \quad (3.8)$$

onde:  $Q$  = fração de carbono proveniente do solo

$x$  = fração de carbono proveniente dos minerais

como  $\delta^{13}\text{C} = 0$  para os minerais, o fator de correção de Pearson,  $Q_P$ , é dado por:

$$Q_P = \frac{[\delta^{13}\text{C}]_{\text{amostra}}}{[\delta^{13}\text{C}]_{\text{solo}}} \quad (3.9)$$

Assim, a equação da idade para Pearson é dada por:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[^{14}\text{C}_P]}{[^{14}\text{C}_A]} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[\delta^{13}\text{C}]_{\text{amostra}}}{[\delta^{13}\text{C}]_{\text{solo}}} \quad (3.10)$$

onde:  $[^{14}\text{C}_P]$  = atividade específica de  $^{14}\text{C}$  no padrão

$[^{14}\text{C}_A]$  = atividade específica de  $^{14}\text{C}$  na amostra

$\lambda$  = constante do decaimento radioativo do  $^{14}\text{C}$

### 3.1.1.2. MODELO DE TAMERS

O modelo de TAMERS (1967) utiliza medidas químicas para determinar o fator de correção  $Q$  e supõe que metade dos bicarbonatos provém do  $\text{CO}_2$  do solo propondo a seguinte expressão:

$$Q = \frac{[C_T] - 1/2[HCO_3^-]}{[C_T]} \quad (3.11)$$

onde:  $[C_T]$  = concentração total de carbono

$[HCO_3^-]$  = concentração de bicarbonatos

Assim, a equação da idade para Tamers é dada por:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[^{14}\text{C}_P]}{[^{14}\text{C}_A]} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[\text{C}_T] - 1/2[\text{HCO}_3^-]}{[\text{C}_T]} \quad (3.12)$$

Como os materiais carbonatados e a água estão em contato no aquífero, podem ocorrer trocas isotópicas. Por isso, Tamers introduziu mais um fator de correção na sua equação da idade que leva em conta estas trocas:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[^{14}\text{C}_P]}{[^{14}\text{C}_A]} + \frac{3}{4} \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[\text{C}_T] - 1/2[\text{HCO}_3^-]}{[\text{C}_T]} \pm \frac{1}{4} \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[\text{C}_T] - 1/2[\text{HCO}_3^-]}{[\text{C}_T]} \quad (3.13)$$

onde o sinal negativo na equação 3.13 é usado quando há troca isotópica e o sinal positivo quando não há.

### 3.1.1.3. MODELO DE CHENG

CHENG (1992) também usa medidas químicas para calcular o fator de correção de idade,  $Q_{ch}$ , mas faz distinção entre reações em sistema aberto e reações em sistema fechado. Na zona não saturada do solo, que representa um sistema aberto, em contato com o  $\text{CO}_2$  da atmosfera, ocorrem as seguintes reações:



Nestas condições, nem todo o  $\text{CO}_2$  é consumido e apenas um percentual da calcita formada é dissolvida



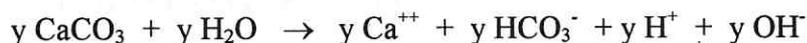
Assim, em condições de sistema aberto temos o carbono inorgânico dissolvido (DIC) e a alcalinidade (ALK) dados por:

$$\text{DIC} = 2x + (\text{H}_2\text{CO}_3)^\circ$$

$$\text{ALK} = 2x$$

$(\text{H}_2\text{CO}_3)^\circ = h \text{H}_2\text{CO}_3$  depende da temperatura sendo 0,344 para 25 °C.

Em condições de sistema fechado, como nos aquíferos confinados, ocorre a dissolução da calcita de acordo com a seguinte reação



Assim, nas condições de sistema fechado o carbono inorgânico dissolvido e a alcalinidade são dados por:

$$\text{DIC} = y$$

$$\text{ALK} = 2y$$

Durante a infiltração a água que alimenta o aquífero confinado passa das condições de sistema aberto na área de recarga para as condições de sistema fechado. Assim, considerando

as duas diferentes condições, o carbono orgânico total dissolvido e a alcalinidade total são dados por:

$$\text{DIC (total)} = 2x + y + (\text{H}_2\text{CO}_3)^{\circ}$$

$$\text{ALK (total)} = 2x + 2y$$

e o fator de correção é dado por:

$$Q_{\text{ch}} = \frac{\text{DIC (sistema aberto)}}{\text{DIC (total)}} \quad \text{ou}$$
$$Q_{\text{ch}} = \frac{\text{DIC (total)} - 0,5 \text{ ALK (total)}}{\text{DIC (total)}} + \frac{\text{DIC (total)} - 0,5 \text{ ALK (total)} - (\text{H}_2\text{CO}_3)^{\circ}}{\text{DIC (total)}}$$

### 3.2. DEUTÉRIO E OXIGÊNIO-18

Os isótopos pesados do oxigênio,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ , foram descobertos no oxigênio natural em 1929 (GIAUQUE & JOHNSTON, 1929) e o deutério ( $^2\text{H}$ ) foi identificado como um isótopo do hidrogênio natural em 1932 (UREY et al., 1932). Logo se viu que existiam variações na abundância natural das espécies isotópicas, tanto do oxigênio quanto do hidrogênio, como resultado do fracionamento isotópico causado por transições de fase, reações químicas ou biológicas e processos de transporte. Essas diferenças abriram a possibilidade de utilização destes isótopos como traçadores no ciclo da água. Considerando amostras naturais, o  $^{18}\text{O}$  varia de  $\pm 50 \text{ ‰}$  em torno da média e o  $^2\text{H}$  varia de  $+300 \text{ ‰}$  a  $-500 \text{ ‰}$  (MAGARITZ & GAT, 1981).

### 3.2.1. CORRELAÇÃO ENTRE $\delta^{18}\text{O}$ E $\delta^2\text{H}$ (RETA METEÓRICA)

Análises feitas em cerca de 400 amostras de chuva em todo o mundo levaram CRAIG (1961a) a observar que existe uma relação linear entre as concentrações de deutério e de oxigênio-18 dada por

$$\delta^2\text{H} (\text{‰}) = (8,17 \pm 0,08) \delta^{18}\text{O} + (10,56 \pm 0,64) \quad (3.14)$$

com coeficiente de correlação de  $R = 0,997$  e que foi denominada por CRAIG (1961a) de “reta meteórica” sendo simplesmente referida como  $\delta^2\text{H} (\text{‰}) = 8 \delta^{18}\text{O} + d$ , onde o parâmetro  $d$  é  $10 \text{‰}$  e é interpretado como “excesso de deutério”. A Figura 3.3 mostra os valores experimentais da média ponderada dos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  na precipitação de vários locais na Terra (IAEA, 1981).

Em águas que sofrem processo de evaporação ocorre um enriquecimento de oxigênio-18 levemente maior do que para deutério. Assim, estas águas apresentam um coeficiente angular menor do que o da reta meteórica como pode ser observado na Figura 3.4.

### 3.2.2. APLICAÇÕES DE $^{18}\text{O}$ e $^2\text{H}$

O principal parâmetro que controla os diferentes processos que podem ocorrer durante as precipitações é a temperatura ambiente. Existe uma relação linear entre os

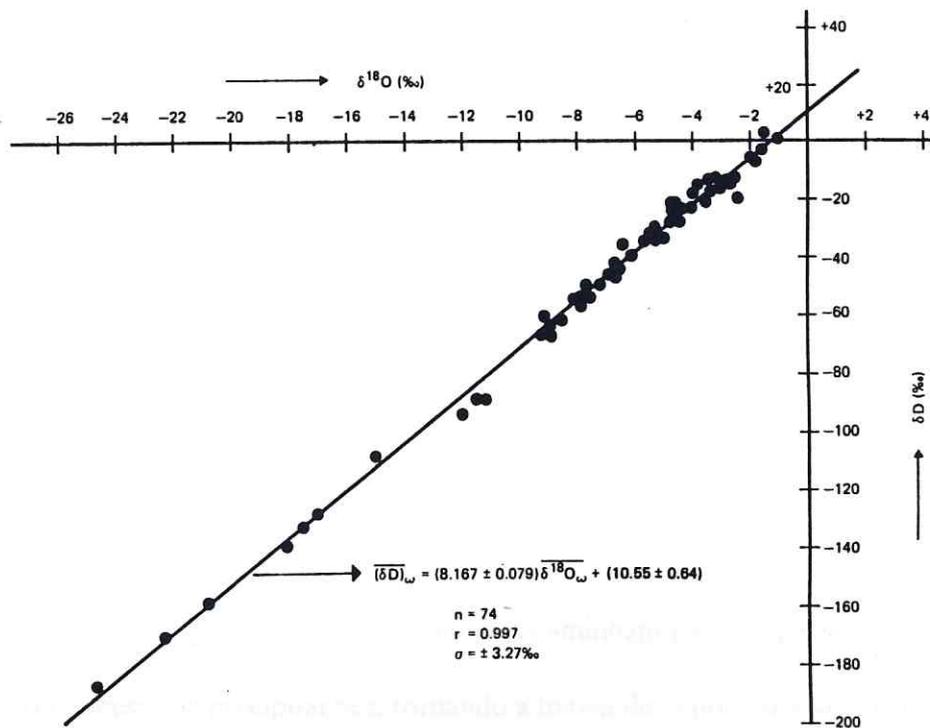


Figura 3.3. Correlação entre os valores médios ponderados de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  na precipitação (Reta Meteórica). Fonte: IAEA, 1981.

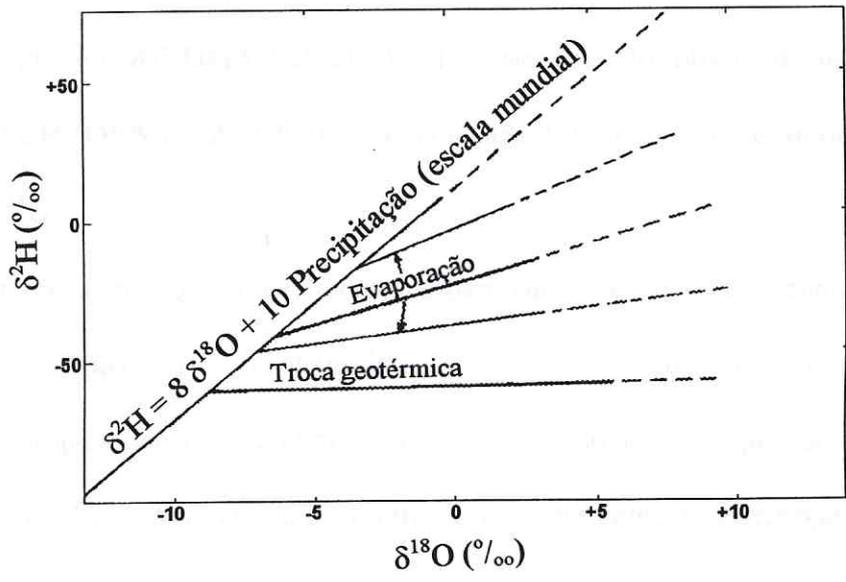


Figura 3.4. Relação entre  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  para águas que sofreram processos de evaporação. Fonte: FONTES, 1980.

valores médios anuais da temperatura (T) de um local e a composição isotópica das precipitações, em ambientes marinhos, temperados e polares (DANSGAARD, 1964) dada por:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0,69 \text{‰} T (\text{°C}) - 13,6 \text{‰} \quad (3.15)$$

A composição dos isótopos nas precipitações varia também com outros parâmetros produzindo os seguintes efeitos:

Efeito Continental: à medida que as nuvens caminham para o interior do continente, podem ocorrer sucessivas precipitações, tornando a massa de vapor cada vez mais pobre em isótopos pesados. SANTIAGO (1984) observou esse efeito medindo  $\delta^{18}\text{O}$  nas chuvas entre os municípios de Fortaleza e de Paramoti. Para cada quilômetro de distância da costa foi observada uma mudança de  $-0,019 \text{‰}$  em  $\delta^{18}\text{O}$ .

Efeito de Altitude: o conteúdo do isótopo pesado nas precipitações decresce com o aumento da altitude (FRIEDMAN et. al., 1964). Esse efeito foi observado na Chapada do Araripe (FRISCHKORN et. al., 1990) onde para cada 100 m de altitude foi observada uma variação no  $\delta^{18}\text{O}$  de  $0,02 \text{‰}$ .

As diferenças na composição isotópica para águas de diferentes origens são a base da aplicação do oxigênio-18 e do deutério. No ciclo hidrológico as maiores mudanças na composição isotópica ocorrem na atmosfera e nas águas superficiais que estão em contato com a atmosfera. No solo e na água subterrânea ocorrem somente diferenças desprezíveis na composição isotópica, exceto como resultado de mistura com águas de diferentes composições, ou seja, diferentes origens.

A mistura de águas de diferentes origens pode ser estudada através de um simples modelo de mistura. Quando dois volumes de água  $V_1$  e  $V_2$ , respectivamente com  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , se misturam, produzindo um volume de água  $V_3$  com  $\delta_3$ , podemos conhecer o percentual de cada tipo de água na mistura de acordo com as seguintes equações:

$$V_1\delta_1 + V_2\delta_2 = V_3\delta_3$$

$$V_1 + V_2 = V_3$$

⇓

$$V_1 / V_2 = (\delta_3 - \delta_2) / (\delta_1 - \delta_3) \quad (3.16)$$

Assim, conhecendo os três valores de  $\delta$  podemos saber o percentual da contribuição de cada “tipo de água” na mistura.

MATSUI et. al. (1976) usaram este modelo para estudar a mistura dos Rios Negro e Solimões, formadores do Rio Amazonas, sem a necessidade de medir a vazão, o que seria muito difícil no caso. Os resultados mostraram que a contribuição do Rio Negro varia de 20 a 68 %, dependendo da época do ano.

FRISCHKORN et. al. (1990) usaram este modelo para identificar o percentual de mistura nos poços do Vale do Cariri, de água que infiltra pela Chapada do Araripe e de infiltração local, usando medidas de  $\delta^{18}\text{O}$ . Os resultados mostraram que o percentual de infiltração local nos poços analisados varia desde 27 % até 90 %.

### 3.3. TRÍTIO

O trítio ( $^3\text{H}$ ), isótopo radioativo do hidrogênio, é produzido na estratosfera, desintegra-se em hélio-3, com emissão de partículas  $\beta^-$  de energia máxima 18,6 KeV, e possui uma meia-vida de 12,4 anos (NBS, 1980).

A produção natural de trítio resulta, principalmente, da interação entre os núcleos de oxigênio e nitrogênio com prótons e nêutrons de alta energia, provenientes da radiação cósmica. O trítio natural na água foi medido pela primeira vez por GROSSE et. al. (1951) utilizando um contador proporcional à gás com as amostras enriquecidas por eletrólise.

O uso de trítio como traçador do ciclo hidrológico foi estudado, já na década de 50, por LIBBY (1953), KAUFMAN & LIBBY (1954), BUTTLAR & LIBBY (1955) e BEGEMANN & LIBBY (1957) e na água subterrânea foi utilizado como traçador natural desde antes de 1960 por FINKELSTEIN et al. (1958), NIR (1964) e DINCER & DAVIS (1967), entre outros.

O trítio também é produzido artificialmente na fissão do urânio-235 em centrais nucleares, para geração de energia elétrica, e através de explosões termonucleares efetuadas na superfície terrestre (a partir de 1952). O trítio produzido nessas explosões foi introduzido na natureza de forma descontínua, como um pulso, tornando-se um verdadeiro traçador para os estudos de circulação de água na natureza.

A concentração de trítio proveniente da radiação cósmica tinha, antes de 1953, o valor de 10 TU nas chuvas do hemisfério norte (1 TU corresponde a 1 núcleo de  $^3\text{H}$  em  $10^{18}$  núcleos de  $^1\text{H}$ ). Após o início dos testes termonucleares, em 1952, este valor subiu, atingindo em Ottawa/Canadá 10.000 TU em 1963 (BROWN, 1970). A partir de 1963 o conteúdo de trítio nas chuvas diminuiu como consequência de uma moratória das explosões

termonucleares na atmosfera. Hoje a concentração de trítio nas chuvas no sul do Estado do Ceará está abaixo de 3 TU (SILVA, 1992).

## 4 - METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizadas medidas isotópicas de trítio ( $^3\text{H}$ ), deutério ( $^2\text{H}$ ), carbono-14, carbono-13 e oxigênio-18 e medidas químicas dos íons mais abundantes ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{--}$ ), feitas em laboratório. No campo foram realizadas medidas de condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido, concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_2$  e dureza de carbonatos por titulação, além da localização geográfica de cada poço através de GPS.

Realizamos, neste trabalho, 42 análises de trítio, 9 análises de deutério, 37 análises de carbono-14, 29 análises de carbono-13, 53 análises de oxigênio-18, 110 medidas de condutividade elétrica e 49 análises químicas dos oito íons mais abundantes.

### 4.1. ANÁLISE DE TRÍTIO

Para determinar a concentração de trítio, as amostras são inicialmente destiladas à pressão atmosférica, para remoção dos sais solúveis e outras impurezas e para uniformizá-las em termos de condutividade elétrica.

O trítio é encontrado na natureza em concentrações muito baixas, da ordem de TU onde 1 TU corresponde a 1 átomo de trítio ( $^3\text{H}$ ) para  $10^{18}$  átomos de  $^1\text{H}$ , o que corresponde a 7,2 dpm/L e em Curies ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dps}$ ), 1 TU corresponde a  $3,2 \times 10^{-3}$  microCurie/ $\text{m}^3$  de água. Para conseguir medir tão baixa concentração é necessário enriquecer, em trítio, a água a ser analisada.

Muitos parâmetros influenciam o enriquecimento por eletrólise, que vem sendo utilizado como método de enriquecimento desde as primeiras determinações em águas naturais (GROSSE et. al., 1951), destacando-se entre eles a temperatura, o tipo de eletrólito, a densidade de corrente elétrica e a natureza dos eletrodos. As condições utilizadas no Departamento de Física da UFC são as seguintes:

Temperatura de 1 a 4 °C, pois nesta faixa a perda por evaporação é reduzida e o fator de separação é maior. O eletrólito é o hidróxido de sódio (NaOH), que é obtido pela adição de peróxido de sódio (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) à amostra de água. Um ampere-hora produz a dissociação de 0,336 ml de água. Assim, quanto maior a densidade de corrente na célula, menor o tempo gasto pela eletrólise. A corrente no início é de 9 A, pois esta é a máxima corrente da fonte disponível. Quando o volume na célula atinge 60 ml a corrente é diminuída para 5 A para que o processo fique mais ameno, evitando a perda de trítio por arraste mecânico. O anodo é feito de aço inoxidável e o catodo de aço doce. Como o fator de separação depende criticamente das condições da superfície catódica, o catodo deve ser tratado através da recapagem com ácido fosfórico (ZUTSHI e SAS-HUBICKI, 1966), a fim de aumentar o fator de separação. As células eletrolíticas são compostas de um anodo e um catodo em forma de cilindros concêntricos (similares à célula de FLORKOWSKI & GRABEZAK, 1975).

A Figura 4.1 apresenta um esquema geral do sistema de enriquecimento eletrolítico, que consiste de um "freezer" comercial da marca Esmaltec, com capacidade para 316 litros e potência de 270 watts, com tampa perfurada e revestida com "náilon" para colocação das células eletrolíticas e dois ventiladores para permitir a circulação do ar e homogeneizar a temperatura. O tempo total e a temperatura de eletrólise são controlados automaticamente através de equipamentos que desligam o sistema no final do tempo estipulado. Caso a

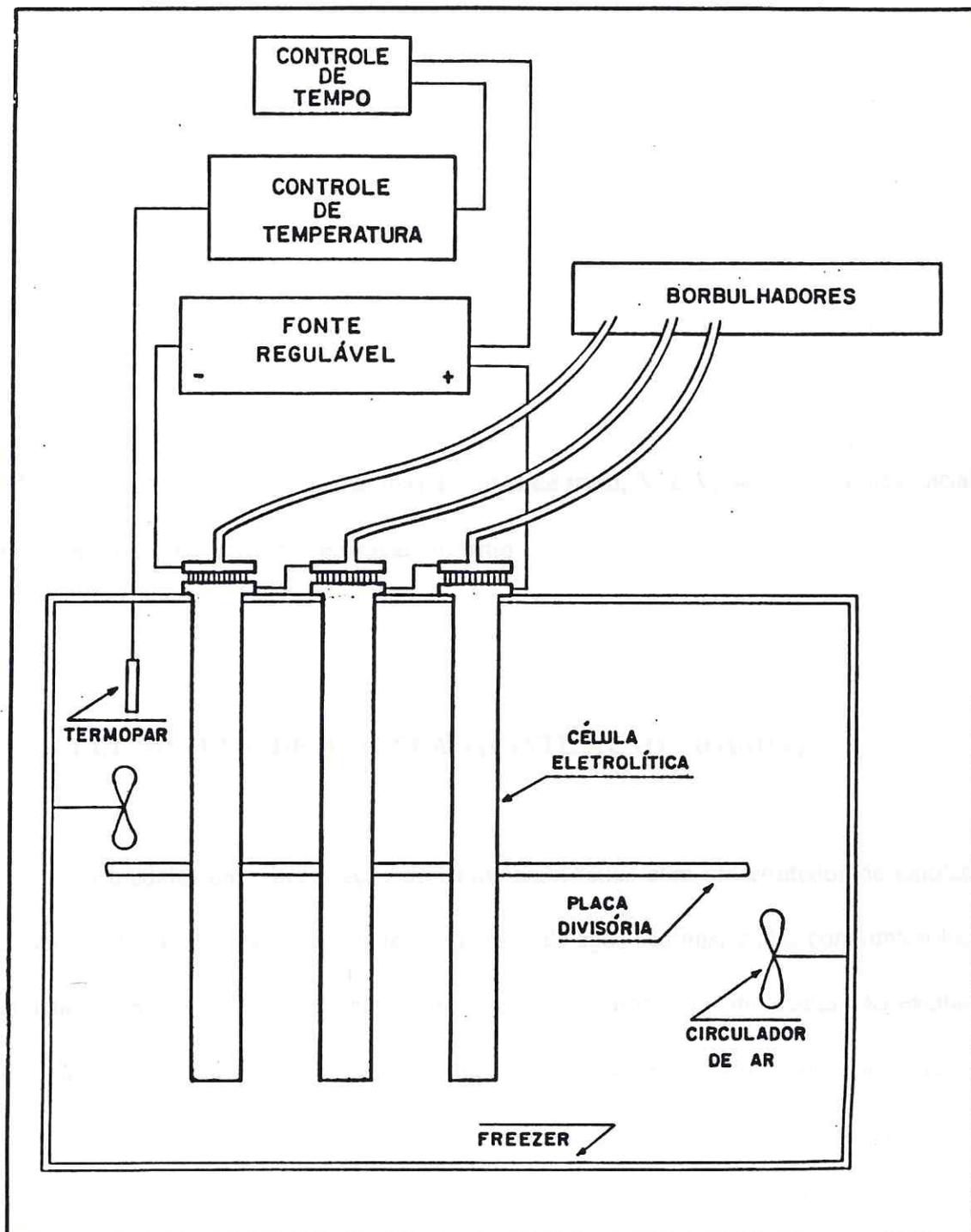


Figura 4.1. Esquema geral do sistema de enriquecimento eletrolítico.

temperatura não esteja na faixa ideal (1 a 4 °C) interrompem o processo. Duas fontes ligadas em série, uma brasileira da marca Dawer modelo FCC-3010D e a outra alemã da marca Gossen modelo Konstanter 44T20R10, estabilizam a corrente durante todo o processo e borbulhadores permitem um controle visual da velocidade do processo.

O fator de enriquecimento eletrolítico ( $F_e$ ) é determinado através da seguinte expressão:

$$F_e = \frac{C_f}{C_i} = \left[ \frac{V_i}{V_f} \right]^{1-(1/\beta)} \quad (4.1)$$

onde  $C_i$  e  $C_f$  são as concentrações inicial e final de trítio,  $V_i$  e  $V_f$  são os volumes inicial e final da água e  $\beta$  é o fator de separação do trítio.

#### 4.1.1. SISTEMA DE DETECÇÃO (CINTILAÇÃO LÍQUIDA)

As medidas da concentração de trítio foram feitas com um contador de cintilação líquida (2000CA/LL - Packard), onde as amostras de água são misturadas com uma solução cintilante, composta de um solvente e um ou mais solutos cujas moléculas são excitadas pela radiação nuclear, resultando na emissão subsequente de fótons, que por sua vez, interagem com o fotocátodo de uma fotomultiplicadora (Figura 4.2). Os fotoelétrons liberados na superfície catódica passam através de uma série de dinodos onde são multiplicados, resultando em um pulso elétrico amplificado para ser registrado.

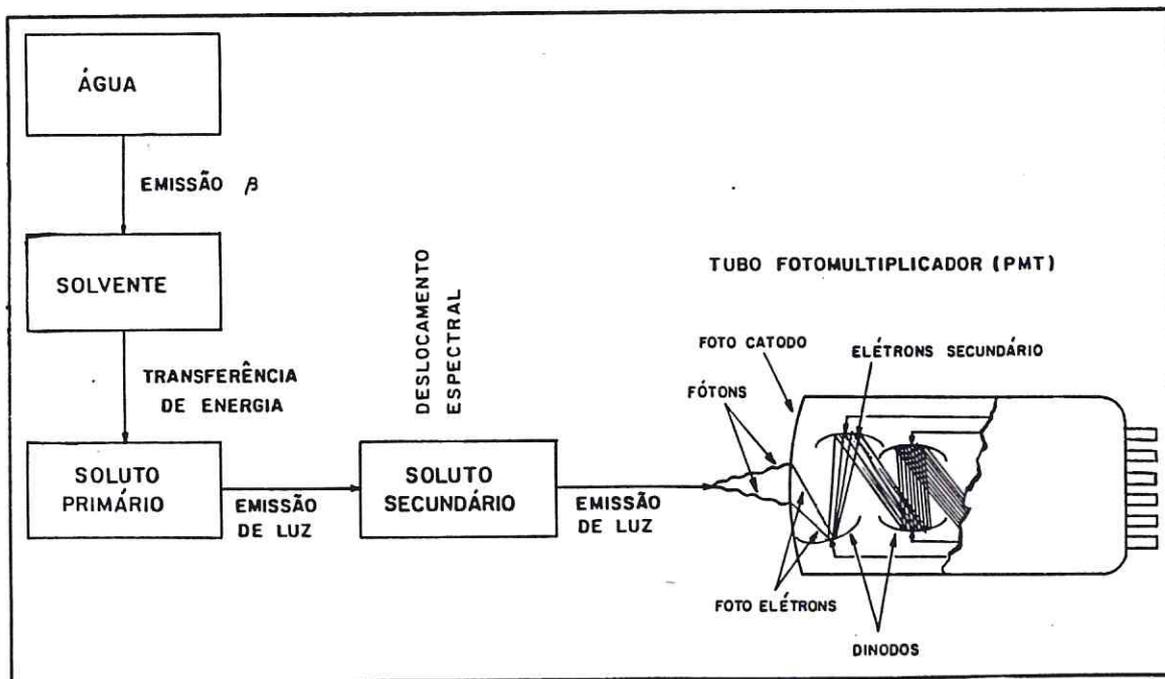


Figura 4.2. Sistema de detecção (cintilação líquida).

O coquetel de cintilação utilizado no Departamento de Física da UFC é o Instagel, indicado pela Packard como o mais eficiente para baixas contagens. Além disso, segundo SÁRÓ & DUKA-ZÓLYONI (1976), o Instagel apresenta uma das mais altas eficiências quando comparado com outros cintiladores.

O sistema de preparação e análise de trítio utilizado pode ser resumido nas seguintes características:

O sistema de eletrólise pode operar utilizando 10 células eletrolíticas, partindo de um volume inicial de 500 ml até um volume final de 10 ml, possuindo um fator de recuperação médio de 0,72 e um enriquecimento de 37 vezes. O volume de contagem é de 3,5 ml, o tempo de contagem é de 500 min, possuindo o sistema de contagem uma

eficiência de 25 %, uma contagem de fundo de 1,74 cpm, com um o limite de detecção em 0,3 TU. O tempo total gasto em uma análise de trítio é de aproximadamente 13 dias: 3 dias de destilação prévia, 8 dias de eletrólise, 1 dia de destilação após eletrólise e 1 dia de contagem.

O cálculo da concentração de trítio em TU é feito através da seguinte expressão:

$$[{}^3\text{H}] \text{ (TU)} = \frac{C_{\text{liq}}^f}{E} \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{V_f}{V_i} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1000}{7,2} \quad (4.2)$$

onde:  $C_{\text{liq}}^f$  = contagem líquida da amostra (cpm)

$V$  = volume de contagem (ml)

$V_f$  = volume final de eletrólise (ml)

$V_i$  = volume inicial de eletrólise (ml)

$E$  = eficiência do contador

$R$  = fator de recuperação

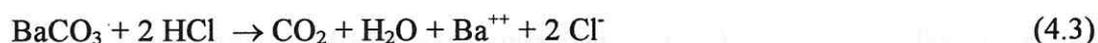
#### 4.2. ANÁLISE DE CARBONO-14

O carbono-14 natural tem baixa atividade necessitando, por isso, de técnicas especiais de medida desde a preparação das amostras até a contagem e obtenção dos dados. No Departamento de Física da UFC, os contadores para medida de carbono-14 são do tipo proporcional a gás, utilizando circuito de anti-coincidência e amostras na forma de acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ). O sistema foi projetado e instalado por M.A. GEYH (Landesanstalt für

Bodenforschung / Hanover-Alemanha) em 1975 no âmbito da Cooperação Bilateral Brasil/Alemanha.

As amostras de interesse na Hidrologia chegam ao laboratório na forma de carbonato de bário ( $\text{BaCO}_3$ ). Para nosso detetor, a quantidade mínima de carbonato de bário deve ser suficiente para produzir uma pressão de 1 atmosfera no tubo detetor, o que corresponde a 1 g de carbono. Nas águas subterrâneas do Cariri, foram necessários 120 litros de água por amostra. A coleta foi feita utilizando cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ), em meio básico para precipitar os bicarbonatos e  $\text{CO}_2$  dissolvidos, na forma de  $\text{BaCO}_3$ .

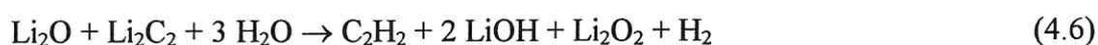
A preparação do gás de medida é processada numa linha de vidro à vácuo (Figura 4.3) onde são feitas as reações químicas para obtenção do acetileno. A primeira reação é feita para retirar do  $\text{BaCO}_3$  o carbono em forma de  $\text{CO}_2$ :



Na segunda fase, o  $\text{CO}_2$  obtido reage com lítio metálico aquecido a  $600^\circ\text{C}$  produzindo carbureto de lítio ( $\text{Li}_2\text{C}_2$ ) como mostra a reação abaixo:



Adicionando-se água velha (sem trítio) ao carbureto, à temperatura ambiente, obtém-se o acetileno desejado:



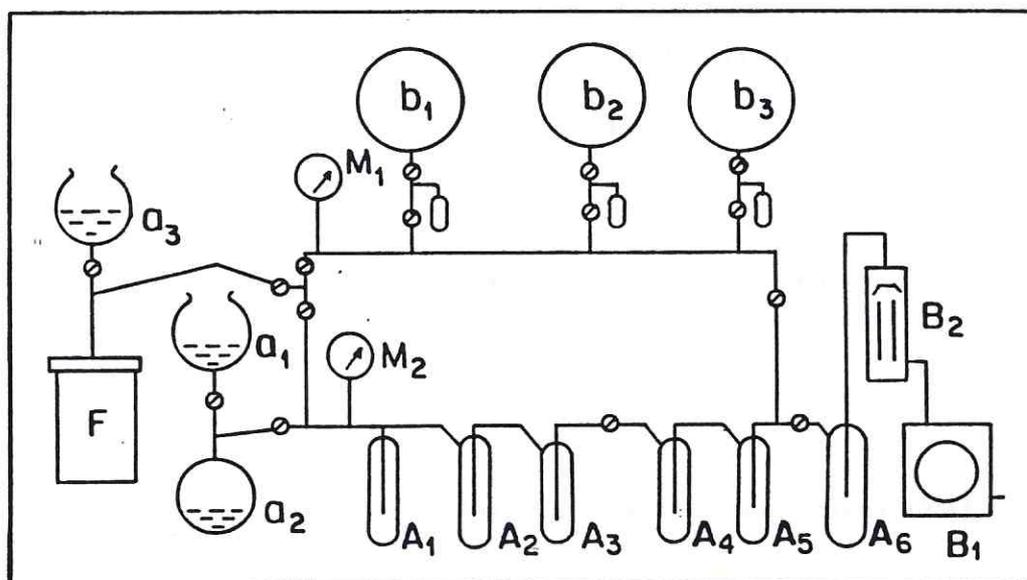
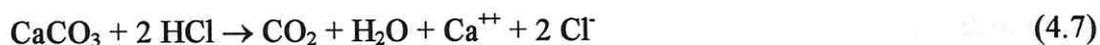


Figura 4.3. Linha de vidro a vácuo.  $a_1$ : balão para ácido clorídrico,  $a_2$ : balão para carbonatos,  $a_3$ : balão para água velha,  $A_1, A_2, A_3$ : armadilhas para vapor d'água,  $A_4, A_5$ : armadilhas para  $CO_2$  e  $C_2H_2$ ,  $B_1$ : bomba mecânica,  $B_2$ : bomba de difusão, F: forno,  $M_1$  e  $M_2$ : manômetros.

Após a obtenção do acetileno as amostras devem ser estocadas antes de serem levadas ao contador por 5 a 6 semanas, o que corresponde a aproximadamente 10 meia-vidas do radônio ( $T_{1/2} = 3,6$  dias) que é liberado do lítio durante a preparação.

Para calcular o valor do pMC é necessário medir a radiação de fundo utilizando uma amostra como o mármore, e um gás padrão, o ácido oxálico, distribuído pelo NBS.

A primeira fase da preparação de uma amostra de mármore ( $CaCO_3$ ) para obtenção do  $CO_2$  é feita através da reação:



e na primeira fase da preparação do padrão ácido oxálico ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ) utiliza-se permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) em meio ácido para liberação de  $\text{CO}_2$ ,



#### 4.2.1. SISTEMA DE DETECÇÃO (CONTADOR PROPORCIONAL)

As nossas medidas de atividade de  $^{14}\text{C}$  foram realizadas no Laboratório de Carbono-14 do Departamento de Física da UFC utilizando um detetor proporcional à gás que usa a ionização do próprio gás de amostra como gás de medida (Figura 4.4). O contador funciona com 760 Torr de acetileno.

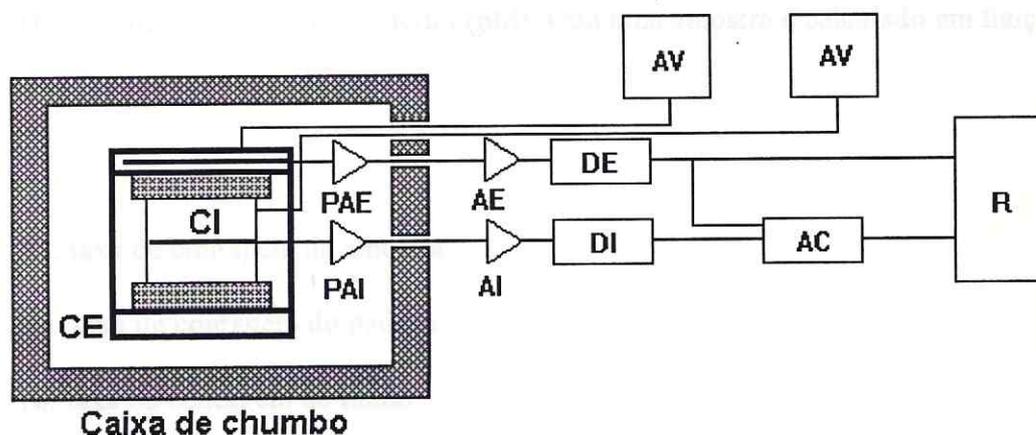


Figura 4.4. Sistema de detecção (contador proporcional). CE: contador externo, CI: contador interno, PAE e PAI: pré-amplificadores externo e interno, AE e AI: amplificadores para contador externo e interno, DE e DI: discriminadores externo e interno, AC: anticoincidência, AV: alta voltagem e R: registrador.

Como a atividade específica máxima do carbono-14 na natureza é da ordem de 14 dpm por grama de carbono, precisamos separar a radiação cósmica e ambiental da radiação proveniente da amostra. Para isso é utilizado um sistema de anti-coincidência que consiste de um outro detetor, em forma de anel (contador externo), que envolve o contador da amostra (contador interno). O contador externo do nosso sistema usa gás butano, à pressão de uma atmosfera, com fluxo contínuo. Se um pulso é detectado simultaneamente tanto no detetor interno quanto no externo, significa que o pulso não é proveniente da amostra. Assim, os pulsos que são detectados simultaneamente em ambos os detetores são descartados. O conjunto contador interno/contador externo encontra-se dentro de uma blindagem de chumbo e se comunica com uma linha de vidro para admissão da amostra.

As voltagens de trabalho do contador interno, contendo a amostra, e do contador externo, contendo gás butano, são escolhidas de acordo com a posição do "patamar" na curva contagem versus voltagem. Cada amostra é medida durante, no mínimo, 900 minutos, registrando as contagens de 50 em 50 minutos, para que testes estatísticos sejam feitos.

O percentual de carbono moderno (pMC) em uma amostra é calculado em função de:

$N_a$ : taxa de contagem da amostra

$N_p$ : taxa de contagem do padrão

$N_f$ : taxa de contagem de fundo

através da expressão:

$$pMC = \frac{N_a - N_f}{N_p - N_f} = \frac{\text{contagem líquida da amostra}}{95 \% \text{ contagem líquida do padrão}} \quad (4.9)$$

### 4.3. ANÁLISE DE DEUTÉRIO, OXIGÊNIO-18 E CARBONO-13

As determinações de deutério, oxigênio-18 e carbono-13 são feitas em espectrômetro de massa com dupla entrada e duplo coletor onde a amostra e o padrão são medidos alternadamente.

A variação da razão  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ( $^2\text{H}/\text{H}$  ou  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) da amostra em relação ao padrão é expressa como diferenças em delta por mil ( $\delta^{\text{‰}}$ ) definido por:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left[ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{amostra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{padrao}}} - 1 \right] \cdot 10^3 \quad (4.10)$$

Para o oxigênio-18 e o deutério o padrão utilizado é o SMOW (CRAIG, 1961b).

Para o carbono-13 o padrão utilizado é o PDB.

A água não pode ser medida diretamente no espectrômetro de massa porque a molécula adere às paredes do mesmo, sendo impossível sua remoção completa, causando um efeito de memória. Também não é possível analisar o oxigênio diretamente, pois ele ataca as superfícies metálicas formando óxidos, causando também um efeito de memória. Por isso, as análises de oxigênio-18 são feitas utilizando amostras na forma de  $\text{CO}_2$  obtido através de troca isotópica, à temperatura constante, entre a amostra d'água e o  $\text{CO}_2$  padrão até que o equilíbrio seja atingido. Este método foi primeiro proposto por COHN & UREY

(1938) e usado mais tarde por EPSTEIN & MAYEDA (1953) que primeiro mediram, com precisão, oxigênio-18 em águas naturais.

A análise do deutério na água é feita com gás hidrogênio preparado em linha de vácuo. Um dos métodos mais utilizados (FRIEDMAN, 1953) consiste em passar vapor de água sobre urânio metálico aquecido a uma temperatura > 600 °C. O urânio reage com o vapor de água formando óxido de urânio com desprendimento de hidrogênio



Também é possível separar o H<sub>2</sub> através da reação de redução do hidrogênio da água com zinco



Nossas medidas de oxigênio-18, deutério e carbono-13 foram realizadas na HYDROISOTOP/Alemanha.

#### 4.4. MEDIDAS QUÍMICAS

As medidas das concentrações químicas dos íons mais abundantes na água, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, foram realizadas no Departamento de Solos da UFC utilizando os seguintes métodos:

- Ca<sup>++</sup> - Titulação com EDTA, usando murexida como indicador.
- Mg<sup>++</sup> - Titulação com EDTA, usando negro de ericromo como indicador.
- Na<sup>+</sup> - Fotometria de chama, CORNING-400.
- K<sup>+</sup> - Fotometria de chama, CORNING-400.
- Cl<sup>-</sup> - Método de Mohr usando nitrato de prata como solução titulante.
- SO<sub>4</sub><sup>=</sup> - Método turbidimétrico a partir da precipitação do sulfato de bário usando o colorímetro COLEMAN-295E.
- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Titulação com ácido sulfúrico usando metilorange como indicador.
- CO<sub>3</sub><sup>=</sup> - Titulação com ácido sulfúrico usando fenolftaleína como indicador.

#### 4.4.1. CÁLCULO DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA (SIC)

A presença de águas bicarbonatadas cálcicas nos levou a estudar a saturação das águas com relação à calcita através do cálculo do índice de saturação. O princípio do cálculo deste índice baseia-se na seguinte equação de equilíbrio:



sendo o produto de solubilidade ( $K_{ps}$ ) do sólido  $A_nB$  dado por:

$$(A^+)^n (B^{n-}) = K_{ps} \quad (4.14)$$

e o produto das atividades (Q) dos íons dissolvidos A e B dado por:

$$(A^+)^n (B^{n-}) = Q. \quad (4.15)$$

A relação entre  $K_{ps}$  e  $Q$  na solução aquosa indica o estado de saturação:

$Q = K_{ps}$ : o mineral está em equilíbrio com a solução.

$Q < K_{ps}$ : a solução está sub-saturada com relação a  $A_nB$  e provoca a dissolução da fase sólida existente.

$Q > K_{ps}$ : a solução é supersaturada e uma quantidade de  $A_nB$  deverá precipitar para estabelecer o equilíbrio.

O sistema  $CO_2/H_2O/CaCO_3$  pode ser esquematizado pelo seguinte conjunto de equações de equilíbrio (GALLO, 1977) expressas em função das respectivas constantes de equilíbrio,  $K$ , para cada um dos processos envolvidos:

a) Dissolução e hidratação do  $CO_2$



b) Ionização do ácido carbônico



c) Dissolução da calcita (carbonato de cálcio)



O índice de saturação da calcita (SIC) é calculado através da seguinte expressão:

$$\text{SIC} = \text{p}K_c - \text{p}K_2 + \text{pH} + \log a_{\text{Ca}^{2+}} + \log a_{\text{HCO}_3^-} \quad (4.21)$$

onde  $a_{\text{Ca}^{2+}}$  e  $a_{\text{HCO}_3^-}$  são as atividades do  $\text{Ca}^{2+}$  e do  $\text{HCO}_3^-$ .

As atividades ( $a_i$ ) são relacionadas com a molaridade por:

$$a_i = \gamma_i \cdot m_i \quad (4.22)$$

onde  $\gamma_i$  é o coeficiente de atividade que é função da interação de cada íon individual com todos os outros íons presentes na solução, que é expressa pela força iônica (I).

Para  $I \leq 0,01$ , o coeficiente de atividade iônica pode ser calculado pela lei limite de Debye-Hückel (ALBERTY, 1987) dada por:

$$\log \gamma_i = - A (z_i)^2 \cdot I^{1/2} \quad (4.23)$$

onde A é constante e igual a  $0,509 \text{ kg}^{1/2} \cdot \text{mol}^{-1/2}$ .

A força iônica é função da carga iônica ( $z_i$ ) e da concentração molar sendo expressa por:

$$I = \frac{1}{2} \sum (z_i)^2 \cdot m_i \quad (4.24)$$

Os valores numéricos das constantes  $pK_1$  e  $pK_2$  são respectivamente 8,35 (KRAUSKOPF, 1972) e 10,33 (SCHOELLER, 1969).

## 5- ANÁLISE ESTATÍSTICA FATORIAL

Nos últimos 30 anos, a análise fatorial tem sido extensivamente usada em muitos campos, como em socio-economia para interpretar dados de censos (HARMAN, 1976), em hidrologia de superfície para identificar áreas de precipitação homogênea e otimizar interpolações (MORIN et al, 1979), em estratigrafia e paleontologia (DAVIS, 1984), no gerenciamento de reservatórios (SAAD & TURGEON, 1988), em hidroquímica para entender processos hidrológicos afetando água subterrânea e salinidade do solo (DEVEREL, 1989; MELLOUL & COLLIN, 1992) e também tem sido aplicada para construir modelos conceituais de aquíferos profundos (MELLOUL, 1979).

A análise estatística de dados engloba dois grandes grupos de métodos: a) os chamados métodos fatoriais que procuram reduzir as dimensões do problema, permitindo uma interpretação num espaço de pequena dimensão e b) a classificação automática que trata da classificação dos objetos estudados em categorias, julgadas homogêneas, relativamente a um dado critério.

Cada observação, descrita pelas suas variáveis, é representada num espaço de grande dimensão e o conjunto de todas as observações forma uma nuvem de pontos neste espaço.

Os principais métodos fatoriais são a análise de componentes principais (HOTELLING, 1933), que é utilizada quando a nuvem de pontos é descrita por um conjunto de variáveis quantitativas (métrica euclidiana), e a análise de correspondências (BENZECRI, 1973), que é utilizada quando a nuvem de pontos é descrita por um conjunto de variáveis qualitativas. A análise das correspondências é um método de grande poder

descritivo, uma vez que a “métrica”, utilizada para medir distâncias entre os pontos, leva em consideração o caráter probabilístico dos dados.

Na descrição dos métodos fatoriais a seguir, foram consultados principalmente CAILLEZ & PAGES (1976) e VOLLE (1985).

## 5.1 ANÁLISE GERAL

Todos os métodos de análise fatorial têm em comum as seguintes etapas: construção de uma nuvem de pontos ponderados num espaço vetorial k-dimensional; disposição dos dados sob a forma de matriz; definição de uma “métrica”, sobre este espaço, para medir as “distâncias” entre os pontos; cálculo da inércia dessa nuvem; determinação de eixos fatoriais que maximizam a inércia da nuvem na base formada por esses eixos; interpretação gráfica. Os diferentes métodos diferem entre si sobretudo na definição dos pontos da nuvem, no peso atribuído a cada um destes pontos e na escolha da “métrica”. Uma vez definidos estes elementos, o mecanismo da análise é comum a todos os métodos.

Nas diversas aplicações, uma vez que a coleta de dados é realizada e representada por n observações, medidas sobre p variáveis, a nuvem de pontos, assim obtida no espaço  $R^p$ , dá origem a uma matriz  $X = [x_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , onde

$$x_i = \begin{pmatrix} x_i^1 \\ x_i^2 \\ \vdots \\ x_i^p \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.1)$$

A cada um dos  $n$  pontos é associada uma "massa"  $m_i$ . O conjunto de pontos,  $\mathcal{N} = \{(x_i, m_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ , assim obtido é chamado de nuvem de pontos.

Chama-se inércia de  $\mathcal{N}$ ,  $I_P$ , relativamente a um ponto  $P = (p^1, \dots, p^n)$  de  $R^p$  ou inércia total da nuvem, a expressão:

$$I_P = \sum_i m_i \|x_i - P\|^2 = \sum_i m_i (x_i - P)^T (x_i - P) \quad (5.2)$$

Na prática, o ponto  $P$  é a origem dos eixos ou centro de gravidade na nuvem  $\mathcal{N}$ . Inicialmente vamos considerar o ponto  $P$  na origem.

A inércia relativamente a uma direção  $\Delta u$ , dada pelo vetor unitário  $u$ , é definida a seguir:

Seja  $u = (u^1, u^2, \dots, u^p)$  um vetor de  $R^p$  de origem em  $P$ . Chama-se inércia relativamente a direção  $\Delta u$  a inércia relativamente a  $P$  dos pontos  $z_i$ , projeções ortogonais dos  $x_i$  sobre  $\Delta u$ , onde cada  $z_i$  é munido da massa  $m_i$ .

Supondo o ponto  $P$  na origem, temos:

$$I_{\Delta u} = \sum_i m_i \|z_i\|^2 \quad (5.3)$$

$$\text{onde } \|z_i\|^2 = z_i^T z_i = u^T x_i x_i^T u \quad (5.4)$$

Dessa maneira,

$$I_{\Delta u} = \sum_i m_i u^T x_i x_i^T u = u^T \left( \sum_i m_i x_i x_i^T \right) u = u^T V u \quad (5.5)$$

onde,  $V$  é a matriz quadrada  $p \times p$  de termo geral  $v_{jj} = \sum_i m_i x_i^j x_i^j$ , simétrica, pois  $v_{jj} = v_{jj}$ .

Esta matriz é diagonalizável e tem valores próprios reais. Além disso, podemos construir uma base ortonormalizada com os vetores próprios de  $V$ . A matriz  $V$  é denominada matriz de inércia da nuvem  $\mathcal{N}$ . É fácil verificar que os valores próprios de uma matriz de inércia são todos positivos ou nulos.

Chama-se de primeiro eixo fatorial, a direção do espaço  $R^p$  que maximiza a expressão  $u^T V u$  sob a restrição  $u^T u = 1$ . A determinação deste eixo pode ser feita utilizando os multiplicadores de Lagrange, bastando, para isto, determinar os extremos de  $L = u^T V u - \lambda u^T u$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = 2(Vu - \lambda u) = 0$$

$$Vu = \lambda u \quad (5.6)$$

Logo, o primeiro eixo fatorial é, necessariamente, um dos vetores próprios de  $V$ . Multiplicando ambos os lados por  $u^T$ , tem-se

$$u^T V u = \lambda = I_{\Delta u} \quad (5.7)$$

Decorre daí que o primeiro eixo fatorial é o vetor próprio  $u_1$  correspondente ao maior valor próprio,  $\lambda_1$ , de  $V$ . A inércia explicada por este eixo é igual a  $\lambda_1$ .

Relativamente a uma base ortonormalizada, a inércia da nuvem  $\mathcal{N}$  é, por definição, a inércia relativa a origem das projeções dos pontos da nuvem sobre o espaço, por esta base.

Determina-se, agora, o subespaço relativamente ao qual a inércia da nuvem  $\mathcal{N}$  é máxima. Para isso, vamos considerar  $k$  vetores ortonormais,  $u_1, u_2, \dots, u_k$ , com  $k \leq p$ . A inércia do subespaço gerado por estes  $k$  vetores é dada por

$$I_{[u_1, u_2, \dots, u_k]} = \sum_i m_i \|z_i\|^2 \quad (5.8)$$

onde agora,  $z_i$  é a projeção de  $x_i$  sobre esse subespaço. Da equação (5.4) é fácil ver que

$$\|z_i\|^2 = \sum_{r=1}^k u_r^T x_i x_i^T u_r \quad (5.9)$$

donde,

$$I_{[u_1, u_2, \dots, u_k]} = \sum_i m_i \left( \sum_{r=1}^k u_r^T x_i x_i^T u_r \right) = \sum_{r=1}^k u_r^T V u_r \quad (5.10)$$

O subespaço  $k$ -dimensional que maximiza a inércia  $I_{[u_1, u_2, \dots, u_k]}$  é gerado pelos  $k$  primeiros vetores próprios  $u_1, u_2, \dots, u_k$  de  $V$ . É claro que se  $k = p$ , a inércia explicada por  $u_1, u_2, \dots,$

$u_k$  é a inércia explicada pelo espaço inteiro. Da equação (5.10) tem-se que  $I_N = \sum_{\alpha=1}^P \lambda_{\alpha} \cdot A$

inércia da nuvem é então a soma dos valores próprios de  $V$ , isto é, o traço da matriz  $V$ .

Dessa maneira, a parte da inércia total explicada pelo  $r$ -ésimo eixo fatorial é dada por

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\sum_{\alpha=1}^p \lambda_\alpha} \quad (5.11)$$

e a parte da inércia total explicada pelo subespaço gerado por  $u_1, u_2, \dots, u_k$  é dada por

$$\sum_{\alpha=1}^k \tau_\alpha = \frac{\sum_{\alpha=1}^k \lambda_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^p \lambda_\alpha} \quad (5.12)$$

Muitas vezes é conveniente exprimir a inércia de uma nuvem relativamente ao seu centro de gravidade  $G$ , ao invés da origem. O centro de gravidade de  $\mathcal{N}$  é expresso por:

$$G = \frac{1}{m} \sum_i m_i x_i \quad \text{onde, } m = \sum_i m_i \quad (5.13)$$

De acordo com a equação (5.2) e usando (5.11), a inércia de  $\mathcal{N}$  relativamente a  $G$  é dada por:

$$I_{\mathcal{N}} = \sum_i m_i \|x_i - G\|^2 = \sum_i m_i \left\| x_i - \frac{1}{m} \sum_i m_i x_i \right\|^2$$

$$= \sum_i \sum_{i'} \frac{m_i m_{i'}}{m} (\|x_i\|^2 - x_i^T x_{i'}) \quad (5.14)$$

ou ainda, por:

$$I_{\mathcal{N}} = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_{i'} m_i m_{i'} \|x_i - x_{i'}\|^2 \quad (5.15)$$

Esta última relação mostra que quando se realiza uma análise fatorial de uma nuvem de pontos a partir de seu centro de gravidade, que é o caso da análise de correspondências e da análise de componentes principais, os eixos fatoriais são as direções do espaço ao longo das quais se conserva a melhor representação das distâncias.

O último passo da análise fatorial é a representação gráfica plana da projeção da nuvem sobre planos definidos por pares de eixos fatoriais. Na determinação dos eixos fatoriais, um algoritmo fornece a sequência  $(u_1, \lambda_1), (u_2, \lambda_2), \dots$  dos vetores próprios e dos valores próprios correspondentes de  $V$ . Esta sequência é obtida na ordem decrescente dos valores próprios. Os vetores próprios unitários  $u_\alpha$  são representados por suas coordenadas  $u_\alpha^j, j = 1, 2, \dots, p$ , no espaço  $R^p$ . Na prática, não se determina todos os vetores próprios de  $V$ , mas somente aqueles correspondentes aos maiores valores próprios (na maioria dos casos extraem-se no máximo 7 eixos fatoriais).

O cálculo das coordenadas dos pontos  $x_i$  sobre os eixos fatoriais é dado por:

$$F_\alpha(i) = u_\alpha^T x_i = \sum_j u_\alpha^j x_i^j \quad (5.16)$$

Assim, o ponto  $x_i$  pode ser representado em qualquer plano composto por dois eixos fatoriais quaisquer, sendo suas coordenadas dadas por  $F_\alpha(i)$  e  $F_\beta(i)$ . Avalia-se a qualidade da representação da nuvem sobre este plano pela quantidade  $\tau_\alpha + \tau_\beta$ , utilizando a equação (5.11).

## 5.2. ANÁLISE FATORIAL DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A análise de componentes principais é utilizada quando trata-se de uma “população” que é descrita por um conjunto de variáveis quantitativas e heterogêneas. Assim, a população poderia ser, por exemplo, o conjunto dos municípios do Ceará e cada um desses municípios é descrito segundo um conjunto de variáveis tais como número de habitantes, renda per capita, área, número de estabelecimentos escolares, etc., ou, para dar outro exemplo, uma população de mamíferos para a qual é feita uma série de medidas tais como altura, peso, perímetro do crânio, etc. Esses são exemplos de tabelas que podem ser tratadas pela análise em componentes principais. Em nosso estudo não se utiliza o método da análise fatorial de componentes principais. Os leitores interessados poderão consultar VOLLE (1985), por exemplo.

## 5.3. ANÁLISE FATORIAL DAS CORRESPONDÊNCIAS

A análise de correspondências é realizada da mesma forma da análise geral descrita na seção 5.1, utilizando-se, no entanto, como métrica a ‘distância’ do  $\chi^2$ .

De um modo geral, chamaremos de  $K$  a tabela dos dados com  $n$  linhas e  $p$  colunas. O caractere genérico das colunas será representado pela letra  $j$ , o caractere genérico das linhas pela letra  $i$  e a frequência do par  $(i,j)$  por  $k_i^j$ . Denotaremos

$$k_i = \sum_{j=1}^p k_i^j, \quad k^j = \sum_{i=1}^n k_i^j \quad \text{e} \quad k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p k_i^j \quad (5.17)$$

as somas dos elementos da linha  $i$ , da coluna  $j$  e da tabela  $K$ , respectivamente. Definiremos da mesma maneira uma tabela  $F$  com  $p$  colunas e  $n$  linhas na qual,

$$f_i^j = \frac{k_i^j}{k} \quad \text{é a frequência do par } (i,j).$$

Denota-se

$$f_i = \sum_{j=1}^p f_i^j = \frac{k_i}{k} \quad \text{e} \quad f^j = \sum_{i=1}^n f_i^j = \frac{k^j}{k}; \quad (5.18)$$

Temos então

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad \text{e} \quad \sum_{j=1}^p f^j = 1. \quad (5.19)$$

Também defini-se uma outra tabela  $X$  com  $n$  linhas e  $p$  colunas, onde

$$x_i^j = \frac{k_i^j}{k_i} = \frac{f_i^j}{f_i}. \quad (5.20)$$

Obtem-se cada elemento da linha  $i$  da tabela  $X$  dividindo o elemento correspondente da linha  $i$  da tabela  $K$  pela soma  $k_i$  dos elementos desta linha. Com o auxílio da tabela  $K$ , que tem os dados brutos, cada caractere  $i$  pode ser representado em  $R^p$  pelo ponto  $P_i$  cujas coordenadas constituem a  $i$ -ésima linha da tabela  $K$ . Da mesma maneira, com o auxílio da tabela  $X$ , pode-se associar, a este mesmo caractere, o ponto  $x_i$  de  $R^p$  com coordenadas  $(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^p)$ . Desde que,

$$\sum_{j=1}^p x_i^j = \sum_{j=1}^p \frac{k_i^j}{k_i} = 1 \quad (5.21)$$

pode-se ver que o ponto  $x_i$  pertence ao simplex  $\chi$  de  $R^p$  definido por,

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^p x^j = 1 \\ x^j \geq 0 \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (5.22)$$

Se duas variáveis  $i$  e  $i'$  têm o mesmo perfil, ou seja, se as linhas  $i$  e  $i'$  da tabela  $K$  são proporcionais, essas variáveis podem ser consideradas como equivalentes e seus pontos representativos  $P_i$  e  $P_{i'}$  estão alinhados sobre uma reta passando por  $O$ . A transformação

que consiste a considerar a tabela X, em lugar da tabela K, nos permite representar esses dois pontos pelo único ponto  $x_i$ , interseção da reta  $OP_iP_i'$ , com o simplex definido acima.

Associa-se assim, a cada caractere  $i$ , um ponto  $x_i$  do simplex; este ponto será munido da massa  $f_i = \frac{k_i}{k}$  que representa a importância relativa do caractere  $i$  e compensa a perda dessa informação por ocasião da identificação de  $P_i$  com  $x_i$ .

Seja  $\mathcal{N} = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, n\}$  a nuvem de pontos assim ponderados. Por definição o centro de gravidade de  $\mathcal{N}$  é o ponto  $G$ , de  $\mathbb{R}^p$ , tal que

$$G = \sum_{i=1}^n f_i x_i \quad (5.23)$$

cujas coordenadas são

$$(g^1, \dots, g^j, \dots, g^p), \text{ onde } g^j = \sum_{i=1}^n f_i x_i^j = f^j. \quad (5.24)$$

Como  $\sum_{j=1}^p f^j = 1$ , o ponto  $G$  pertence também ao simplex.

A métrica do  $\chi^2$  é definida por:

$$d^2(x_i, x_{i'}) = \|x_i - x_{i'}\|_{\chi^2} = \sum_{j=1}^p \frac{1}{f_j} (x_i^j - x_{i'}^j)^2 = \sum_{j=1}^p \frac{1}{f_j} \left( \frac{f_i^j}{f_i} - \frac{f_{i'}^j}{f_{i'}} \right)^2 \quad (5.25)$$

Uma das razões da escolha desta distância é que se as colunas  $j$  e  $j'$  de  $K$  são proporcionais, a distância entre duas linhas  $i$  e  $i'$  não é afetada quando se substitui essas duas colunas por uma só coluna, cujas coordenadas são as somas das coordenadas correspondentes.

Diferentemente da Análise de Componentes Principais, a Análise Fatorial das Correspondências não pode ser realizada diretamente a partir da Análise Geral, uma vez, que a métrica utilizada é a “distância do  $\chi^2$ ”.

É fácil verificar que as distâncias entre pontos da nuvem  $\mathcal{N}$ , medidas pela métrica do  $\chi^2$ , são iguais às distâncias medidas entre os pontos correspondentes pela métrica euclidiana usual de uma nuvem construída a partir da nuvem  $\mathcal{N}$  pela transformação

$$x_i = \begin{pmatrix} \frac{f_i^1}{f_i} \\ \frac{f_i^2}{f_i} \\ \vdots \\ \frac{f_i^p}{f_i} \end{pmatrix} \rightarrow x_{i'} = \begin{pmatrix} \frac{f_i^1}{\sqrt{f_i^1 f_i}} \\ \vdots \\ \frac{f_i^p}{\sqrt{f_i^p f_i}} \end{pmatrix} \quad (5.26)$$

Da equação (5.24) tem-se então:

$$d^2(x_i, x_{i'}) = \sum_{j=1}^p \frac{1}{f_j} (x_i^j - x_{i'}^j)^2 = \sum_{j=1}^p \left( \frac{f_i^j}{\sqrt{f_i^j f_i}} - \frac{f_{i'}^j}{\sqrt{f_{i'}^j f_{i'}}} \right)^2 \quad (5.27)$$

Da mesma maneira, a transformação

$$y^j = \begin{pmatrix} f_1^j \\ f^j \\ \vdots \\ f_n^j \\ f^j \end{pmatrix} \rightarrow y^{*j} = \begin{pmatrix} \frac{f_1^j}{\sqrt{f_1 f^j}} \\ \vdots \\ \frac{f_n^j}{\sqrt{f_n f^j}} \end{pmatrix} \quad (5.28)$$

transforma a nuvem  $\mathcal{N}$  numa outra nuvem conservando as mesmas distâncias entre os pontos  $j$  quando se utiliza a métrica euclidiana usual.

Vê-se assim que é equivalente fazer a análise fatorial da nuvem  $\mathcal{N}$ , usando a métrica do  $\chi^2$ , ou fazer a análise da nuvem  $\mathcal{N}$  transformada, usando a métrica euclidiana. Optando pela nuvem  $\mathcal{N}$ , os resultados da análise geral podem ser utilizados.

#### 5.4. ANÁLISE FATORIAL DISCRIMINANTE

De um modo geral, os métodos fatoriais procuram extrair estruturas existentes em espaços de grandes dimensões, oriundas de observações caracterizadas a partir de um certo número de variáveis.

A visualização destas estruturas é obtida, ainda que com deformações, cuja magnitude é determinada, com a redução da dimensão do espaço de representação das observações, ou espaço de representação dos indivíduos.

No caso da análise fatorial discriminante, a cada indivíduo ou observação, sobre o qual são medidas estas variáveis, é atribuído um caractere dentro de um grupo de

caracteres. Por exemplo, se os indivíduos sobre os quais são medidas as variáveis são os alunos recém ingressos na Universidade e as variáveis que os caracterizam são as médias das notas das diversas disciplinas dos últimos anos do curso secundário, poderia associar-se a cada um deles o curso escolhido por ele na Universidade. Isto é, a cada vetor cujas componentes são as médias das disciplinas associa-se um dos caracteres do grupo de caracteres representando os diversos cursos da Universidade. Cada aluno é assim representado por um ponto no espaço vetorial definido pelas médias de suas notas, e o conjunto desses pontos forma uma nuvem que pode ser considerado como o conjunto das sub-nuvens formadas pelos diversos grupos definidos pelos cursos que cada aluno escolheu na Universidade.

A análise discriminante interessa-se, essencialmente, por este conjunto de sub-nuvens que compõem o conjunto total das observações, e que se originam da variável qualitativa que a cada observação associa uma de suas modalidades. Pergunta-se: Estas sub-nuvens se distinguem uma das outras no espaço em que estão imersas, ou, ao contrário, o nível de interseção entre elas é tal que não permite uma discriminação razoável entre as diversas modalidades a partir das variáveis definindo cada observação?

No exemplo acima, as médias das notas obtidas nas disciplinas consideradas são determinantes na escolha do curso da Universidade, ou ao contrário, nada representa no momento da escolha do curso?

Na mesma ordem de idéias, as oscilações de temperatura em diversas áreas do Oceano Pacífico, num determinado período do ano, decidem sobre a quantidade de chuvas no “inverno” nordestino?

Seja  $N$  o número de indivíduos sobre os quais são medidas  $K$  variáveis quantitativas. Supondo estas variáveis centradas, os  $N$  indivíduos representam no espaço  $R^K$  uma nuvem

$\mathcal{N}(I)$  de pontos com centro de gravidade na origem de  $R^K$ , onde a cada ponto associou-se a massa unitária. No espaço  $R^K$  cada indivíduo  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  é representado pelo vetor

$$x_i = \begin{pmatrix} x_{i1} \\ \vdots \\ x_{ik} \end{pmatrix} \quad (5.29)$$

e o conjunto de todos os indivíduos pela matriz

$$X = (x_1, \dots, x_n). \quad (5.30)$$

A associação de cada um dos indivíduos a uma e só uma das modalidades de uma variável qualitativa  $Y$  divide a nuvem  $\mathcal{N}(I)$  em sub-nuvens  $\mathcal{N}(I_k)$ , onde  $I_k$  é o conjunto dos indivíduos tendo a modalidade  $k$  de  $Y$ . Cada uma das sub-nuvens  $\mathcal{N}(I_k)$  tem centro de gravidade denotado por  $G_k$ , e a nuvem de  $R^K$ , constituída por estes centros de gravidade, é denotada por  $\mathcal{N}(G)$ . Cada um destes centros de gravidade é munido da massa  $n_k$ , onde  $n_k$  é o número de indivíduos da nuvem  $\mathcal{N}(I_k)$ .

O espaço  $R^K$  estando munido de uma métrica, denotada por  $\| \cdot \|$ , a inércia da nuvem  $\mathcal{N}(I)$  relativamente a um ponto  $P \in R^K$  é definida por

$$I_P(\mathcal{N}(I)) = \sum_{i=1}^n m_i \|x_i - P\|^2 \quad (5.31)$$

onde,  $m_i$  é a massa associada a cada ponto  $x_i$ . No caso da nuvem  $\mathcal{N}(I)$ ,  $m_i=1$ , isto é, todos os indivíduos da nuvem têm a mesma importância na análise, a inércia mede a proximidade da nuvem ao ponto P. Normalmente P é o centro de gravidade.

Relativamente a uma direção U passando por P, a inércia da nuvem  $\mathcal{N}(I)$  é definida como a inércia das projeções ortogonais dos pontos da nuvem sobre a direção U, relativamente ao ponto P.

A matriz  $S = XX^T$ , onde  $X^T$  é a transposta da matriz X, tendo k linhas e k colunas, é denominada matriz de inércia da nuvem  $\mathcal{N}(I)$ . Ela permite calcular a inércia relativamente a qualquer direção  $U \in R^K$ , através da fórmula,  $U^T S U$ .

Relativamente aos respectivos centros de gravidade, a relação entre as inércias das diferentes nuvens consideradas é dada pelo teorema de Huggens

$$I(\mathcal{N}(I)) = I(\mathcal{N}(G)) + \sum_k I(\mathcal{N}(I_k)). \quad (5.32)$$

Denotando-se por S, E e D as matrizes de inércia das nuvens respectivas  $\mathcal{N}(I)$ ,  $\mathcal{N}(G)$  e  $\mathcal{N}(I')$ , onde  $\mathcal{N}(I')$  é a nuvem de pontos de  $R^K$  constituída dos pontos  $z_i = x_i - G_k$ ,  $i = 1, \dots, n$ , e onde  $G_k$  é o centro de gravidade do grupo ao qual pertence o  $x_i$ . A relação entre as inércias relativamente a uma direção U de  $R^K$  é dada por

$$U^T S U = U^T E U + U^T D U. \quad (5.33)$$

Se a nuvem de pontos representativa dos indivíduos encontra-se num espaço de grande dimensão ( $K \geq 3$ ), a representação geométrica destes pontos no espaço não é visível,

dado a limitação do olho humano. Desta maneira, é difícil saber se as diversas sub-nuvens, obtidas pela associação de cada indivíduo a uma das modalidades da variável qualitativa Y, se apresentam isoladas (ou mais ou menos isoladas) neste espaço. Neste caso, recordando o exemplo, as médias das disciplinas no curso secundário são determinantes na escolha do curso na Universidade, ou se, ao contrário, o nível de interseção entre estas sub-nuvens é elevado, e, neste caso, as médias das disciplinas nada tem a ver com a escolha do curso na Universidade.

O objetivo da análise discriminante é tornar visível a relação entre as diversas sub-nuvens, ou seja, visualizar a discriminação entre os diversos grupos gerados pela variável qualitativa Y. Para tanto, numa primeira etapa procura-se no  $R^k$  a direção U, segundo a qual a projeção dos indivíduos nesta direção é melhor discriminada pelas suas modalidades. Em seguida, procura-se a direção ortogonal à primeira direção obtida, de tal maneira que no espaço de dimensão 2, formado por estas duas direções, tenha-se a melhor discriminação das projeções dos indivíduos, e assim sucessivamente.

Segundo uma certa direção U, os diversos grupos serão melhor discriminados quanto maior for a dispersão entre os diversos centros de gravidade destes grupos e quanto menor for a dispersão entre os indivíduos de um mesmo grupo. Em termos de inércia, utilizando a notação da fórmula (5.33), o problema se reduz a determinar a direção U de  $R^k$ , tal que

$$\frac{U^T E U}{U^T S U} \text{ seja máximo.} \quad (5.34)$$

A solução do problema assim posto é obtida utilizando-se multiplicadores de Lagrange e a direção  $U$  procurada é o vetor próprio de  $D^{-1}E$  correspondente ao maior de seus valores próprios.

A determinação das demais direções ortogonais na procura do espaço, sobre o qual a projeção da nuvem melhor discrimine os grupos, não pode ser feita diretamente dos vetores próprios de  $D^{-1}E$ , uma vez que esta matriz não é simétrica, e desta maneira suas direções principais não são ortogonais. O problema, no entanto, é resolvido por meio dos resultados seguintes (VOLLE, 1985):

a) É equivalente se fazer uma análise discriminante ou uma análise fatorial da nuvem  $\mathcal{N}(G)$ , utilizando a métrica  $D^{-1}$ .

b) É equivalente fazer a análise fatorial de  $\mathcal{N}(G)$  utilizando-se a métrica  $D^{-1}$  ou diagonalizar  $D^{-1/2}ED^{-1/2}$ .

Os vetores próprios de  $D^{-1/2}ED^{-1/2}$  formam uma base ortonormal do espaço  $R^N$  e se  $L_\alpha$  é o  $\alpha$ -ésimo destes vetores, a projeção do indivíduo  $x_i$  sobre  $L_\alpha$  tem por abcissa

$$x_i^T D^{-1/2} L_\alpha = x_i^T U_\alpha \quad (5.35)$$

onde  $U_\alpha$  é o  $\alpha$ -ésimo vetor próprio de  $D^{-1}E$ .

De modo que, do ponto de vista do cálculo, estas equivalências mostram que a análise discriminante é feita determinando-se os vetores próprios de  $D^{-1}E$ , marcando-se, em seguida, sobre o sistema de eixos ortogonais  $\{L_\alpha, \alpha=1, \dots, n\}$ , as abcissas dos pontos  $x_i$  obtidas por  $x_i^T U_\alpha$ .

Em termos de cálculo, a análise discriminante envolve muitas operações, podendo tornar-se rapidamente impraticável, se o número de variáveis que caracterizam os indivíduos for elevado, pois a matriz a diagonalizar  $D^{-1}E$  é de dimensão  $K$ . Esta é a razão pela qual, numa tal análise, procura-se limitar o número de variáveis excluindo, por exemplo, do conjunto de variáveis que caracterizam os indivíduos, variáveis fortemente correlacionadas com outras variáveis já definidas, ou de um modo geral, substituindo um conjunto de variáveis fortemente correlacionadas por uma combinação linear destas, que conserve ao máximo a informação por elas fornecida. É o caso de se preceder a análise discriminante por uma análise fatorial e considerar, em seguida, as primeiras componentes principais como variáveis na análise discriminante. A vantagem de redefinir estas novas variáveis é que elas são duas a duas não correlatas e a importância de cada uma delas na análise é conhecida e dada pelo valor próprio associado.

Uma outra maneira de reduzir os cálculos é utilizar o processo conhecido como “passo a passo”, que consiste no seguinte critério de relação das variáveis previamente definidas: toma-se inicialmente dentre estas variáveis aquela que, considerada sozinha na análise, torna máxima a relação (variância inter classes)/(variância intra classes). Em seguida considera-se, dentre as variáveis restantes aquela que, juntamente com a primeira escolhida torna máxima a relação acima. Continuando o processo pode-se chegar rapidamente a um resultado aceitável. Neste trabalho foi utilizado o método “passo a passo”.

Os programas modernos de análise discriminante fornecem, além dos eixos e planos que melhor discriminam os grupos, resultados que nos permitem avaliar o grau de precisão na discriminação, assim como a possibilidade de decidir a qual dos grupos deve pertencer um indivíduo considerado como elemento suplementar na análise.

## 6- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho de tese tem como objetivo estudar a dinâmica da água subterrânea na Bacia Sedimentar do Cariri. Para isto, apresentaremos neste capítulo os resultados isotópicos e hidroquímicos obtidos. Todas as amostras foram coletadas em viagens de campo sistemáticas à região do Cariri durante o período deste trabalho. Todas as análises de carbono-14 e trítio foram realizadas nos Laboratórios de Carbono-14 e Trítio do Departamento de Física da UFC, todas as medidas de carbono-13, oxigênio-18 e deutério foram realizadas na HYDROISOTOP/Alemanha para este trabalho, todas as medidas de química, com exceção dos dados hidroquímicos das fontes, foram realizadas no Departamento de Solos da UFC, também especificamente para este trabalho, todos os valores de condutividade elétrica foram medidos "in loco" durante as viagens de campo. Os dados restantes como os de hidroquímica das fontes, vazão para as fontes maiores e dados geológicos foram retirados da literatura.

Os resultados serão apresentados em quatro etapas: 1) Água subterrânea na Chapada do Araripe; 2) Água subterrânea no Vale do Cariri; 3) Análise fatorial dos dados; 4) Modelo fenomenológico.

### 6.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA NA CHAPADA DO ARARIPE

Para estudar o armazenamento de água subterrânea na Chapada do Araripe coletamos água de um conjunto representativo de fontes, principal exutório destas águas

subterrâneas. Medidas químicas e isotópicas permitiram separar fontes quanto a sua formação de origem.

Apresentamos na Tabela 6.1 localização, município, coordenada geográfica obtida com GPS, condutividade elétrica (CE), valor de oxigênio-18 e vazão (Q) para um conjunto de fontes na falésia da Chapada do Araripe. Os dados de vazão disponíveis são somente para as fontes de maior vazão e foram fornecidos por MONT'ALVERNE et al. (1995). Estas fontes, com valores de condutividade elétrica inferiores a 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , na mesma faixa de valores das chuvas na área, foram identificadas como surgências do contato das Formações Exu/Arajara.

Tabela 6.1. Condutividade elétrica (CE) e oxigênio-18 para as fontes de maior vazão (Q) na região do Cariri. Ct: Crato, MV: Missão Velha, Bb: Barbalha, Po: Porteiras e Jd: Jardim. \*Fonte: MONT'ALVERNE et al., 1995.

Local - Município	Lat. S	Long. W	Q* ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Ambiente
Batateira - Ct	7°15'35"	39°28'17"	376	-3,2	28	Exu /Arajara
Sozinho - Ct	7°19'15"	39°24'48"	154	-	17	Exu /Arajara
Coqueiro - Ct	7°17'02"	39°25'57"	140	-	23	Exu /Arajara
Água Grande - Ct	7°17'15"	39°24'58"	113	-	25	Exu /Arajara
Pendência - MV	7°24'35"	39°12'46"	352	-3,4	25	Exu /Arajara
Dr. P. Madeira -MV	7°24'41"	39°13'01"	-	-3,4	23	Exu /Arajara
Bica do Farias - Bb	7°19'50"	39°24'45"	348	-	27	Exu /Arajara
Sítio Cocos - Bb	7°22'36"	39°17'14"	182	-	19	Exu /Arajara
Bom Jesus - Bb	7°22'39"	39°17'19"	180	-	30	Exu /Arajara
Camelo - Bb	7°22'23"	39°20'33"	120	-	15	Exu /Arajara
Santa Rita - Bb	7°21'21"	39°18'48"	102	-	15	Exu /Arajara
Sítio Saco - Po	7°29'38"	39°09'45"	182	-	20	Exu /Arajara
Boca da Mata - Jd	7°33'20"	39°16'21"	132	-	26	Exu /Arajara
Cafundó - Jd	-	-	-	-2,9	26	Exu /Arajara

Na Tabela 6.2 apresentamos outro conjunto de fontes com as variáveis da Tabela 6.1, exceto a vazão. As condutividades elétricas dessas fontes estão entre 69  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 266  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Tabela 6.2. Condutividade elétrica (CE) e oxigênio-18 para outras fontes na região do Cariri. Ct: Crato, BS: Brejo Santo, Ex: Exu, Jd: Jardins, MV: Missão Velha, Mi: Milagres e NO: Nova Olinda.

Local - Município	Lat. S	Long. W	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Ambiente
Angélica - Ct	7°12'46"	39°26'33"	-	69	Arajara
Olho d'água - BS	7°28'05"	39°04'49"	-	77	Arajara
Recanto - Ex	7°25'33"	39°50'25"	-	118	Arajara
Solzinho - Jd	7°34'43"	39°16'17"	-3,5	234	Arajara/Santana
Macaúba - MV	7°12'46"	39°39'06"	-	266	Arajara/Santana

Observamos nas Tabelas 6.1 e 6.2 que as condutividades elétricas das fontes na falésia podem ser classificadas em três grupos distintos. No primeiro, as fontes têm valores até no máximo 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabela 6.1), no segundo, as fontes Angélica, Olho d'água e Recanto, têm condutividades elétricas de 69  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 77  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 118  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, e no terceiro, as fontes Solzinho e Macaúba têm 234  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 266  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente (Tabela 6.2). Esse crescimento na condutividade elétrica vem do fato de que à medida que a água vai penetrando, vai dissolvendo mais sais; assim, as fontes do primeiro grupo apresentam valores de condutividade elétrica menores do que as fontes do segundo grupo, que por sua vez apresentam valores de condutividade elétrica menores do que a do terceiro grupo.

Apresentamos na Tabela 6.3 dados de trítio, condutividade elétrica (CE), localização, município e o registro geral (RG) de laboratório de um conjunto de fontes. A

concentração de trítio, expressa em TU, nas chuvas é representada pelos valores das cisternas, também apresentadas na Tabela 6.3, que correspondem à média ponderada das precipitações, uma vez que a cisterna é um reservatório que armazena água de chuva. Assim, a concentração média para as chuvas na região do Cariri é de  $3,2 \pm 0,6$  TU. A condutividade elétrica média de  $25 \pm 6$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  para as cisternas.

Tabela 6.3. Trítio em cisternas (Ci) e fontes (F) na região do Cariri. RG: registro geral, CE: condutividade elétrica, Ct: Crato e Bb: Barbalha.

RG	Local - Município	Trítio (TU)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Tipo
2596	Lameiro/AABEC -Ct	$1,3 \pm 0,3$	26	fonte
2697	Batateira - Ct	$0,6 \pm 0,4$	29	fonte
2697	Batateira - Ct	$0,3 \pm 0,4$	29	fonte
2698	Serrano - Ct	$0,3 \pm 0,4$	29	fonte
2562	Granjeiro Clube - Ct	$0,9 \pm 0,4$	14	fonte
2675	Bom Jesus - Bb	$0,9 \pm 0,4$	28	fonte
2676	João Coelho - Bb	$1,3 \pm 0,4$	29	fonte
2700	Granjeiro\SAAEC-Ct	$0,7 \pm 0,4$	13	fonte
2568	Farias - Bb	$0,9 \pm 0,4$	26	fonte
2568	Farias - Bb	$0,6 \pm 0,4$	25	fonte
2613	Faz. Travessia - Ct	$3,0 \pm 0,4$	24	cisterna
2703	IBDF - Ct	$3,3 \pm 0,5$	25	cisterna

Para as fontes, os valores de trítio estão entre 0,3 TU e 1,3 TU, menores que o valor de trítio para as chuvas. Os valores variam de acordo com o tempo transcorrido desde a entrada até a saída de água nas fontes. Os valores de condutividade elétrica para estas fontes estão entre 13  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 29  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , da mesma ordem dos valores das fontes apresentadas na Tabela 6.1. Portanto, identificamos essas fontes como provenientes também do contato Exu/Arajara.

### 6.1.1 HIDROQUÍMICA DAS FONTES NA CHAPADA DO ARARIPE

No corpo deste trabalho não foram realizadas medidas químicas das fontes da região. A fim de complementar os dados isotópicos com dados químicos, discutiremos os resultados hidroquímicos para fontes na região do Cariri retirados do trabalho de SANTIAGO, et. al. (1988) que analisaram os íons mais abundantes ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{--}$ ) em 10 fontes cujos resultados são apresentados na Tabela 6.4. Com exceção das fontes em Santana do Cariri (F1, F2 e F3), as demais têm condutividade elétrica entre 11  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 24  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e pH entre 5,2 e 6,8, que são valores próximos aos valores encontrados em águas de chuva. Os valores de pH mais elevados correspondem às fontes F1, F2 e F3 que também apresentam os maiores valores de condutividade elétrica e evidenciam circulação mais profunda, com maior tempo de trânsito, ou seja, devem ser surgências da Formação Arajara. O cálcio é traço na maioria das fontes, exceto em duas delas (F2 e F3) com valores de 6,6 mg/L e 3,0 mg/L, respectivamente.

Tabela 6.4. Hidroquímica de fontes no Cariri. Fonte: SANTIAGO et. al., 1988.  
Bb: Barbalha, Ct: Crato, SC: Santana do Cariri e Po: Porteiras.

Nº	Local - Município	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Concentração (mg/L)							
				$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{--}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$
F1	B. dos Azedos-SC	49	5,6	<1	>1	8,0	0	10,0	>4	7,7	0
F2	Faz. Nicássio-SC	91	8,7	6,6	4,2	6,6	4,7	16,0	12,6	17,7	>6
F3	Sítio Ciló-SC	35	7,5	3,0	1,8	3,5	1,0	3,0	>4	21,7	0
F4	Lameiro-Ct	22	5,3	>1	>1	3,5	0,35	3,0	aus	7,7	0
F5	Batateiras-Ct	24	5,3	>1	>1	4,0	0,35	3,0	>4	7,7	0
F6	St. Ernani Silva-Ct	12	5,2	>1	>1	1,3	0,35	3,0	aus	3,1	0
F7	Serrano Clube-Ct	11	5,4	>1	>1	1,8	0,35	3,0	>4	3,1	2,0
F9	Guariba-Ct	18	5,3	>1	>1	3,5	0	2,5	>4	3,1	2,0
F10	F. do Camelo-Bb	13	5,7	>1	>1	2,2	1,0	1,3	>4	3,8	2,0
F14	F. Alberino-PO	12	6,3	>1	>1	2,2	0	2,0	>4	3,1	2,0

Na Figura 6.1 o diagrama de Piper (PIPER, 1944) com dados das fontes mostra que as mesmas são sódicas bicarbonatadas ou cloretadas. Estes resultados mostram que estas fontes são imaturas quimicamente, ou seja, o tempo de permanência da água nas formações não é suficiente para que fosse atingida uma estabilidade química.

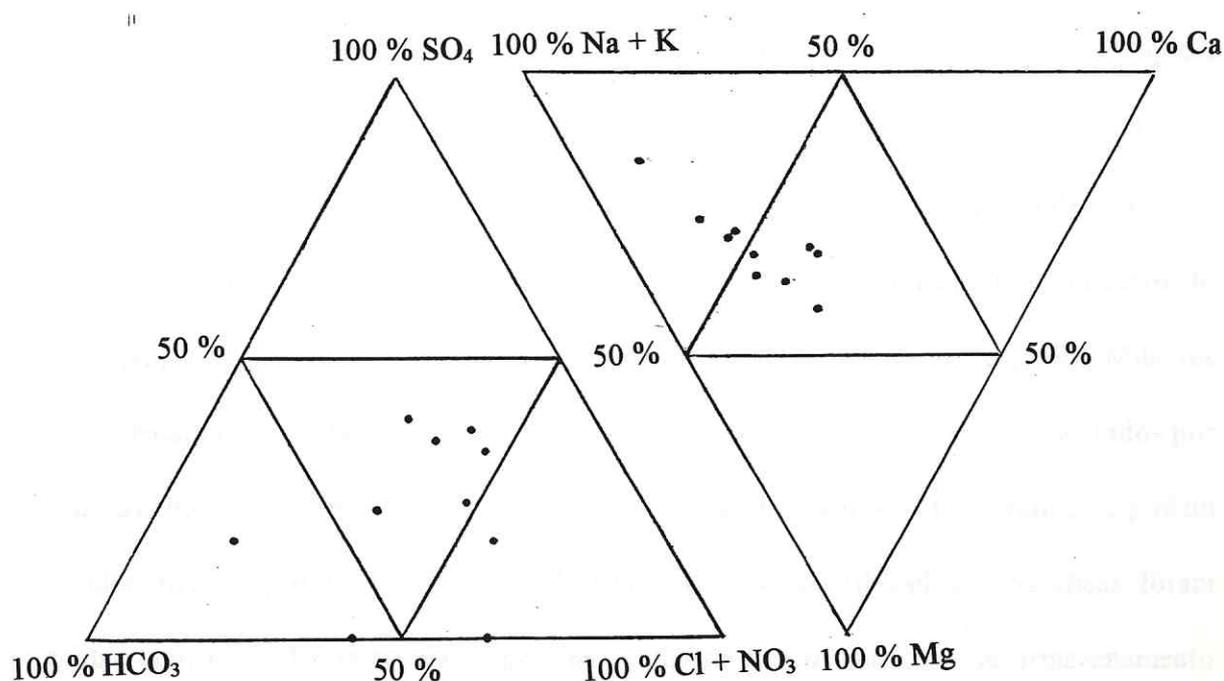


Figura 6.1. Diagrama de Piper para fontes no Cariri.

## 6.2. ÁGUA SUBTERRÂNEA NO VALE DO CARIRI

O estudo das águas subterrâneas no Vale do Cariri é feito aqui através de medidas isotópicas e químicas de amostras representativas das formações aquíferas e de misturas destes armazenamentos. Amostramos poços em 8 municípios da região. É importante observar que os poços na região não são poços de pesquisa e sim de exploração. Assim, a

grande maioria das amostras é na verdade uma mistura dos tipos de armazenamento da região, uma vez que, muitas vezes, os filtros são colocados em mais de uma formação aquífera. No Apêndice I são apresentados alguns perfis geológicos característicos da região.

Apresentamos na Tabela 6.5 dados de trítio, condutividade elétrica (CE), localização, município e o registro geral (RG) de laboratório de um conjunto de 28 poços. Os valores de trítio estão entre o valor mínimo de detecção ( $< 0,3$  TU) e  $2,8$  TU que é um valor próximo da concentração de trítio nas chuvas da região que é de  $3,2 \pm 0,6$  TU.

Nas Tabelas 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 apresentamos dados de profundidade (P), oxigênio-18, carbono-14 e condutividade elétrica (CE) para poços nos municípios de Juazeiro do Norte (Jz), Crato (Ct), Barbalha (Bb), Nova Olinda (NO), Missão Velha (MV), Milagres (Mi), Abaiara (Ab) e Brejo Santo (BS) no Vale do Cariri. Os poços estão representados por números (P5, por exemplo) que serão utilizados para representá-los nos gráficos e podem ser identificados por um registro geral (RG). As suas coordenadas geográficas foram obtidas com GPS. Essas tabelas representam quatro grupos distintos de armazenamento subterrâneo, tendo como critério de separação os perfis geológicos, as medidas isotópicas e as medidas de condutividade elétrica.

Ao Grupo 1 (Tabela 6.6) pertencem os poços que captam água do aquífero livre, principalmente localizados no município de Crato. O valor médio de  $\delta^{18}\text{O}$  deste grupo de amostras é  $-3,1 \pm 0,17$  ‰, da ordem do valor das chuvas atuais, e os valores de condutividade elétrica são no máximo  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

No Grupo 2 (Tabela 6.7) estão poços que segundo o seu perfil geológico, captam águas dos aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha e estão localizados, na sua maioria, no município de Juazeiro do Norte, com alguns poços no município de Barbalha, onde há um forte tectonismo com a presença de “grabens” e “horsts”. Neste grupo, os valores de

oxigênio-18 estão na faixa entre -3,9 ‰ e -3,2 ‰, os valores de carbono-14 entre 30,3 % e 99,2 % e os valores de condutividade elétrica entre 213  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 299  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com exceção dos poços P6 (522  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e P10 (375  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) que captam água principalmente do aquífero Missão Velha de acordo com seus perfis geológicos.

Tabela 6.5. Trítio da água dos poços (P) na região do Cariri. RG: registro geral, CE: condutividade elétrica, Ct: Crato, Bb: Barbalha e Jz: Juazeiro do Norte.

RG	Nº	Local - Município	Trítio (TU)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
2669	P5	Rch. Macacos, 2 - Jz	$2,8 \pm 0,5$	165
2601	P7	Tupinambá, 1 - Bb	$1,1 \pm 0,4$	332
2671	P8	Tupinambá, 2 - Bb	$1,1 \pm 0,4$	199
2341	P12	Faz. Janaguba - Ct	$1,2 \pm 0,3$	32
2603	P19	Sítio S. Pedro -Bb	$0,8 \pm 0,4$	201
2339	P20	St.Monte Alegre-Ct	$0,7 \pm 0,4$	497
2689	P21	Colégio Agrícola -Ct	$0,9 \pm 0,4$	46
2686	P22	Vila Pe Cícero - Ct	$1,1 \pm 0,3$	103
2687	P24	Rodoviária - Ct	$0,7 \pm 0,4$	141
2688	P26	Conj. Mirandão -Ct	$0,9 \pm 0,4$	226
2677	P27	Lagoa Seca, 10 -Jz	$2,1 \pm 0,4$	86
2678	P28	Lagoa Seca, 11 -Jz	$2,4 \pm 0,4$	187
2347	P29	Lagoa Seca, 16 -Jz	$0,9 \pm 0,4$	230
2679	P29	Lagoa Seca, 16 -Jz	$1,6 \pm 0,4$	235
2348	P30	Malvinas - Bb	$0,9 \pm 0,4$	343
2350	P31	Usina, prof. 200-Bb	$0,7 \pm 0,4$	363
2681	P38	Rch. Macacos 7 - Jz	$1,4 \pm 0,4$	264
2680	P40	Lagoa Seca 17 - Jz	$2,2 \pm 0,5$	162
2690	P41	Batateira-lav.- Ct	$2,0 \pm 0,4$	338
2691	P42	SESI - Ct	$2,9 \pm 0,4$	657
2672	P44	Hp. S. Vicente - Bb	$1,0 \pm 0,3$	591
2673	P45	Cabeceiras - Bb	$1,3 \pm 0,4$	225
2610	P46	Vila Alta, 2 -Ct	$0,9 \pm 0,4$	242
2674	P53	Bela Vista -Bb	$0,8 \pm 0,4$	517
2684	P55	S. R. do Novo -Ct	$0,9 \pm 0,4$	149
2611	P57	Vila Alta, 3 - Ct	$0,9 \pm 0,4$	267
2682	P58	Rch. Macacos, 1 - Jz	$1,7 \pm 0,4$	258
2683	P59	Rch. Macacos, 6 - Jz	$< 0,3$	438

Tabela 6.6. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica (CE) para poços no Grupo 1. RG: Registro Geral.

RG	Nº	Local - Município	Lat. S	Lat. W	P (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{14}\text{C}$ (pMC)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
2765	P26	Cj. Mirandão -Ct	7°14'11"	39°23'51"	102	-3,0	91,4 ± 0,8	198
2500	P27	Lagoa Seca 10-Jz	7°14'51"	39°19'19"	91	-3,3	80,8 ± 0,5	98
2778	P47	Cafundó 5 - Ct	7°14'26"	39°24'20"	110	-3,0	98,8 ± 0,8	183
2558	P54	SENAI -Ct	7°13'34"	39°23'49"	95	-2,9	-	191
2780	P55	S.R. do Novo -Ct	7°13'49"	39°25'37"	130	-3,1	104,2 ± 1,1	144
2822	P63	Lagoa Seca,15-Jz	7°15'43"	39°19'20"	130	-3,1	-	157
2781	P67	Floresta -Ct	7°14'29"	39°24'59"	129	-3,1	-	113
2823	P69	S. Raimundo,4-Ct	7°13'47"	39°25'31"	100	-2,8	-	169
2824	P70	Café da Linha-Ab	7°17'54"	39°02'05"	60	-2,9	-	79
2846	P77	Esc. Limoeiro-Mi	7°18'29"	38°57'54"	50	-3,5	-	98
2849	P79	Sizani-Ct	7°13'20"	39°25'20"	120	-3,1	-	174
2850	P80	Recanto 1 -Ct	7°14'37"	39°24'56"	130	-3,1	-	134

Tabela 6.7. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica (CE) para poços no Grupo 2. RG: Registro Geral.

RG	Nº	Local - Município	Lat. S	Lat. W	P (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{14}\text{C}$ (pMC)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
2852	P4	Lagoa Seca, 9 -Jz	7°14'27"	39°19'22"	119	-3,3	64,2 ± 0,7	291
2388	P6	R.Macacos,8 -Jz	7°12'36"	39°18'08"	191	-3,9	35,4 ± 0,6	522
2145	P10	Nº 2 -MV	-	-	86	-3,6	30,3 ± 0,4	375
2785	P19	St S. Pedro -Bb	7°17'50"	39°17'12"	78	-3,2	99,2 ± 0,5	226
2784	P33	Barro Branco -Bb	7°18'50"	39°15'22"	76	-3,4	88,0 ± 0,8	288
2765	P35	R.Macacos 3 -Jz	7°13'35"	39°18'12"	140	-3,2	92,0 ± 0,7	243
2766	P36	R. Macacos 4 -Jz	7°13'25"	39°18'13"	140	-3,4	78,2 ± 0,5	291
2767	P38	R. Macacos 7 -Jz	7°12'46"	39°18'20"	200	-3,2	75,1 ± 0,7	281
2771	P39	Lagoa Seca 14-Jz	7°14'38"	39°19'03"	154	-3,5	61,0 ± 0,5	299
2777	P46	Vila Alta, 2 -Ct	-	-	107	-3,2	93,7 ± 1,1	232
2820	P58	R.Macacos, 1 -Jz	7°13'48"	39°18'24"	120	-3,4	77,5 ± 0,7	258
2825	P71	Lagoa Seca,12-Jz	7°15'08"	39°19'21"	126	-3,4	72,4 ± 1,1	253
2826	P72	Lagoa Seca,13-Jz	7°15'20"	39°19'23"	102	-3,5	79,1 ± 0,7	213

Tabela 6.8. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica (CE) para poços no Grupo 3. RG: Registro Geral.

RG	Nº	Local - Município	Lat. S	Lat. W	P (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{14}\text{C}$ (pMC)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
2110	P9	Alto Alegria-Bb	7°18'27"	39°17'46"	113	-3,2	93,2 ± 0,7	349
2783	P31	Usina 1 -Bb	7°18'08"	39°14'09"	200	-3,2	84,5 ± 0,7	363
2386	P37	R. Macacos 5 -Jz	7°13'14"	39°18'15"	160	-3,6	48,9 ± 0,4	380
2788	P48	Abaiara - lav. -Ab	7°21'10"	39°02'47"	130	-3,8	44,9 ± 0,6	417
2789	P50	CAGECE 7 -Mi	7°18'54"	38°56'20"	118	-5,1	-	569
2782	P53	Bela Vista -Bb	7°19'40"	39°17'46"	88	-4,3	28,1 ± 0,5	456
2821	P59	R. Macacos, 6 -Jz	7°13'02"	39°18'17"	200	-3,6	54,2 ± 1,0	438
2786	P68	Sítio S. Paulo -Bb	7°18'07"	39°17'49"	144	-3,0	-	332

Tabela 6.9. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica (CE) para poços no Grupo 4. RG: Registro Geral.

RG	Nº	Local - Município	Lat. S	Lat. W	P (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{14}\text{C}$ (pMC)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
2135	P1	R.M.Ferreira-NO	-	-	80	-3,4	-	967
2136	P2	Nº 2 -NO	-	-	128	-3,4	69,2 ± 0,6	622
2845	P3	Baixio, 3 -NO	7°06'58"	39°41'19"	130	-3,8	3,3 ± 0,4	976
2392	P42	SESI -Ct	7°13'37"	39°23'46"	63	-3,1	99,1 ± 0,7	639
2395	P44	Hp.S.Vicente -Bb	7°18'39"	39°18'03"	150	-2,9	90,8 ± 0,8	602
2827	P73	Abaiara, 1 -Ab	7°21'20"	39°02'40"	130	-3,5	59,7 ± 0,7	776
2828	P74	Jacu -NO	7°05'42"	39°41'10"	127	-3,5	-	866
2844	P76	Pedras Cariri -NO	7°05'43"	39°40'35"	50	-3,0	-	631
2848	P78	V. Esperança -BS	7°26'33"	38°57'14"	80	-2,8	-	670

No Grupo 3 (Tabela 6.8) estão poços que amostram águas da Formação Missão Velha em sua área de afloramento e na parte confinada pelas Formações Rio da Batateira e Abaiara e estão localizados nos municípios de Barbalha, Juazeiro do Norte, Abaiara e Milagres. Parte dos poços no Grupo 3 (P31, P37, P48 e P59) apresentaram artesianismo na época da perfuração. Os valores de oxigênio-18 estão entre -5,1 ‰ e -3,2 ‰, os valores

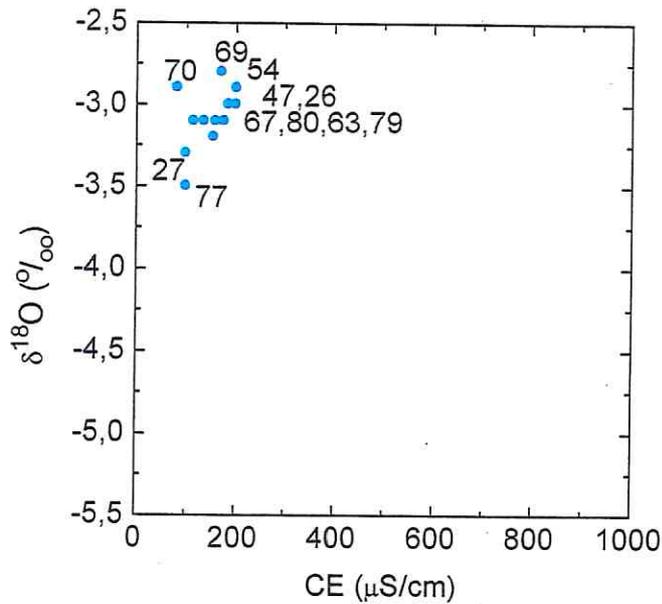
de carbono-14 entre 28,1 % e 93,2 % e os valores de condutividade elétrica entre 332  $\mu\text{S/cm}$  e 569  $\mu\text{S/cm}$ .

Ao Grupo 4 (Tabela 6.9) pertencem os poços que captam o aquífero Mauriti. Os valores de oxigênio-18 estão entre -3,8 ‰ e -3,0 ‰, os valores de carbono-14 entre 3,6 % e 99,1 % e os valores de condutividade elétrica entre 602  $\mu\text{S/cm}$  e 976  $\mu\text{S/cm}$ . O Grupo 4 apresenta os mais altos valores de condutividade elétrica em comparação com os Grupos 1, 2 e 3.

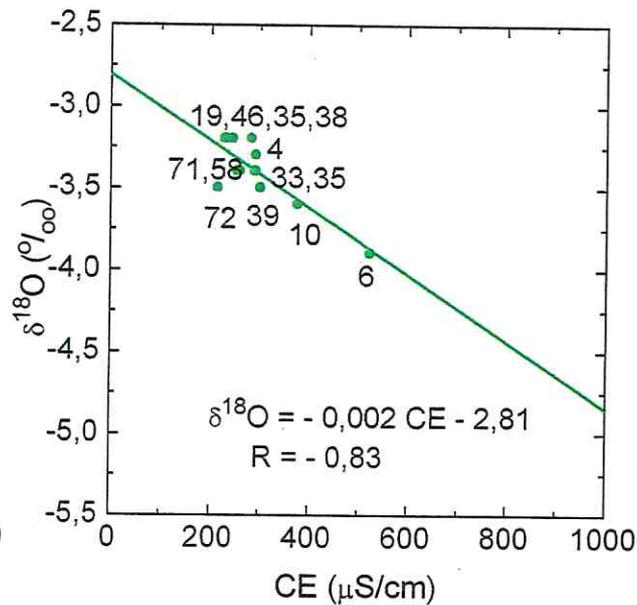
As Figuras 6.2a, 6.2b, 6.2c e 6.2d apresentam medidas de condutividade elétrica correlacionadas com medidas de oxigênio-18 (Tabelas 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9) para os Grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

O Grupo 1 pode ser representado por um valor de  $\delta^{18}\text{O}$  médio de  $-3,1 \pm 0,17$  ‰ que é a média para a chuva atual na região e apresenta os mais baixos valores de condutividade elétrica, em comparação com os outros grupos. Nos Grupos 2, 3 e 4 observamos correlações lineares entre oxigênio-18 e condutividade elétrica. Para o Grupo 2 a correlação é dada por  $\delta^{18}\text{O} = -2 \times 10^{-3} \text{ CE} - 2,81$ , com um coeficiente de correlação de -0,83, para o Grupo 3,  $\delta^{18}\text{O} = -9 \times 10^{-3} \text{ CE} - 0,11$ , com um coeficiente de correlação de -0,97 e para o Grupo 4  $\delta^{18}\text{O} = -2 \times 10^{-3} \text{ CE} - 0,76$ , com um coeficiente de correlação de -0,85. Podemos observar que para os Grupos 2, 3 e 4 os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  decrescem com o aumento da condutividade elétrica.

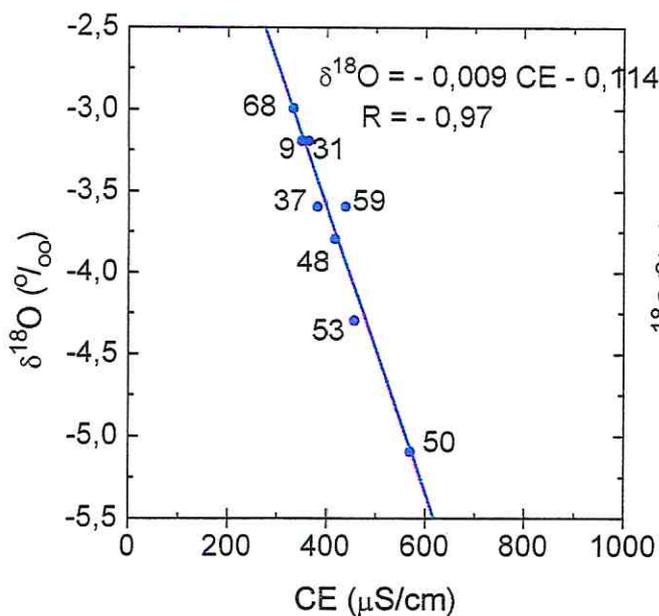
Essas correlações lineares entre os valores de condutividade elétrica e oxigênio-18 podem ser explicados da seguinte forma: O oxigênio-18 é um isótopo estável, não muda por trocas isotópicas (trocas com o oxigênio presente nas rochas e no solo) na temperatura relativamente baixa dos aquíferos da região ou por qualquer outro processo;



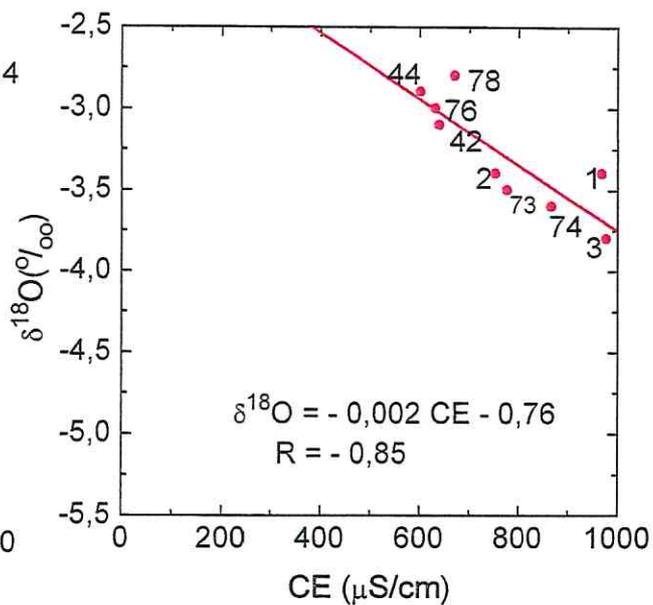
(a) Grupo 1



(b) Grupo 2



(c) Grupo 3



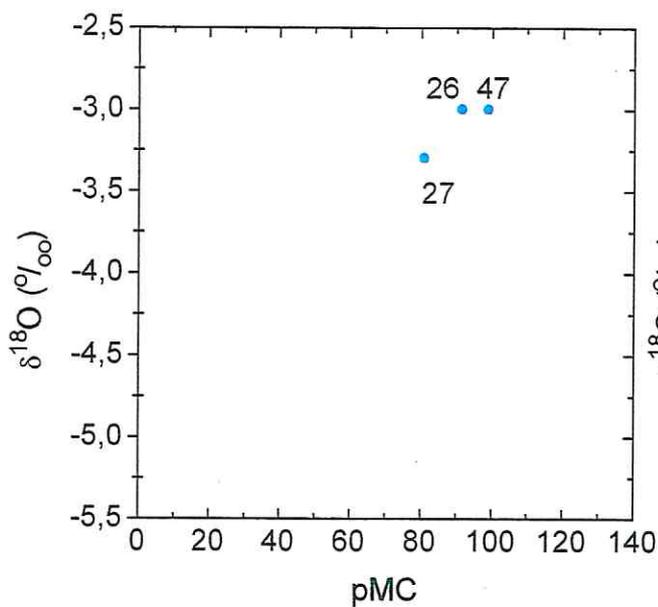
(d) Grupo 4

Figura 6.2.  $\delta^{18}\text{O}$  em função da condutividade elétrica. a) Poços no Grupo 1. b) Poços no Grupo 2; c) Poços no Grupo 3 ; d) Poços no Grupo 4.

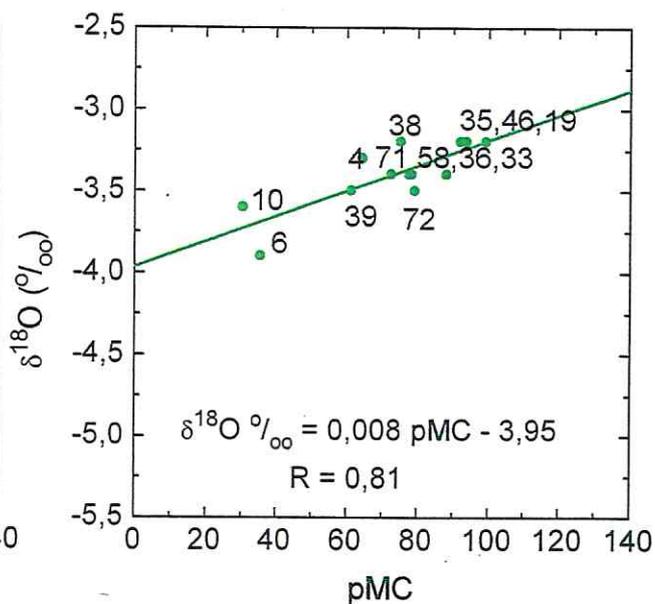
nos aquíferos profundos também não ocorre evaporação após infiltração. Assim, o valor de oxigênio-18 no aquífero é um valor característico da época de entrada da água no aquífero pela zona de recarga. Desta forma, o oxigênio-18 está relacionado com a época da entrada da água no aquífero, ou seja, está relacionado com o clima e com as condições ambientais da época da entrada. Por outro lado, a condutividade elétrica é relacionada com o tempo de contato água/rocha, ou seja, quanto maior o tempo de permanência no aquífero, maior a dissolução de sais e, conseqüentemente, maior a condutividade elétrica. É importante notar que a condutividade elétrica também está relacionada com a formação aquífera, pois para um diferente aquífero, com diferente geologia, as condições de dissolução são diferentes. Assim, temos correlações lineares entre condutividade elétrica e oxigênio-18 para cada mistura de componentes de diferentes tipos de armazenamento subterrâneo. A diferença entre os coeficientes angulares de cada reta, refletem os diferentes componentes da mistura.

Considerando  $\delta^{18}\text{O} = -3,2 \text{ ‰}$  o valor no aquífero Rio da Batateira e  $-3,9 \text{ ‰}$  para o aquífero Missão Velha na área dos poços do Grupo 2, usando o modelo de mistura discutido na seção 3.2.2, observamos que a contribuição do Missão Velha nos poços explorados nesta área é de 0 % para os poços P19, P35, P36, P38 e P46, de 14 % para o poço P4, de 29 % para os poços P33, P58 e P71, de 43 % para os poços P39 e P72, de 57 % para o poço P10 e de 100 % para o poço P6.

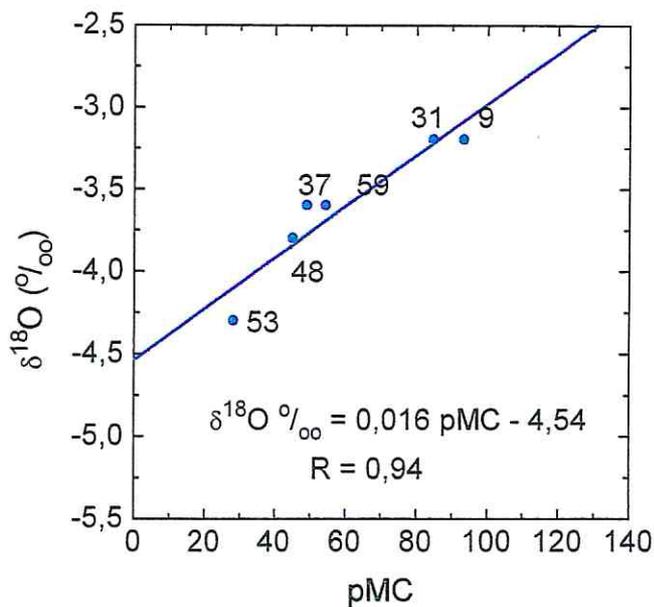
As Figuras 6.3a, 6.3b, 6.3c e 6.3d apresentam medidas de carbono-14, expressas em pMC, correlacionadas com medidas de oxigênio-18 (Tabelas 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9) para os Grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Para o Grupo 1 o valor médio de oxigênio-18 de  $-3,2 \pm 0,17 \text{ ‰}$ , da ordem das chuvas, está relacionado com os valores de pMC mais recentes.



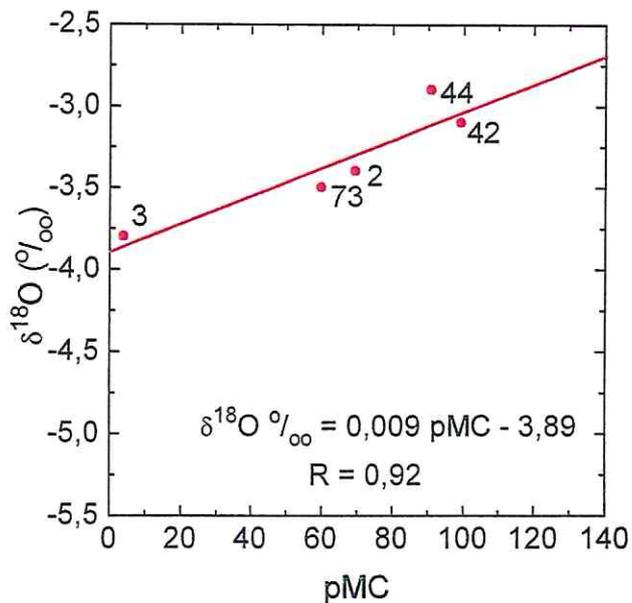
(a) Grupo 1



(b) Grupo 2



(c) Grupo 3



(d) Grupo 4

Figura 6.3.  $\delta^{18}\text{O}$  em função da percentagem do carbono moderno a) Poços no Grupo 1, b) Poços no Grupo 2, c) Poços no Grupo 3 e d) Poços no Grupo 4.

Para os Grupos 2, 3 e 4 observamos também uma correlação linear entre oxigênio-18 e pMC. Para o Grupo 2 a correlação é dada por  $\delta^{18}\text{O} = 8 \times 10^{-3} \text{ pMC} - 3,95$ , com um coeficiente de correlação de 0,81, para o Grupo 3,  $\delta^{18}\text{O} = 16 \times 10^{-3} \text{ pMC} - 4,54$ , com um coeficiente de correlação de -0,94 e para o Grupo 4  $\delta^{18}\text{O} = 9 \times 10^{-3} \text{ pMC} - 3,89$ , com um coeficiente de correlação de -0,93.

As correlações lineares entre os valores de pMC e oxigênio-18 reforçam o mesmo comportamento mostrado pelas correlações entre condutividade elétrica e oxigênio-18 (Figura 6.2). A variável pMC reflete o tempo de residência da água no aquífero. Os menores valores de pMC (águas mais antigas) estão relacionados com os valores mais negativos de oxigênio-18, ou seja, as águas mais antigas entraram no aquífero em condições climáticas, diferentes das condições de hoje, quando o valor de oxigênio-18 era diferente. Podemos observar, que para os Grupos 2, 3 e 4, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  crescem com o aumento de pMC, a diferença entre os Grupos também está no coeficiente angular de cada reta, o que confirma os diferentes componentes de mistura de cada grupo.

As correlações apresentadas nas figuras 6.2 e 6.3 mostram que os dados isotópicos e as medidas de condutividade elétrica separam as águas por tipos de zonas aquíferas e também dão o grau de mistura de cada amostra.

### 6.2.1. ÁGUA NOS ALUVIÕES

Separamos as amostras de poços no Vale do Cariri que foram perfurados nas áreas de aluviões dos rios e riachos da região.

A Tabela 6.10 apresenta local, município, coordenadas geográficas, obtidas com GPS, registro geral (RG), profundidade (P), oxigênio-18, carbono-14 e condutividade elétrica (CE) para poços nos aluviões nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte. Os valores de oxigênio-18 estão entre  $-3,3 ‰$  e  $-3,0 ‰$ , com um valor médio de  $-3,2 \pm 0,1 ‰$ , os valores de pMC são maiores do que 100 para o município de Crato e entre 66,6 e 124,8 para o município de Juazeiro do Norte. Os valores de condutividade elétrica estão entre  $88 \mu\text{S}/\text{cm}$  e  $497 \mu\text{S}/\text{cm}$  para o município de Crato e entre  $162 \mu\text{S}/\text{cm}$  e  $229 \mu\text{S}/\text{cm}$  para o município de Juazeiro do Norte.

Tabela 6.10. Dados isotópicos de oxigênio-18 e carbono-14 e condutividade elétrica (CE) de poços no aluvião dos municípios de Crato e Juazeiro do Norte. RG: Registro Geral.

RG	Nº	Local - Município	Lat. S	Lat. W	P (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^{14}\text{C}$ (pMC)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
2310	P15	S.Raimundo, 2-Ct	7°13'35"	39°25'25"	126	-	111,5 ± 1,1	219
2339	P20	St.M. Alegre-Ct	7°12'25"	39°24'37"	60	-	125,4 ± 1,1	497
2686	P22	Vila Pe Cícero-Ct	-	-	98	-	108,8 ± 1,1	88
2401	P41	Batateira-lav.-Ct	7°13'25"	39°25'31"	32	-3,2	115,5 ± 1,1	312
2768	P5	R. Macacos 2 -Jz	7°13'37"	39°18'26"	150	-3,1	74,6 ± 0,9	168
2853	P28	Lagoa Seca, 11-Jz	7°14'56"	39°19'22"	115	-3,3	66,6 ± 0,5	186
2772	P29	Lagoa Seca, 16-Jz	7°14'34"	39°18'51"	129	-3,0	88,7 ± 0,6	182
2383	P34	R.Macacos 2a -Jz	7°13'38"	39°18'22"	32	-3,2	124,8 ± 0,9	229
2773	P40	Lagoa Seca 17-Jz	7°14'23"	39°18'44"	180	-3,1	80,5 ± 0,6	162

As Figuras 6.4a e 6.4b apresentam a variação do pMC com a condutividade elétrica para poços nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte (Tabela 6.10), respectivamente, onde observamos dois comportamentos distintos: i) Em Crato e Juazeiro do Norte amostrando respectivamente os aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha a condutividade elétrica decresce com o aumento do pMC com correlações lineares respectivamente dadas por  $\text{CE} = -5,4 \text{ pMC} + 715$  e fator de correlação de  $-0,85$  e  $\text{CE} = -4,85 \text{ pMC} + 635$  com um

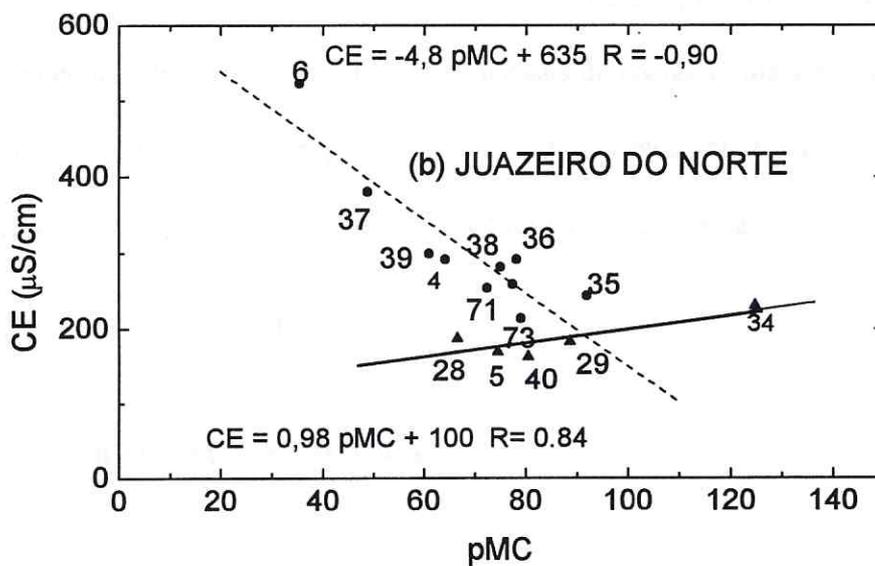
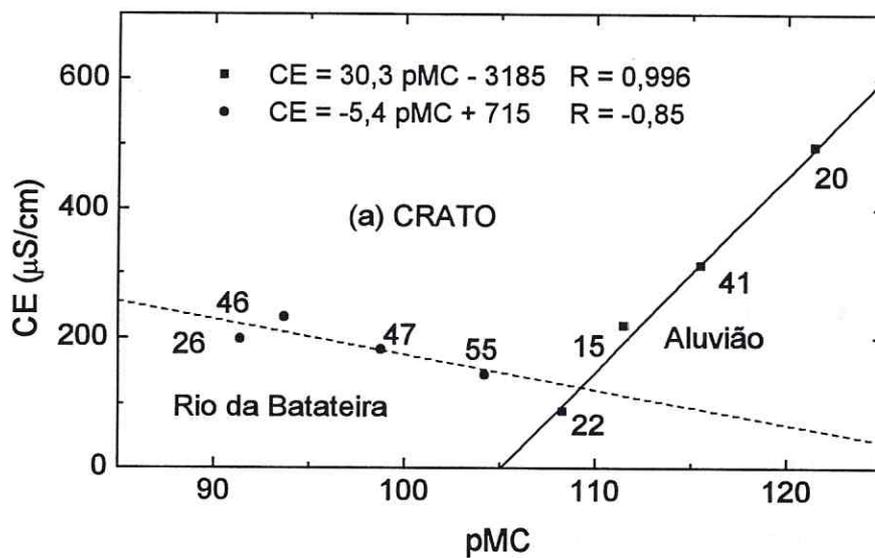


Figura 6.4. Condutividade elétrica em função da percentagem do carbono moderno de poços nos municípios de (a) Crato e (b) Juazeiro do Norte.

fator de correlação de -0,90. ii) Nos aluviões, a condutividade elétrica cresce com o aumento do pMC no município de Crato com uma correlação linear dada por  $CE = 30,3 \text{ pMC} - 3185$  e fator de correlação de 0,996 e no município de Juazeiro do Norte  $CE = 0,98 \text{ pMC} + 100,31$  com um coeficiente de correlação de 0,84.

Em águas infiltradas antes dos testes nucleares (antes de 1950) a condutividade elétrica decresce com o pMC, indicando que processos de dissolução estão envolvidos. Quanto menor o valor de pMC, maior a idade da água, ou seja, maior o tempo de contato água/rocha, e conseqüentemente, maior a dissolução de sais, aumentando a condutividade elétrica.

Quando a condutividade elétrica cresce com o aumento do pMC, dois processos podem ser responsáveis: i) Entrada de águas modernas com pMC maior do que 100. A concentração de carbono-14 na atmosfera está mais alta por causa dos testes nucleares a partir de 1950 (ver Figura 3.1), o que afeta principalmente as águas dos aluviões por serem águas mais recentes, dos últimos 30 anos. ii) Processos de lavagem dos aerossóis do ar e do solo que são carregados pela chuva para o aluvião ou processos onde fatores externos tipo contaminação estão envolvidos, aumentando a condutividade elétrica.

### 6.2.2. CORRELAÇÃO $\delta^2\text{H}$ X $\delta^{18}\text{O}$

Na Tabela 6.11 apresentamos dados de deutério ( $\delta^2\text{H}$ ), oxigênio-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e carbono-14 (pMC) de alguns poços, juntamente com local, município, número do poço, registro geral, além da classificação dos poços por grupo. Os valores de  $\delta^2\text{H}$  estão entre

-17,8 ‰ e -13,3 ‰, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -3,8 ‰ e -3,1 ‰ e os valores de pMC entre 3,6 e 79,1.

Tabela 6.11. Deutério, oxigênio-18 e pMC de poços na região do Cariri. NO: Nova Olinda, Jz: Juazeiro do Norte e RG: registro geral.

RG	Nº	Local - Município	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	pMC	Grupo
2853	P28	Lagoa Seca, 11 -Jz	-15,4	-3,3	66,6 ± 0,5	1
2822	P63	Lagoa Seca, 15 -Jz	-13,3	-3,1	-	1
2852	P04	Lagoa Seca, 9 -Jz	-13,8	-3,3	64,2 ± 0,7	2
2682	P58	Rch. Macacos, 1 - Jz	-15,9	-3,4	77,5 ± 0,7	2
2825	P71	Lagoa Seca, 12 -Jz	-15,4	-3,4	72,4 ± 1,1	2
2826	P72	Lagoa Seca, 13 -Jz	-15,1	-3,5	79,1 ± 1,1	2
2821	P59	Rch. Macacos, 6 -Jz	-17,1	-3,6	54,2 ± 1,0	3
2845	P03	Baixio, 3 -NO	-17,8	-3,8	3,6 ± 0,4	4
2828	P74	Jacu -NO	-16,8	-3,5	-	4

A reta de correlação  $\delta^2\text{H} \times \delta^{18}\text{O}$  para estas águas mostrada na Figura 6.5 é  $\delta^2\text{H} = 6,9 \delta^{18}\text{O} + 8,3$  com um coeficiente de correlação de 0,89. Comparando-a com a reta meteórica mundial e com a reta meteórica em Fortaleza (reta tracejada na Figura 6.5) que é  $\delta\text{D} = 7,5 \delta^{18}\text{O} + 8,1$  (IAEA, 1981) verificamos que as águas nos diferentes aquíferos regionais não sofrem processos significantes de evaporação antes da infiltração.

Observamos também que os valores de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  decrescem na ordem dos grupos 1, 2, 3 e 4 sendo, como se espera, os mais altos valores correspondentes aos aquíferos mais superficiais e os mais baixos valores ao aquífero Mauriti que é o mais confinado.

Na Figura 6.6 representamos  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  em função dos valores de pMC. Podemos observar que as águas com menores tempos de trânsito apresentam valores de oxigênio-18 da ordem da chuva atual (aquífero livre) e para maiores tempos de trânsito, os valores de oxigênio-18 vão se tornando mais negativos até -3,8 ‰ indicando a presença de paleoáguas no aquífero mais confinado.

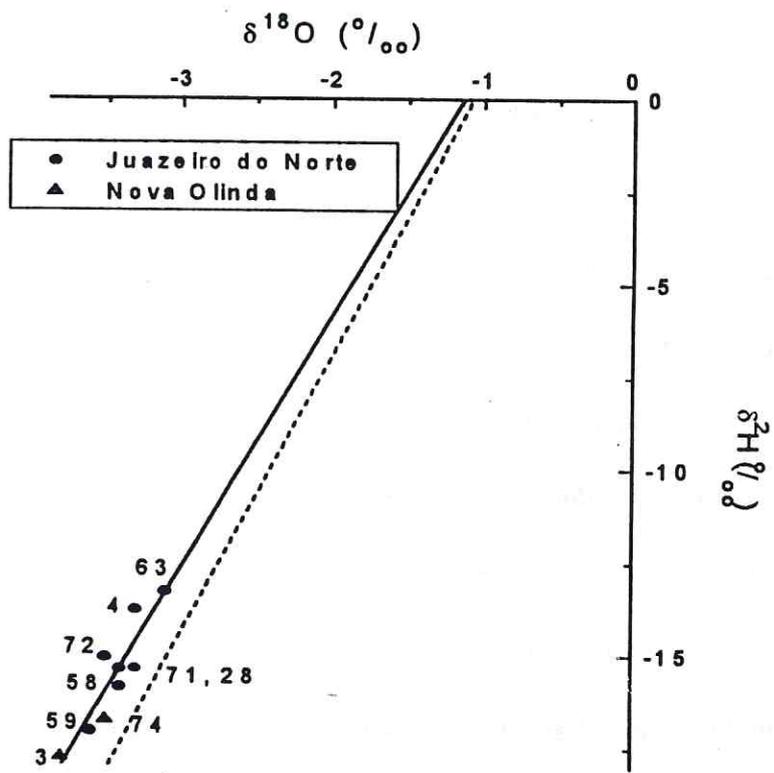


Figura 6.5. Oxigênio-18 em função de deutério para poços na região do Cariri. Retra tracejada: reta meteórica mundial.

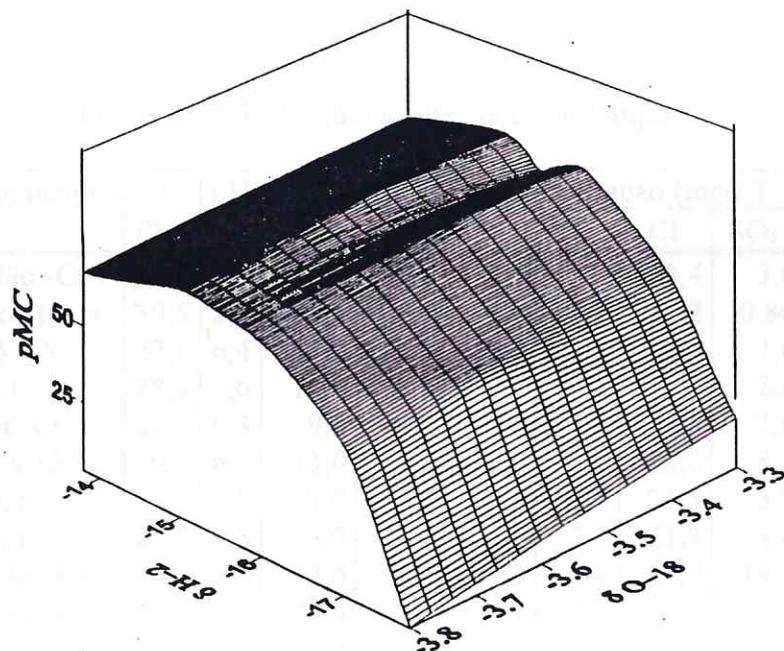


Figura 6.6. Variação do pMC em função de oxigênio-18 e deutério.

### 6.2.3. HIDROQUÍMICA DOS POÇOS NO VALE DO CARIRI

Os valores de  $^{14}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}$  juntamente com a condutividade elétrica separam as águas por aquíferos e misturas dos mesmos. A análise dos íons maiores nos poços amostrados mostra uma certa homogeneização quanto aos tipos diferentes armazenamentos.

Nas Tabelas 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15 apresentamos os dados de hidroquímica dos poços nos Grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, e na Tabela 6.16 os dados de hidroquímica para poços nos aluviões dos municípios de Crato e Juazeiro do Norte. Nestas tabelas, além das concentrações dos íons mais abundantes, expressas em mg/L, apresentamos dados de pH, temperatura e os números dos poços (P5), local e município. Suas localizações geográficas precisas podem ser encontradas nas Tabelas 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 referentes aos mesmos Grupos.

Tabela 6.12. Hidroquímica de poços no Grupo 1.

Nº	Local - Município	T (°C)	pH	Concentração (mg/L)							
				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
P26	C. Mirandão -Ct	27,7	6,7	18,0	15,8	3,7	2,3	28,4	3,0	94,0	-
P27	Lagoa Seca,10-Jz	30,5	5,4	6,0	3,6	3,4	6,6	14,2	0,86	31,7	-
P47	Cafundó 5 -Ct	27,8	6,4	11,0	10,9	3,0	3,9	10,6	4,6	75,7	-
P54	SENAI -Ct	28,3	6,6	14,0	9,7	7,1	16,8	56,7	2,6	39,1	-
P55	S.R. Novo -Ct	27,7	6,3	9,0	7,9	5,5	5,5	24,8	2,6	45,2	-
P63	Lagoa Seca,15-Jz	30,4	6,5	13,0	7,3	6,9	7,0	14,2	8,6	73,2	-
P67	Floresta -Ct	-	5,7	7,0	5,5	4,6	3,9	21,3	3,1	29,3	-
P67	Floresta -Ct	27,7	5,5	8,0	3,6	4,6	3,1	21,3	4,8	17,7	-
P69	S.Raimundo, 4-Ct	29,6	7,5	13,0	6,7	5,3	6,6	17,7	19,2	46,4	-
P70	P.Café Linha-Ab	29,7	5,3	4,0	2,4	4,1	5,9	14,2	8,2	13,4	-
P77	Esc. Limoeiro-Mi	30,4	5,4	3,0	3,0	4,6	14,9	17,7	4,8	19,5	-
P79	Sizani-Ct	27,8	5,8	39,1	11,6	5,3	8,2	21,3	15,4	164,8	-
P80	Recanto 1 -Ct	28,0	5,7	18,0	6,1	4,6	5,9	28,4	4,8	51,9	-

Tabela 6.13. Hidroquímica de poços do Grupo 2.

Nº	Local - Município	T (°C)	pH	Concentração (mg/L)							
				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
P4	Lagoa Seca, 9 -Jz	30,6	6,8	10,0	5,5	5,7	7,8	14,2	6,7	53,7	-
P4	Lagoa Seca, 9 -Jz	30,7	5,8	8,0	4,3	5,7	7,8	14,2	4,8	42,7	-
P19	St. S. Pedro -Bb	27,0	6,9	16,0	9,7	8,0	5,9	28,4	17,1	73,2	-
P33	Barro Branco -Bb	29,8	7,1	22,0	2,4	12,4	4,7	21,3	6,8	134,2	-
P35	R. Macacos 3 -Jz	29,9	6,4	24,0	10,9	10,1	6,3	35,5	1,6	103,7	-
P36	R. Macacos 4 -Jz	31,7	6,7	30,1	8,5	16,1	5,5	28,4	2,5	134,2	-
P38	R. Macacos 7 -Jz	29,7	6,2	24,0	7,3	10,6	8,2	28,4	3,6	97,6	-
P39	Lagoa Seca, 14-Jz	29,9	6,6	25,1	11,6	9,9	4,3	14,2	4,5	139,1	-
P46	Vila Alta, 2 -Ct	28,1	7,0	18,0	9,7	11,0	5,1	28,4	11,0	80,5	-
P58	R. Macacos, 1 -Jz	30,2	5,7	24,0	12,2	10,6	5,5	35,5	7,2	102,5	-
P71	Lagoa Seca, 12-Jz	30,3	6,8	27,1	10,3	7,4	5,5	14,2	8,6	140,3	-
P72	Lagoa Seca, 13-Jz	29,8	6,8	19,0	10,3	5,5	7,8	14,2	12,0	112,3	-

Tabela 6.14. Hidroquímica de poços no Grupo 3.

Nº	Local - Município	T (°C)	pH	Concentração (mg/L)							
				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
P31	Usina 1 -Bb	28,5	7,3	32,1	20,7	13,6	5,1	35,5	4,1	183,1	-
P48	Abaiara - lav. -Ab	28,3	7,2	34,1	14,6	27,8	4,3	21,3	22,0	196,5	-
P50	CAGEC, E 7 -Mi	35,5	8,2	6,0	3,6	101,4	4,3	42,6	46,9	183,1	-
P53	Bela Vista -Bb	30,0	7,0	30,1	21,9	27,8	6,6	35,5	31,3	183,1	-
P59	R. Macacos, 6 -Jz	31,5	6,5	28,1	18,2	38,6	5,5	14,2	17,8	222,1	8,4
P68	Sítio S. Paulo -Bb	-	6,7	30,1	15,8	10,6	5,1	28,4	19,5	139,1	-

Tabela 6.15. Hidroquímica de poços no Grupo 4.

Nº	Local - Município	T (°C)	pH	Concentração (mg/L)							
				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
P3	Baixio, 3 -NO	30,0	7,6	26,1	13,4	129,9	3,5	49,6	86,5	317,3	12,0
P3	Baixio, 3 -NO	30,6	7,7	26,1	11,6	117,5	3,9	49,6	100,9	244,1	14,4
P42	SESI -Ct	28,5	5,1	28,1	24,9	26,2	5,5	127,7	13,4	28,1	-
P42	SESI -Ct	27,3	5,0	24,0	21,9	33,3	37,1	106,4	1,0	23,2	-
P44	Hp. S. Vicente -Bb	27,4	6,7	58,1	36,5	8,3	5,5	70,9	76,8	158,7	-
P73	Abaiara, 1 -Ab	31,7	7,4	55,1	24,3	23,4	3,9	28,4	45,6	234,3	12,0
P74	Jacu -NO	30,0	6,8	114,2	10,9	23,0	4,7	35,5	95,6	288,0	2,4
P76	Pedras Cariri - NO	30,4	6,3	89,2	9,7	7,8	11,7	99,3	16,3	163,5	-
P78	V. Esperança -BS	36,9	6,0	67,1	35,3	20,9	2,7	134,7	4,8	196,5	4,5

Tabela 6.16. Hidroquímica de poços no aluvião dos municípios de Crato e Juazeiro do Norte.

Nº	Local - Município	T (°C)	pH	Concentração (mg/L)							
				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
P20	St.M. Alegre-Ct	27,0	6,5	69,1	18,8	5,1	24,6	21,3	8,6	317,3	-
P41	Batateira-lav.-Ct	28,0	5,7	28,1	12,2	16,8	10,6	85,1	14,0	48,8	-
P5	R. Macacos 2 -Jz	30,0	6,0	12,0	9,7	5,1	5,5	35,5	1,1	46,4	-
P28	Lagoa Seca,11-Jz	30,6	6,4	13,0	7,9	4,6	5,1	14,2	6,7	67,1	-
P28	Lagoa Seca,11-Jz	31,7	6,7	16,0	7,3	4,6	5,1	17,7	3,2	73,2	-
P28	Lagoa Seca,11-Jz	31,1	6,2	37,1	9,12	4,6	5,1	21,3	4,8	122,0	7,2
P29	Lagoa Seca,16-Jz	30,2	6,6	14,0	8,5	7,1	5,5	21,3	2,6	73,2	-
P34	R. Macacos 2a-Jz	29,6	5,5	12,0	7,3	9,9	12,1	49,6	0,6	30,5	-
P40	Lagoa Seca,17-Jz	30,2	6,1	10,0	8,5	3,9	5,1	21,3	1,8	54,9	-

Comparando com a Tabela 6.4 observamos que a concentração de sais nos poços é muito superior a das águas das fontes. No Vale do Cariri, o tempo de trânsito é maior do que na Chapada, permitindo atingir um equilíbrio químico com o meio que favorece a dissolução de carbonatos como o processo dominante para a obtenção de águas bicarbonatadas cálcicas.

Na Figura 6.7 apresentamos um diagrama de Piper (PIPER, 1944) onde estão representados todos os valores de hidroquímica dos poços no Vale do Cariri (Tabelas 6.12 a 6.16) e onde podemos observar que a maioria das águas são bicarbonatadas-cálcicas-magnesianas e que os quatro grupos distintos e os aluviões não se distinguem quimicamente.

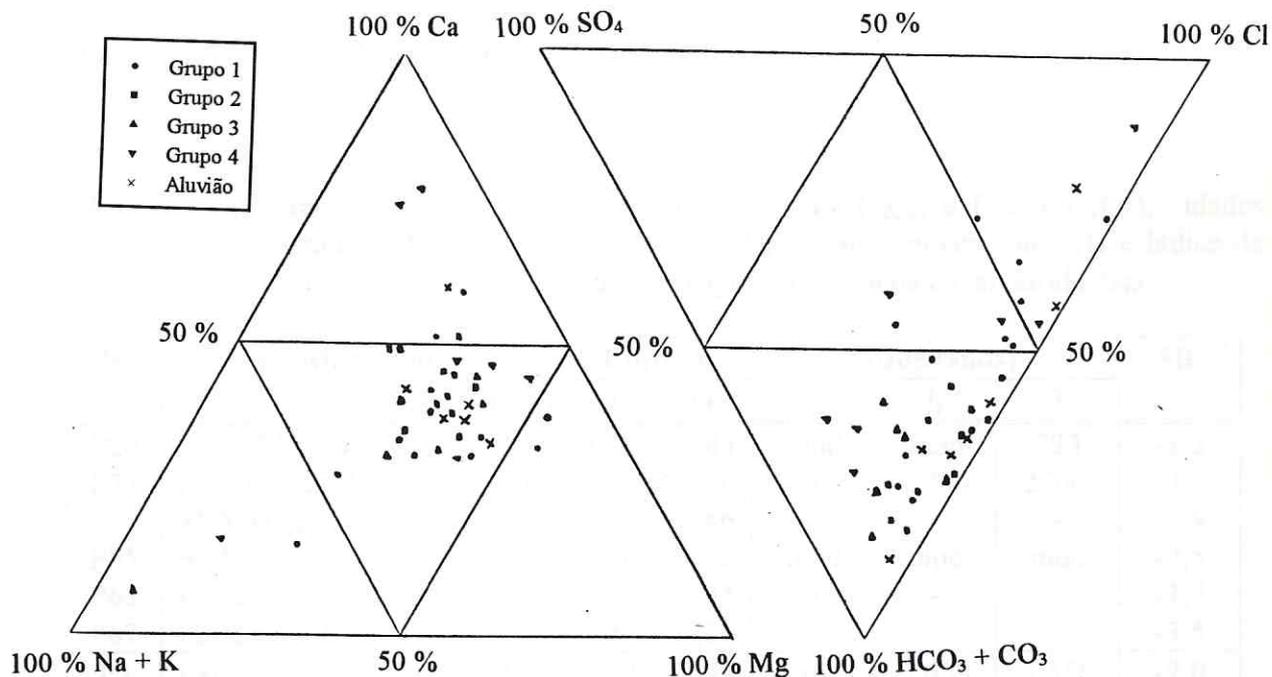


Figura 6.7. Diagrama de Piper para poços na região do Cariri.

#### 6.2.4. CARBONO-13

A existência de águas com baixos valores de pMC associados a valores relativamente altos de  $\delta^{18}\text{O}$  tornou necessário medir  $^{13}\text{C}$  como dado complementar ao estudo dos aquíferos, permitindo identificar os processos responsáveis pelos dados que são excessão ao comportamento geral e também corrigir os cálculos do tempo de trânsito.

Na Tabela 6.17 apresentamos os valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , fatores de Pearson ( $Q_p$ ) e de Cheng ( $Q_{ch}$ ) para correção da idade convencional (I) e o índice de saturação de cálcio (SIC) da maioria dos poços estudados. Nesta tabela consideramos águas modernas (mod) aquelas

que têm valores de pMC maiores que 97,6 e correspondem a no máximo 200 anos de idade convencional (STUIVER & POLACH, 1977).

Tabela 6.17. Carbono-13, fatores de correção de Cheng ( $Q_{Ch}$ ) e Pearson ( $Q_P$ ), idades corrigidas de Cheng ( $I_{Ch}$ ) e Pearson ( $I_P$ ), idade convencional ( $I$ ) e índice de saturação de cálcio (SIC) dos 4 grupos e dos poços em áreas aluviais.

Nº	Local - Município	$\delta^{13}C$ (‰)	Correção		Idade (anos)			SIC
			$Q_{Ch}$	$Q_P$	$I_{Ch}$	$I_P$	$I$	
P26	Conj. Mirandao -Ct	-17,0	0,83	0,83	mod	mod	723	-1,3
P27	Lagoa Seca, 10 -Jz	-19,4	0,95	0,96	1.923	2.344	2.344	-3,5
P54	SENAI -Ct	-17,5	0,90	0,86	-	-	-	-1,9
P55	S. Rdo Novo -Ct	-12,6	0,91	0,62	mod	mod	mod	-2,5
P63	Lagoa Seca, 15 -Jz	-19,1	0,86	0,94	-	-	-	-1,7
P67	Floresta -Ct	-20,3	0,97	1,00	-	-	-	-3,5
P4	Lagoa Seca, 9 -Jz	-19,0	0,89	0,94	2.620	3.059	3.556	-2,0
P19	Sítio S. Pedro -Bb	-16,1	0,88	0,79	mod	mod	mod	-1,3
P33	Barro Branco -Bb	-16,1	0,82	0,79	mod	615	1.027	-0,7
P35	Rch. Macacos, 3 -Jz	-16,7	0,85	0,82	mod	mod	670	-1,5
P36	Rch. Macacos, 4 -Jz	-17,5	0,81	0,86	698	1.129	1.976	-1,0
P38	Rch Macacos, 7 -Jz	-17,4	0,91	0,86	1.650	1.454	2.301	-1,7
P46	Vila Alta, 2 -Ct	-13,3	0,78	0,66	mod	mod	523	-1,1
P58	Rch.Macacos, 1 -Jz	-18,5	0,83	0,91	548	1.287	2.045	-2,2
P71	Lagoa Seca, 12 -Jz	-19,3	0,90	0,95	1.748	2.182	2.594	-0,9
P72	Lagoa Seca, 13 -Jz	-18,2	0,82	0,90	288	1.036	1.882	-1,1
P31	Usina, Prof 200 -Bb	-12,8	0,82	0,63	mod	mod	1.353	-0,2
P48	Abaiara - lav. -Ab	-17,1	0,82	0,84	4.735	4.928	6.329	-0,3
P53	Bela Vista -Bb	-16,4	0,82	0,81	7.265	9.873	10.201	-0,6
P59	Rch.Macacos, 6 -Jz	-17,1	0,85	0,84	3.612	3.517	4.918	-1,0
P3	Baixio, 3 -NO	-13,4	0,65	0,66	23.342	23.465	26.803	0,0
P42	SESI -Ct	-17,6	0,98	0,87	560	mod	722	-3,3
P44	Hp. S. Vicente -Bb	-16,7	0,79	0,82	414	614	776	-0,8
P74	Jacu -NO	-13,7	0,68	0,67	-	-	-	-0,1
P5	Rch. Macacos, 2 -Jz	-19,2	0,95	0,95	1.976	2.274	2.355	-2,5
P28	Lagoa Seca, 11 -Jz	-18,9	0,88	0,93	1.483	3.021	3.266	-1,6
P29	Lagoa Seca, 16 -Jz	-16,5	0,80	0,81	mod	mod	mod	-1,6
P34	Rch. Macacos, 2a -Jz	-18,6	0,97	0,92	mod	mod	mod	-3,1
P41	Batateira - lav. -Ct	-14,9	0,96	0,73	mod	mod	mod	-2,4

T: Tamers, 1967; C: Cheng, 1992 e P: Pearson, 1963

Através do histograma da Figura 6.8 podemos observar que, dentre os 29 poços analisados, 23 deles têm valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre  $-20,3 \text{ ‰}$  e  $-16,4 \text{ ‰}$  com um valor médio de  $-18 \pm 1,2 \text{ ‰}$ . Valores semelhantes foram encontrados por ROBERTSON (1992) e THORTENSON et. al. (1990) no Arizona e por GALLO (1979) que encontrou uma média de  $-18,4 \pm 0,8 \text{ ‰}$  em águas subterrâneas em Ribeirão Preto - SP tendo atribuído esse valor às águas subterrâneas de climas tropicais. Os outros 6 poços (P3, P31, P41, P46, P55 e P74) têm valores de  $\delta^{13}\text{C}$  significativamente mais altos, entre  $-14,9 \text{ ‰}$  e  $-12,6 \text{ ‰}$ , decorrentes de diferentes processos de formação de bicarbonatos (ver seção 3.1).

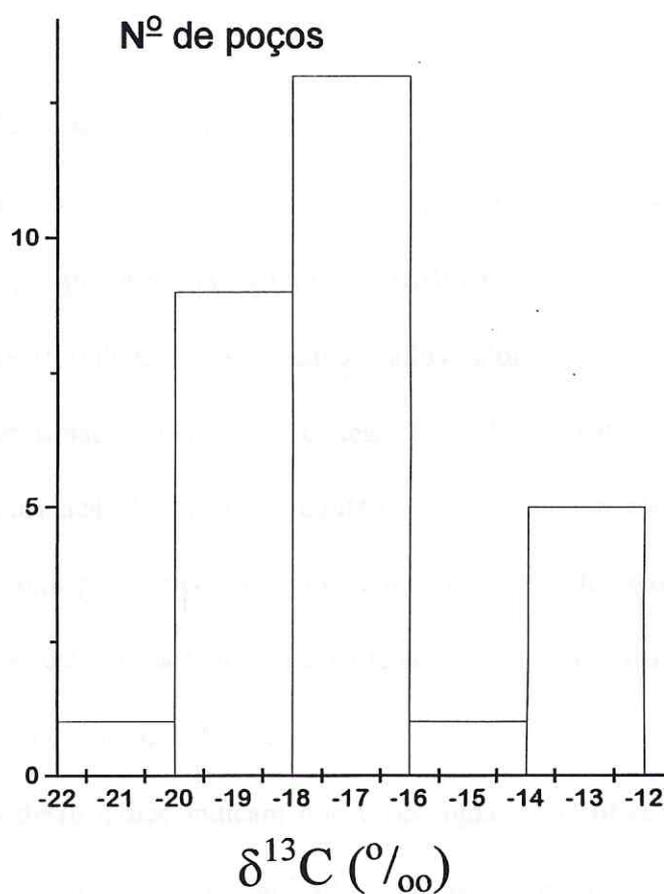


Figura 6.8. Histograma de  $\delta^{13}\text{C}$  de poços no Cariri.

Os poços P41 e P55 (Tabela 6.10) têm contribuição de águas aluviais com pMC maiores que 100 e  $\delta^{18}\text{O}$  da ordem do valor da precipitação moderna. O valor de  $\delta^{13}\text{C}$  pode ser atribuído a trocas isotópicas com o  $\text{CO}_2$  da atmosfera. SRDOC et. al. (1986) mediram durante 3 anos, de 1981 a 1983, a atividade de  $^{14}\text{C}$  no DIC do Rio Korona/Iugoslávia e observaram que a concentração de  $^{14}\text{C}$  aumenta da foz ao estuário. Usando medidas de  $\delta^{13}\text{C}$ , que nas plantas locais tem valores entre -24 ‰ e -30 ‰, eles consideraram que o aumento é devido à troca entre o  $\text{CO}_2$  dissolvido na água corrente e o  $\text{CO}_2$  atmosférico.

O P46 é o único poço de Crato que está classificado no Grupo 2, estando no Grupo 1 a grande maioria dos poços neste município, que captam água somente do aquífero Rio da Batateira. O P31 é o poço mais profundo de Barbalha e deve receber água através de fluxos ascendentes profundos.

A água do poço P3 apresenta pMC = 3,6, correspondendo a uma idade convencional (sem correção) de 26.800 anos, e relativamente alto valor de  $\delta^{18}\text{O} = -3,8$  ‰ (Tabela 6.9) para que possa ser considerada paleoágua. No nordeste do Brasil, em águas datando de mais de 10.000 anos, foram encontrados valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de até -6 ‰ (GEYH et. al. 1991). Assim, o baixo valor de pMC deste poço deve ser decorrente da passagem de águas através da Formação Santana que contém, predominantemente, calcários argilosos e bancos de gipsita, condições estas que favorecem a dissolução de carbonatos.

Para reforçar esta nossa hipótese calculamos o índice de saturação de calcita (SIC) para o conjunto de poços com dados de  $\delta^{13}\text{C}$ .

Os valores deste índice indicam que essas águas são subsaturadas e próximas ao equilíbrio com respeito ao carbonato indicado pelo  $\text{SIC} \leq 0$  e que os valores mais próximos do equilíbrio são os correspondentes aos poços P3 e P74.

Apresentamos na Figura 6.9 o SIC em função do  $\delta^{13}\text{C}$ , onde podemos observar que os valores de SIC próximos de zero (saturação) são referentes aos poços P3, P74 e P31, que apresentam os maiores valores de  $\delta^{13}\text{C}$ . Assim, para esses poços, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  maiores do que  $-15\text{‰}$  são indicadores dos processos de dissolução de carbonatos durante a percolação através da Formação Santana na Chapada do Araripe. A água dos poços P41 e P55 está em contato com a atmosfera o que torna os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  mais altos e não processos de dissolução, como é confirmado pelo baixo valor do SIC.

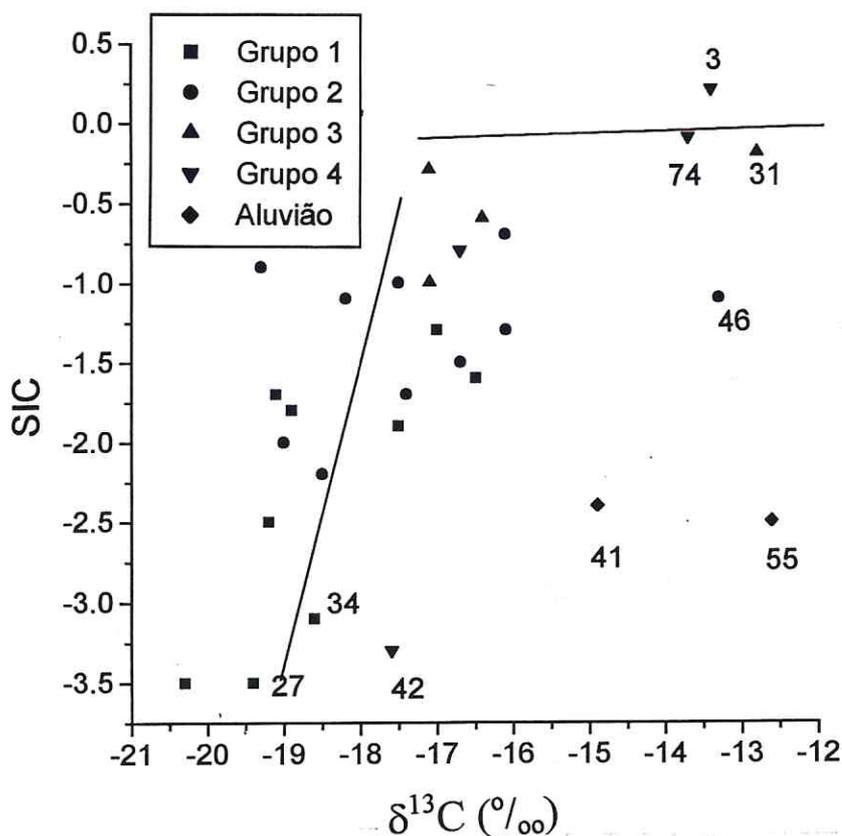


Figura 6.9. Correlação entre SIC e  $\delta^{13}\text{C}$ .

Como parte do carbono dissolvido na água subterrânea é proveniente dos carbonatos, que não contém  $^{14}\text{C}$ , e não apenas do  $\text{CO}_2$  em equilíbrio com a atmosfera, é necessário utilizar um fator de correção na atividade inicial do  $^{14}\text{C}$ . Com os valores de  $\delta^{13}\text{C}$

calculamos o fator de correção de Pearson,  $Q_P$ , (ver seção 3.1.1.1) e com a hidroquímica calculamos o fator de correção de Cheng,  $Q_{Ch}$  (ver seção 3.1.1.3). A Figura 6.10 apresenta um gráfico de  $Q_P$  versus  $Q_{Ch}$ , a reta representa  $Q_P = Q_{Ch}$ . O modelo de Pearson é válido apenas para sistemas fechados, enquanto que o modelo de Cheng considera que a água presente nos sistemas fechados passou inicialmente através da zona não saturada. Os poços P3 e P74 pertencem ao aquífero Mauriti, confinado pela Formação Brejo Santo (sistema fechado); portanto, os valores de correção de Cheng e Pearson são iguais para estes poços e encontram-se entre os menores. Os poços P41 e P55 estão em condições de sistema aberto (aluvião). Portanto, Pearson prevê um fator de correção errôneo enquanto  $Q_{Ch}$  é aproximadamente 1, já que estes poços estão em equilíbrio com a atmosfera.

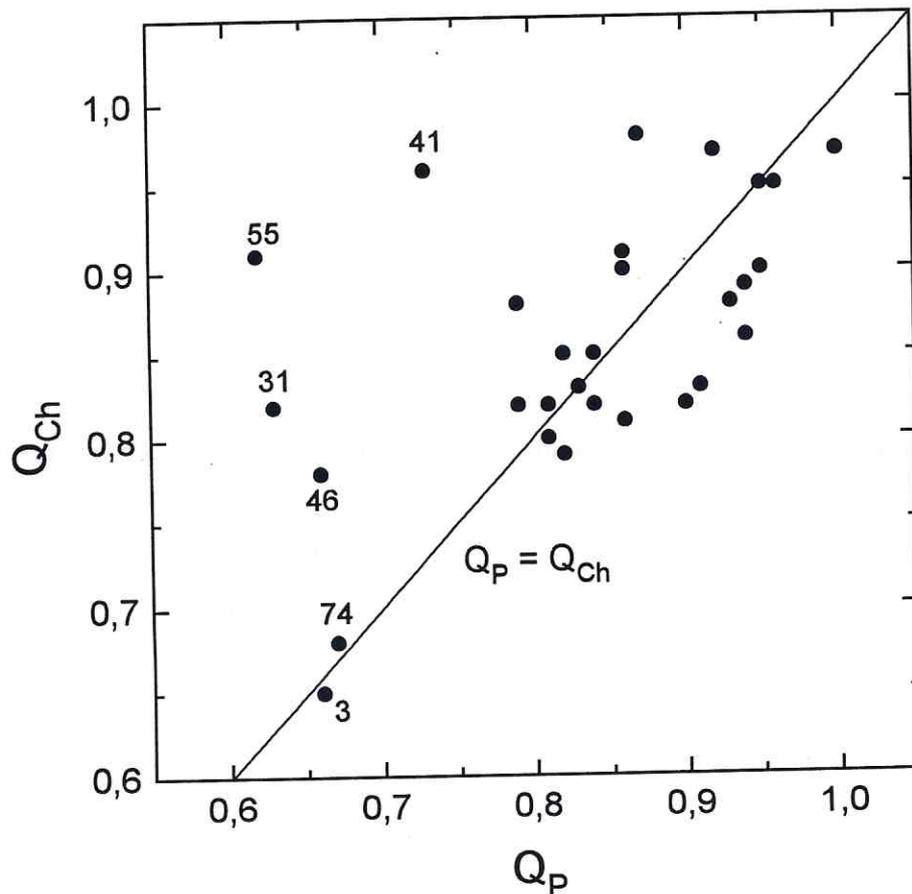


Figura 6.10. Fator de correção de Person ( $Q_P$ ) versus fator de correção de Cheng ( $Q_{Ch}$ ).

### 6.3. ANÁLISE FATORIAL

Aplicamos duas técnicas estatísticas fatoriais ao mesmo conjunto de dados isotópicos ( $^{14}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}$ ), condutividade elétrica e dados geológicos (perfis) de poços localizados nos municípios de Crato, Barbalha, Juazeiro do Norte, Missão Velha, Milagres, Nova Olinda, Abaiara e Brejo Santo, para estudar matematicamente o comportamento das águas subterrâneas da região do Cariri.

Embora uma das principais vantagens da análise fatorial seja analisar um grande número de variáveis e observações simultâneas, os dados de entrada de nosso problema, referentes a cada poço observado, são apenas  $^{14}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$  e condutividade elétrica (Tabelas 6.6 a 6.9). Somente os poços com dados completos foram utilizados, a fim de evitar extrapolações.

#### 6.3.1. ANÁLISE FATORIAL DAS CORRESPONDÊNCIAS

Os resultados obtidos com a análise das correspondências estão mostrados na Figura 6.11, onde estão representadas as variáveis pMC, condutividade elétrica e oxigênio-18 e as observações, que são os poços. Como o primeiro eixo fatorial, o eixo-x, acumula 99,4 % da inércia total, este conjunto de dados pode ser interpretado apenas com este eixo que está dividido em quatro faixas (A, B, C e D) correspondentes aos diferentes tipos de armazenamento, da esquerda para a direita, nos aquíferos Rio da Batateira, Missão Velha e Mauriti.

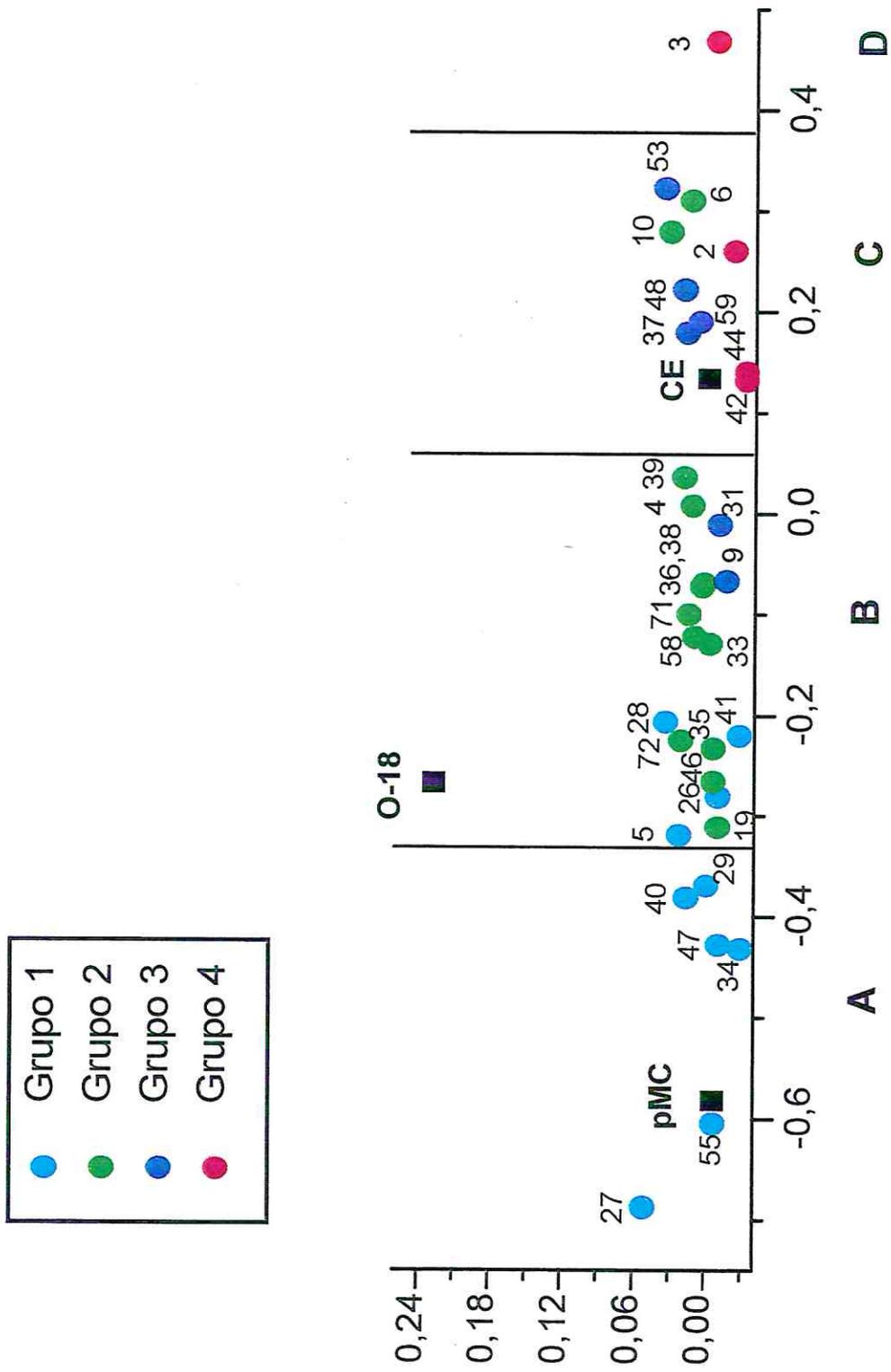


Figura 6.11. Representação plana da análise das correspondências.

Este gráfico das variáveis mostra à esquerda, a variável pMC, à direita a variável condutividade elétrica e próximo da origem, a variável oxigênio-18, significando que: i) Os poços da esquerda com os mais altos valores de pMC e águas mais recentes estão melhor representados pelos valores de pMC. ii) Os poços da direita que possuem os mais altos valores de condutividade elétrica, com maior grau de dissolução de sais, decorrente do maior tempo de contato água/rocha estão melhor representados pelos valores de condutividade elétrica. iii) A variável oxigênio-18, por estar próxima da origem, influi igualmente em todos os poços observados.

Os poços no Grupo A da análise das correspondências são os mesmos do Grupo 1, portanto, o Grupo A e o Grupo 1 são equivalentes. No Grupo B estão quatro poços do Grupo 1, onze poços do Grupo 2 (a maioria) e dois poços do Grupo 3. Apesar da aparente diferença consideramos o Grupo B e o Grupo 2 equivalentes, pois ao Grupo 2 pertencem águas de mistura dos aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha. O Grupo C apresenta dois poços do Grupo 2, quatro poços do Grupo 3 e três poços do Grupo 4. O Grupo D apresenta um poço o P3 que é do Grupo 4, portanto consideramos o Grupo 4 e o Grupo D equivalentes.

As discrepâncias observadas entre os grupos são decorrentes do fato de que a análise das correspondências, que é um modelo puramente matemático, não consegue distinguir misturas, ou seja,  $T_1 + T_2 = R$  não difere de  $T_3 + T_4 = R$ .

Além disso, a análise das correspondências não descreve a complexidade da geologia da área que é marcante em virtude do fraturamento tectônico.

Ressaltamos também que uma análise matemática com a condutividade elétrica, ou com o pMC, como fator preponderante não traduz, por si só o caráter discriminante da origem dessas águas; ou seja, a análise das correspondências não distingue águas das área

de recarga dos diferentes aquíferos porque a água que alimenta esses aquíferos é proveniente das chuvas que têm os mesmos valores numéricos para os parâmetros pMC e oxigênio-18.

No método da análise das correspondências não usamos parâmetros geológicos, mas na análise discriminante aferimos características geológicas, associando a cada poço o seu grupo correspondente, para observar se o poço está bem representado no seu grupo.

### **6.3.2. ANÁLISE FATORIAL DISCRIMINANTE**

Os dados de entrada para a análise discriminante são os mesmos da análise das correspondências, acrescidos de mais uma coluna com a classificação de cada poço por grupo de origem.

Na análise discriminante em uma dimensão o eixo principal está relacionado com a condutividade elétrica. Os resultados da aferição estão apresentados no Quadro 6.1: os nove poços do Grupo 1, foram aferidos no Grupo 1; dos treze poços do Grupo 2, três foram aferidos no Grupo 1 (P19, P46 e P72), oito no Grupo 2 e dois no Grupo 3 (P06 e P10); os seis poços do Grupo 3, foram aferidos no Grupo 3 e os quatro poços do Grupo 4, foram aferidos no Grupo 4. Estes resultados mostram que 84,4 % dos poços são bem classificados nos quatro grupos.

Como o Grupo 2 representa águas de mistura dos aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha, o Grupo 1 representa águas provenientes do Rio da Batateira e o Grupo 3 representa águas provenientes do aquífero Missão Velha, é de se esperar que o Grupo 2 apresente interseções tanto com o Grupo 1 quanto com o Grupo 3.

Quadro 6.1. Aferição da classificação dos poços através da análise discriminante em uma dimensão.

origem	aferição			
	G1	G2	G3	G4
G1	9	0	0	0
G2	3	8	2	0
G3	0	0	6	0
G4	0	0	0	4

Na Figura 6.12 podemos observar que os Grupos estão, matematicamente, claramente separados, com marcante distinção do Grupo 4 que representa armazenamento em fraturas, distinto dos armazenamentos em sedimentos nos outros grupos.

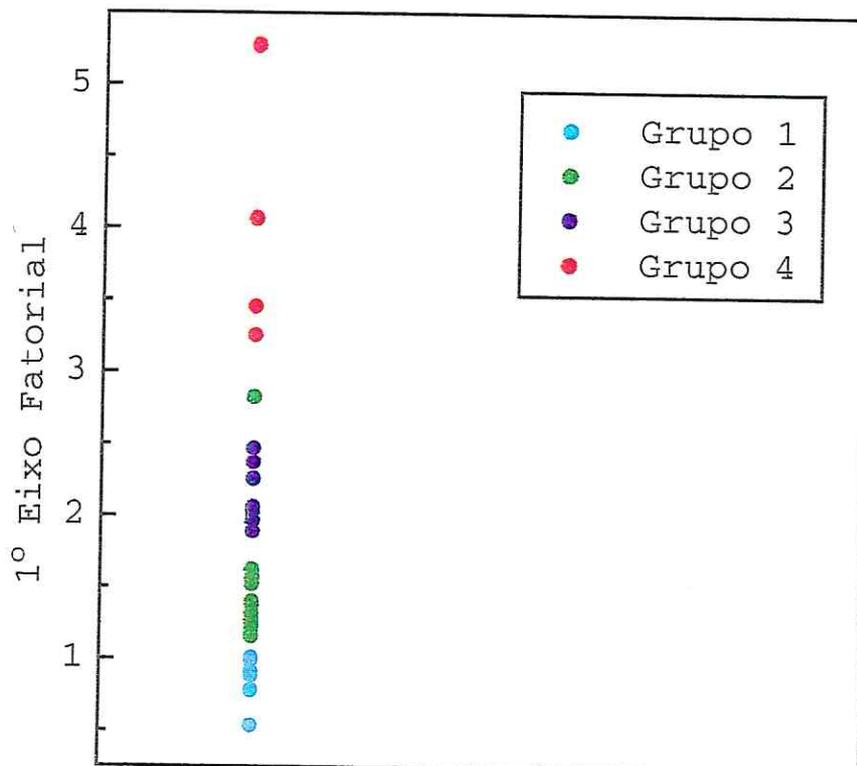


Figura 6.12. Representação da análise discriminante em uma dimensão.

Usamos também a análise discriminante em duas dimensões que escolhe as variáveis que mais influenciam o momento de inércia e procura correlações entre as variáveis, a fim de substituir duas ou mais delas por apenas uma nova variável. De acordo com a correlação dos nossos dados, os eixos principais considerados estão relacionados com a condutividade elétrica e o oxigênio-18.

Dos resultados mostrados no Quadro 6.2 observamos que: dos nove poços do Grupo 1, oito foram aferidos no Grupo 1 e um foi aferido no Grupo 2; dos treze poços do Grupo 2, quatro deles foram aferidos no Grupo 1, sete no Grupo 2 e dois no Grupo 3; dos seis poços do Grupo 3, um foi aferido no Grupo 1, um no Grupo 2 e quatro no Grupo 3; os quatro poços do Grupo 4, foram aferidos no Grupo 4. Estes resultados mostram que 72 % dos poços são bem classificados.

Quadro 6.2. Aferição da classificação dos poços através da análise discriminante em duas dimensões.

origem	aferição			
	G1	G2	G3	G4
G1	8	1	0	0
G2	4	7	2	0
G3	1	1	4	0
G4	0	0	0	4

Neste tipo de análise mostrada na Figura 6.13 também observamos que os Grupos apresentam características distintas, principalmente o Grupo 4 com comportamento bastante diferenciado dos demais grupos.

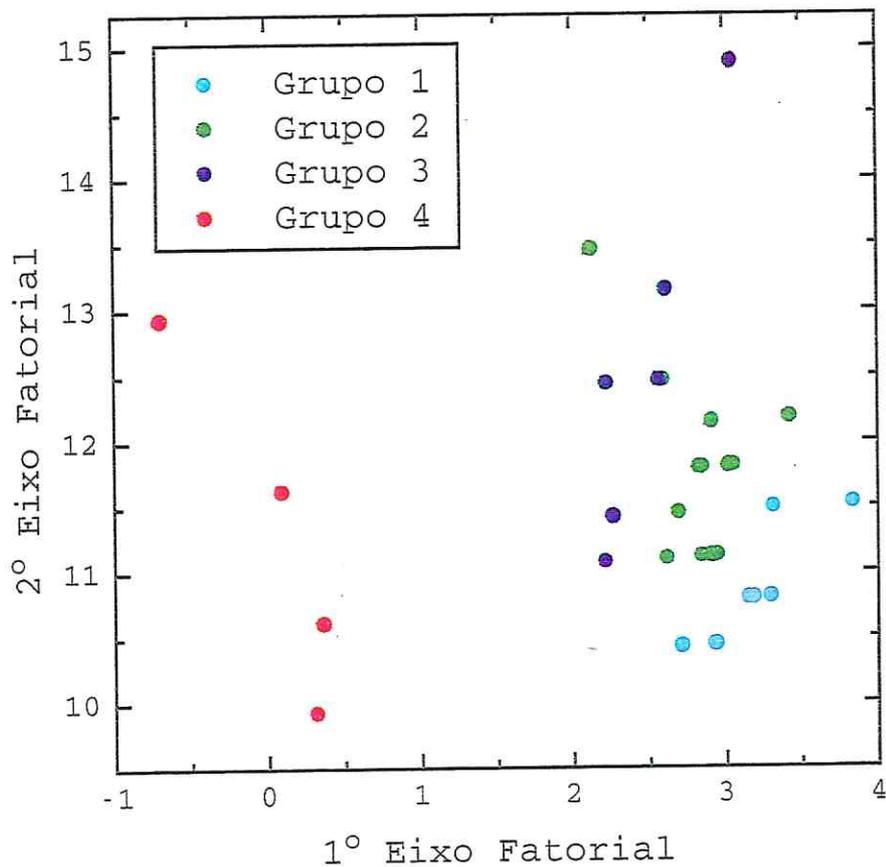


Figura 6.13. Representação da análise discriminante em duas dimensões.

#### 6.4. MODELO FENOMENOLÓGICO

Para utilizar criteriosamente as reservas subterrâneas, sem perigo de atingir níveis prejudiciais, é necessário conhecer os processos de realimentação. Embora o processo inicial seja a infiltração durante o período chuvoso, isso é claro para os aquíferos livres e para as zonas de recarga, mas a infiltração profunda é susceptível de acontecer ou não. Muitos estudos anteriores não admitem a alimentação das formações aquíferas do Vale feita

com contribuição das águas que percolam pela Chapada do Araripe, passando pela Formação Santana.

Propomos um modelo fenomenológico para a dinâmica da água armazenada em toda a Bacia Sedimentar do Cariri com base nos resultados discutidos até aqui.

Apresentamos na Figura 6.14 um esquema simplificado da proposta de fluxos de água na Chapada do Araripe e no Vale do Cariri onde são representadas entradas de água de chuva tanto na Chapada quanto no Vale, exudação por fontes, infiltrações profundas, ou seja, fluxos descendentes, tanto pela Chapada como pelo Vale, passando através das formações. Os fluxos ascendentes, que são também possíveis, não estão representados devido à simplicidade da figura que não representa o forte tectonismo da região.

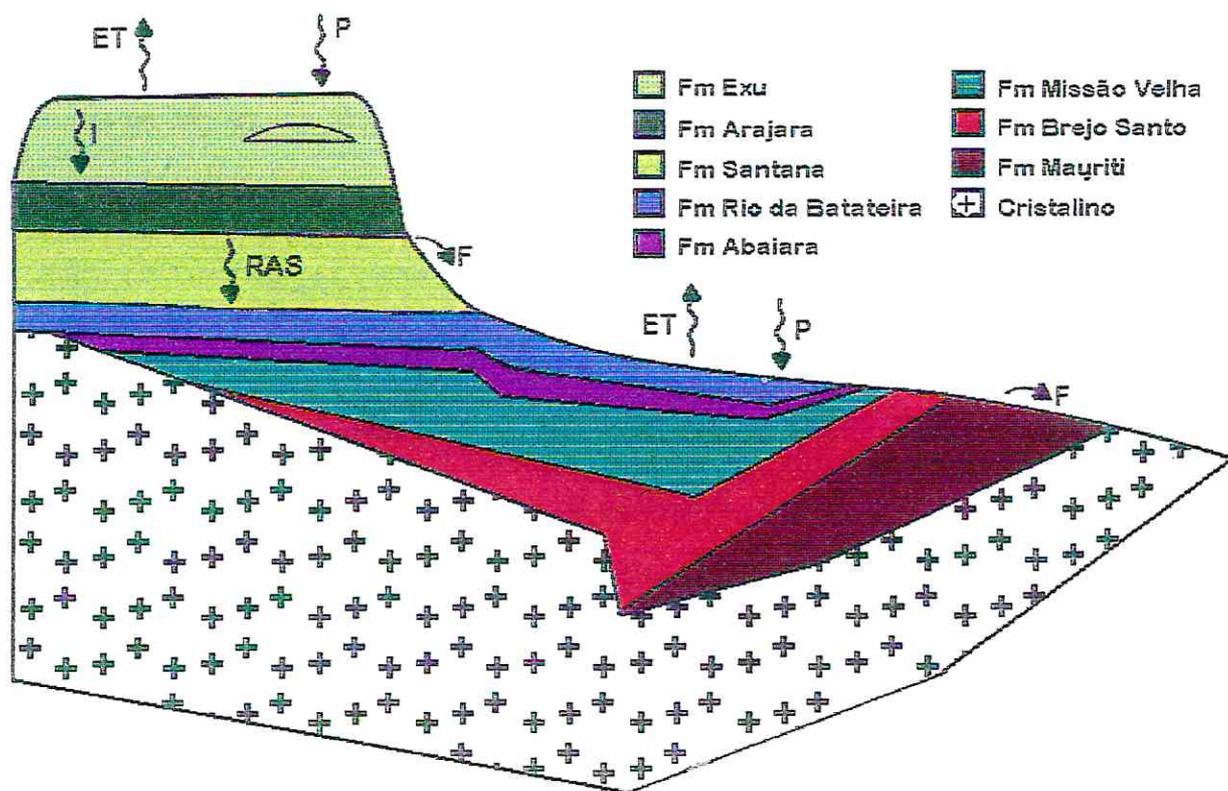


Figura 6.14. Fluxos de água na Chapada do Araripe e no Vale do Cariri. I: infiltração, ET: evapotranspiração, P: precipitação, RAS: recarga com água subterrânea, P: precipitação e F: fontes.

A dinâmica de fluxos é complicada e permite uma grande variedade de misturas de componentes, pois o tectonismo, verificado nas Figuras 2.4 e 2.5, produziu a descontinuidade das formações mesmo em pequena escala.

#### 6.4.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA NA CHAPADA DO ARARIPE

Após a entrada de chuva infiltrando na Chapada do Araripe através dos arenitos da Formação Exu, aparecem os principais exutórios dessas águas que são as fontes. Na falésia da Chapada existem três tipos distintos de fontes: i) fontes no contato Exu/Arajara, com valores de condutividade elétrica de até 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo o principal exutório na Chapada; ii) fontes na Formação Arajara, com condutividades entre 69  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 118  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e iii) fontes no contato Arajara/Santana, com condutividade elétrica em torno de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A fonte Solzinho que pertence ao terceiro exutório tem  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-3,5\text{‰}$ , diferente do valor da chuva atual na Chapada, como também das fontes no contato Exu/Arajara.

A água de um poço na Fazenda Janaguba (P12) (profundidade de 50 m), situado a uma altitude de 730 m, tem condutividade elétrica de 32  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este poço capta água da interface Exu/Arajara segundo o seu perfil geológico. O teor de trítio neste poço é de 1,3 TU, da ordem dos valores de algumas destas fontes. A mesma condutividade elétrica, o mesmo valor de trítio e o perfil geológico do poço são mais evidências de que as fontes da Tabela 6.1 se situam no contato Exu/Arajara. O mesmo argumento pode ser utilizado com um poço no Colégio Agrícola (P21), a uma altitude de 630 m e profundidade de 95 m, que tem condutividade elétrica de 71  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , teor de trítio 0,9 TU e capta água da Formação Arajara segundo o seu perfil geológico. Comparando o valor da condutividade elétrica e a

altitude deste poço com o grupo de fontes da Tabela 6.2, verificamos que as fontes Angélica, Olho d'água e Recanto são oriundas da Formação Arajara.

A correlação entre valores de  $\delta^{18}\text{O}$  na fonte Batateira e a pluviosidade, medidos durante dez meses mostrou uma defasagem entre o pico de vazão e o pico de chuvas de cerca de cinco meses (FRISCHKORN et al. 1990). Foi observada, posteriormente, uma defasagem de 6 a 8 meses medindo, quinzenalmente, durante dois anos, a vazão de duas fontes em Barbalha, no Caldas (STUDART et al. 1992). Comparando com o pico de chuvas, a defasagem de 6 a 8 meses indica uma resposta hidráulica rápida, o que é esperado pela presença de arenitos da Formação Exu.

No entanto, comparando a concentração de trítio da chuva atual na Chapada, que é de 3,2 TU, com 0,3 TU a 0,7 TU nas fontes no contato Exu/Arajara (Tabela 6.3), encontramos um tempo de trânsito de 4 a 26 anos, usando um modelo celular (SILVA et al. 1992).

Um outro tipo de armazenamento na Formação Exu ocorre em lentes de argila, caracterizando aquíferos suspensos, explorados através de cacimbas que têm condutividade elétrica que varia de 169  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Simião) a 526  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Romualdo). Estas águas se caracterizam por intensa presença de íons de ferro decorrente de processo de laterização (SANTIAGO et. al. 1992).

Estes resultados mostram que a realimentação do aquífero Exu é rápida e que a vazão das fontes é maior no período de estiagem, o que é uma ótima contribuição da natureza. No entanto, o aquífero livre na Formação Exu é muito susceptível à poluição que pode facilmente atingí-lo devido a infiltração fácil na Chapada.

#### 6.4.2. ÁGUA SUBTERRÂNEA NO VALE DO CARIRI

A água de chuva no Vale do Cariri infiltra-se através de formações cuja sequência varia espacialmente em função do fraturamento tectônico em toda a bacia sedimentar. Para estudar o mecanismo de recarga e as condições de armazenamento em cada uma das formações usamos poços que, por serem de exploração e não de pesquisa, no geral, recebem água de mais de um aquífero.

O Vale do Cariri também apresenta exutório na forma de fontes. É o que observamos na fonte Rosário que emerge da escarpa do "horst" da Formação Mauriti no município de Milagres com  $\delta^{18}\text{O} = -3,4 \text{ ‰}$  e Condutividade elétrica de  $118 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$  e na fonte Ciciaca, no município de Nova Olinda, no contato da Formação Mauriti com o embasamento cristalino com  $\delta^{18}\text{O} = -2,9 \text{ ‰}$  e condutividade elétrica de  $339 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Todos os poços com valor de trítio maior do que 2 TU (Tabela 6.5), com exceção do P41 em aluvião e do P42 no afloramento do aquífero Mauriti, pertencem ao Grupo 1 que é representativo do aquífero livre na Formação Rio da Batateira, portanto com infiltração direta das águas de chuva. Os valores de oxigênio-18 da ordem da chuva atual, pMC de águas jovens e as mais baixas condutividades elétricas também mostram que o tempo de trânsito é pequeno e a recarga é rápida. A elevação dos níveis estáticos dos poços em 1996 durante o período chuvoso revelou também este comportamento. É importante observar que o aquífero livre é realimentado anualmente, desde que o período chuvoso seja intenso.

Nos poços do Grupo 2, que recebem água de mistura das Formações Rio da Batateira e Missão Velha, as determinações de  $\delta^{18}\text{O}$  e pMC deram uma informação valiosa

a cerca do nível de mistura, permitindo observar que na área correspondente a este grupo de poços, o aquífero Missão Velha ainda é pouco explorado.

O estudo dos poços do Grupo 3 que explora o aquífero Missão Velha permitiu observar as condições de armazenamento nessa formação. Como não encontramos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  muito mais baixos do que das chuvas atuais e os valores de pMC são em torno de 30 % para 2 poços e entre 61 e 99 % para 11 poços, concluímos que o tempo de trânsito das águas é pequeno e que estas águas são renováveis.

Com os poços do Grupo 4 estudamos o armazenamento na Formação Mauriti que repousa sobre o cristalino. A faixa de condutividade elétrica relativamente mais alta é decorrente do armazenamento em fraturas e marca estas águas a partir da área de recarga. Apesar do valor do pMC do poço P3 ser de 3,6 %, correspondendo a uma idade convencional de 26.800 anos, através das medidas de  $^{13}\text{C}$  e SIC verificamos que essa idade precisa de uma drástica correção e que o baixo valor de pMC reflete, na verdade, dissolução de rochas carbonatadas.

A percolação através da Formação Santana, alimentando as camadas aquíferas mais profundas da Chapada do Araripe que estão presentes também no Vale do Cariri, pode ser identificada com base nas medidas de carbono-13 e nos valores do índice de saturação de calcita que mostraram o efeito do processo de dissolução da gipsita e da calcita da Formação Santana.

## 7- CONCLUSÕES

Com os dados isotópicos e hidroquímicos de um conjunto de poços e fontes representativo dos diferentes armazenamentos subterrâneos na Bacia Sedimentar do Cariri elaboramos um modelo fenomenológico da dinâmica dos fluxos de água na Chapada do Araripe e no Vale do Cariri.

- Identificamos três tipos distintos de exutórios das formações aquíferas na Chapada: fontes no contato Exu/Arajara, fontes na Formação Arajara e fontes no contato Arajara/Santana.
- No Vale do Cariri o aquífero livre na Formação Rio da Batateira, com águas modernas, é o mais explorado, mas tem realimentação rápida nos períodos do ano em que a chuva é intensa.
- O aquífero Missão Velha é realimentado pela área de afloramento e também recebe contribuição de água que percola pela Chapada. O intenso bombeamento do aquífero Rio da Batateira propicia um fluxo ascendente das águas do Missão Velha para o Rio da Batateira.
- O aquífero Mauriti, que repousa sobre o cristalino, é realimentado pela área de afloramento na borda da Bacia e em afloramentos provocados pelo tectonismo, como no caso do "horst" do Mauriti, onde se encontram fontes como exutórios. Este aquífero recebe contribuição de água da Chapada, principalmente nas áreas onde o tectonismo coloca a Formação Santana confinando a Formação Mauriti.

- As contribuições das águas dos aluviões para os aquíferos subterrâneos é considerável, encontrando-se águas modernas nos poços que captam os aquíferos nessas áreas.
- A separação dos pontos amostrados em grupos homogêneos com parâmetros importantes para a formulação do modelo de fluxo foi adequada de acordo com as análises fatoriais estatísticas utilizadas. A análise discriminante mostrou que o percentual de poços bem classificados foi de 84,4 % usando análise em uma dimensão e de 72 % usando duas dimensões.

## 8- REFERÊNCIAS

- AGASSIZ, L. 1841 On the fossil fishes found by Mr. Gardner in the Province of Ceará, in the North of Brazil. Edinbourg, London New Phil. Journal, vol. 30 p. 82-84.
- ALBERTY, R.A. 1987 Eletrochemical equilibria. In: Physical Chemistry, 7ª edição, Wiley.
- ANJOS, N.F.R. 1963 Novos elementos sobre a Hidrologia do Alto Jaguaribe - Ceará. Recife, SUDENE, 1963.
- ASSINE, M.L. 1990 Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe (Nordeste do Brasil). Curso de Pós-Graduação em Geociências. Dissertação de Mestrado, Rio Claro, UNESP-IGCE, 124p.
- BEGEMANN, F. & LIBBY, W.F. 1957 Continental water balance, ground water inventory and storage time, surface ocean mixing rates, and world-wide water circulation patterns from cosmic-ray and bomb tritium. Geochim. et Cosmochim. Acta, vol. 12 p. 277-296.
- BERTHOU, P.Y. 1990 Le Bassin d'Araripe et les petits bassins intracontinentaux voisins (NE du Brésil): Formation et evolution dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique Equatorial. Comparaison avec les bassins ouest-africains situés dans le même contexte. I Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Atas, Crato - Ceará, DNPM, p. 113-134.
- BEURLLEN, K. 1962 A geologia da Chapada do Araripe. Anais Academia Brasileira Ciências, Rio de Janeiro, vol. 34, nº 3, p. 378-384.
- BEURLLEN, K. 1963 Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. XVII Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Pe, Publicação Especial, Recife, SBG, p. 47.

- BEURLLEN, K. 1971 As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana, na Chapada do Araripe. (Nordeste do Brasil, Rio de Janeiro, Anais da Academia Brasileira de Ciência, Suplemento nº 43, p. 411-415.
- BEZENCRI, J.P. 1933 L'analyse des données correspondances. Ed. Dunod 1973.
- BRAUN, O.P. 1966 Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da região nordeste do Brasil; Bacias do Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe. Rio de Janeiro, DNPM-DGM (Boletim 236).
- BRITO NEVES, B.B. 1990 A Bacia do Araripe no contexto geotectônico regional. I Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Atas. Crato, Ce, DNPM, p. 21-33.
- BROWN, R.M. 1970 Distribution of hydrogen isotopes in Canadian waters. In: Isotope Hydrology 1970, p. 3-21, IAEA, Viena.
- BUTTLAR, H. von & LIBBY, W.F. 1955 Natural distribution of cosmic-ray produced tritium II. J. Inorg. & Nuclear Chem., vol. 1, p. 75-91.
- CAILLET, F. & PAGES, J.P. 1976 Introduction à analyse des données. Ed. SMASH.
- CAGECE, 1968 Captação de Juazeiro do Norte - condições de exploração dos poços. Relatório de conclusão, Fortaleza, junho de 1988.
- CAVALCANTI, V.M.M. & VIANA, M.S.S. 1992 Revisão estratigráfica da Formação Missão Velha, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciência, vol.64, nº 2, p. 1-20.
- CHENG, S. 1992 Reaction-Path formulation of a simple dissolution model for radiocarbon dating groundwater. Radiocarbon, vol. 34, nº 3, p. 646-653.
- COHN, M. & UREY, H.C. 1938 Oxygen exchange reactions of organic compounds and water. J. Am. Chem. Soc. vol. 60, p. 679.

- CRAIG, H. 1961a Isotopic variations in meteoric waters. *Science* vol. 133, p. 1702.
- CRAIG, H. 1961b Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water. *Science*, vol. 133, p. 1833-1834.
- CRAIG, H. & KEELING, C. 1963 The effects of atmospheric NO<sub>2</sub> on the measured isotopic composition of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Geochim. Acta*, vol. 27, p. 549-551.
- DANSGAARD, W. 1961 The isotopic composition of natural waters. *Meddelser on Gronland*, vol. 165, n<sup>o</sup> 2, p. 120.
- DANSGAARD, W. 1964 Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, vol. 16, p. 436-467.
- DANTAS, J.R.A. 1974 Carta geológica do Brasil ao milionésimo. Folha Jajuaribe (SB.24) e Folha Fortaleza (SA.24). Texto explicativo, Brasília, Ministério das Minas e Energia. DNPM.
- DANTAS, J.R.A. & LOPES, C.F. 1995 A Bacia Sedimentar do Araripe. DNPM, 1995.
- DAVIS, J.C. 1984 *Statistics and data analysis in Geology*, 2nd edn. Wiley, New York, 646p.
- DEINES, P.; LANGMUIR, D. & HARMON, R.S. 1974 Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground water. *Geochimica et cosmochimica Acta*, vol. 38, p. 1147-1164.
- DEVEREL, S.J. 1989 Geostatistical and principal components analysis of ground water chemistry and soil-salinity data, San Joaquin Valley, California. *Proceedings of the Baltimore Symposium, May 1989, Regional Characterisation of Water Quality*, IAHS Publ. 182, p. 11-18.
- DINCER, T. & DAVIS, G.H. 1967 Some considerations on tritium dating and the estimates of tritium input function. *Proc. of 8th Congress Int. Ass. Hydrogeol.*, Istanbul, p. 276-285.

- DNPM, 1994 Relatório geológico de poço. Poço - 4-BO-1-PE, PETROBRÁS, DEBAR/DIGEO/SERAV. Natal (RN).
- DNPM, 1996 Mapa Geológico da Bacia Sedimentar do Araripe. Equipe Executora: Alarico A.F. Mont'alverne, Francisco C. Ponte, José Robinson A. Dantas e Carlos F. Lopes.
- DUARTE, E.W. 1961 Aspectos geológicos do Cariri. Recife, UFPE, Escola de Geologia, (Relatório de Graduação).
- EPSTEIN, S. & MAYEDA, T. 1953 Variation of  $O^{18}$  content of waters from natural sources. *Geochem. Cosmochim. Acta*, vol. 4, p. 213.
- FINKELSTEIN, Ya.B., FILONOV, V.A., SOIFER, V.N. & OBUKHOVA, M.P. 1958 Experimentation with radioactive hydrogen-tritium isotopes as tracers in the study of dynamics of ground water. *Razv. Okhr. Nedr.*, vol. 1, p. 28-35.
- FLORKOWSKI, T. and GRABEZAK, J. 1975 System for enrichment and liquid scintillation counting of low level tritium in water. *Nukleonika*, vol. 20, nº 3/75, p. 273-280.
- FONTES, J.C. 1983 Dating of groundwater. In: *Guide book to Nuclear Techniques in Hydrology*. IAEA, Viena, Technical Report Series, vol. 91, p. 285-299.
- FRACALOSI Jr., M. 1986 Aspectos hidrogeológicos da Bacia do Araripe. Aquíferos Missão Velha e Mauriti. *Anais do 4º Cong. Bras. Água Subt.*, ABAS, Brasília, p. 159-170.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979 In: *Groundwater*. cap. 2, Prentice-Hall, 1979, 604p., ISBN 0-13-365312-9.
- FRIEDMAN, I. 1953 Deuterium content of natural waters and other substances. *Geochem. Cosmochim., Acta*, vol. 4, p.89.

- FRIEDMAN, I., REDFIELD, A.C. SCHOEN, B. & HARRIS, J. 1964 The variation of the Deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle. *Rev. of Geophysics*, vol. 2, p. 177-224.
- FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. F. & BRASIL, R. 1990 Aspectos Hídricos do Cariri. *Anais do I Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato*, 14 a 16/6/90, p. 99-110.
- FRITZ, P. & FONTES, J.Ch. 1980 In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Eds Fritz, P. & Fontes, J.Ch. Vol. 1 - The Terrestrial Environment, A. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford - New York, 1980.
- GALIMOV, E.M. 1966 Carbon isotopes in soli CO<sub>2</sub>. *Geochem. Int.*, vol. 3, p. 889-898.
- GALLO, G. 1977 Utilisation complémentaire de l'hydrochimie et de la géochimie isotopique en hydrogéologie applications aux eaux souterraines de la région de Ribeirão Preto état de São Paulo, Brésil. Tese de Doutorado - Université Claude Bernard - Lyon.
- GALLO, G. 1979 Utilization complémentaire des isotopes de milieu et de hydrochimie pour l'étude hydrogéologique des eaux souterraines de la Région Ribeirão Preto (Brasil). In: *Isotope Hydrogeology*, vol. 2, p. 367-407. IAEA, Viena.
- GASPARY, J. & ANJOS, N.F.R. 1964 Estudo hidrogeológico de Juazeiro do Norte-Ce, Recife, Pe, SUDENE, Série Hidrogeologia nº 3.
- GASPARY, J., ANJOS, N.F.R., REBOUÇAS, A.C., MANOEL FILHO, J., LEAL, O., GARAU, J. & GEUILLOT, P. 1967 Estudo geral de base do Vale do Jaguaribe. SUDENE/ASMIC, Grupo de Estudos do Vale do Jaguaribe, vol. 7, Hidrogeologia, Recife, SUDENE, 245 p.

- GEYH, M.A.; STUTE, M.; FRISCHKORN, H. & SANTIAGO, M.F. 1991 Contribuição para a história climática do nordeste do Brasil. Ed. KFA, p.159-165.
- GHIGNONE, J.I., COUTO, E.A. & ASSINE, M.L. 1986 Estratigrafia e estrutura das bacias do Araripe, Iguatu e Rio do Peixe. XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Goiânia, SBG, vol. 1, p. 271-285.
- GIAUQUE, W.F. & JOHNSTON, H.L. 1929 An isotope of oxygen, mass 18. J. Am. Chem. Soc., vol. 51, p. 1436-1441.
- GODWIN, H. 1962 Half-life of radiocarbon. Nature, vol. 195, nº 4845, p. 984.
- GOMES, J.R.C.; GATTO, C.M.P.P.; SOUZA, G.M.C.; LUZ, D.S.; PIRES, J.L. & TEIXEIRA, W. 1981 Geologia: mapeamento regional. In: Levantamento de Recursos Naturais, vol. 23: Folhas SB.24/25 - Jaguaribe/Natal. Rio de Janeiro, Projeto RADAMBRASIL, p. 27-300.
- GROSSE, A.V., JOHNSTON, W.M., WOLFGANG, R.L. & LIBBY, W.F. 1951 Tritium in nature. Science, vo. 113, p. 1-2.
- HARMAN, H.H. 1976 Modern factor analysis, 3rd edn., University of Chicago Press, p. 355-360.
- HASHIMOTO, A.T., APPI, C.J., SOLDAN, A.L. & CERQUEIRA, J.R. 1987 O neo-Alagoas nas bacias do Ceará, Araripe e Potiguar (Brasil): caracterização estratigráfica e paleoambiental. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, SBG, vol. 17, nº 2, p. 118-122.
- HOTELLING, H. 1933 Analyses of a complex and statistical variables into principal components. J. Educ. Psych., vol. 24, 417-441, 498-520.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 1981 Statical treatment of environmental isotope data in precipitation. Technical Reports, nº 206, p. 180-182.

- JORDAN, D.S. & BRANNER, J.C. 1908 The cretaceous fishes of Ceará, Brazil. Washington, Smithsonian Misc. Collects, vol. 52, 30 p.
- KAUFMAN, S. & LIBBY, W.F. 1954 The natural distribution of tritium. Phys. Rev., vol. 93, p. 1337-1344.
- KRAUSKOPF, K.B. 1972 Introdução à Geoquímica. vol. 1, Ed. da USP, São Paulo, 300p.
- LAL, D. & SUESS, H.E. 1968 The radioactivity of the atmosphere and hydrosphere. Rev. of Nucl. Sci., vol. 18, p. 407-437.
- LERMAN, J.C. 1972a Carbon-14 dating: origin and correction of isotope fractionation errors in terrestrial living matter. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Radiocarbon Dating, New Zealand, 1972, p. 612-624.
- LERMAN, J.C. 1972b Soil-CO<sub>2</sub> and groundwater: carbon isotope composition. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Radiocarbon Dating, New Zealand, 1972, p. 612-624.
- LIBBY, W.F. 1953 The potential usefulness of natural tritium. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S., vol. 39, p. 245-247.
- LIMA, M.R. 1979 Considerações sobre a subdivisão estratigráfica da Formação Santana, Cretáceo do Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geociência, vol. 2, n<sup>o</sup> 19, p. 116-121.
- MACEDO, M.A. 1871 Observações sobre as secas do Ceará e meios de aumentar o volume das águas nas correntes do Cariri. Stuttgart. Typ. E. Mueller. 104p.
- MAGARITZ, M. & GAT, J.R. 1981 Review of the natural abundance of hydrogen and oxygen isotopes. In: Stable Isotope Hydrology - Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. Technical Reports Series, n<sup>o</sup> 210. IAEA, Viena, 1981.
- MARQUES, A.A.F.; MACEDO, L.P. & MARINHO, J.M.L. 1984 Eletroresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea na Chapada do Araripe-CE. III

- Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais. Fortaleza, ABAS, vol. 2, p. 269-284.
- MARTILL, D.M. & WILBY, P.J. 1993 Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil 3. Stratigraphy. London, Paleontological Association Field Guide to Fossil, nº 5, p. 20-50.
- MATSUI, E., SALATI, E., FRIEDMAN, I. & BRINKMAN, W.L.F. 1976 Isotope hydrology in the Amazônia. 2. Relative discharges of the Negro and Solimões Rivers through  $^{18}\text{O}$  concentrations. Water Resour. Res., vol. 12, p. 781.
- MELLOUL, A. 1979 Hydrogeological knowledge of deep aquifers in porous media and with few data by principal components analysis based on geochemical and isotopical parameters. Ph.D Thesis, University of Neuchatel, 268 p.
- MELLOUL, A. & COLLIN, M. 1992 The 'principal components' statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel. Journal of Hydrology, vol. 140, p. 49-73.
- MONT'ALVERNE, A.A.F., DANTAS, J.R.A.; MELO JUNIOR, A.H., MONTEIRO, E.T., LIMA, A.A.; PONTE, J.S.A.; PONTE, F.C. & COSTA, W.D. 1995a A bacia sedimentar do Cariri. Recife, DNPM, 1995.
- MONT'ALVERNE, A.A.F., COSTA, W.D., PONTE, F.C., DANTAS, J.R.A., MELO JUNIOR, A.H., PONTE, J.S.A. & SILVA, C.F. 1995b Avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Araripe Ceará - Pernambuco - Piauí. Revista da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, ABAS, dezembro/1995, p.37-56.

- MOOK, W.G. 1980 Carbon-14 in Hydrogeological studies. In: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Eds Fritz, P. & Fontes, J.Ch. Vol. 1 - The Terrestrial Environment, A. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford - New York, 1980.
- MORAES, L.J. 1963 Reconhecimento foto geológico da região Nordeste do Brasil. Folha Crato SB 24U, Rio de Janeiro, DNPM/DFPM.
- MORAES, J.F.S. de; SANTOS, J.S.A. & MASCARENHAS, J.C. 1976 Projeto Santana. Relatório Final da Etapa I. Recife, PE, DNPM/CPRM, vol. I, 269p.
- MORIN, G.; FORTIN, J.P.; SOCHANSKA, W. & LARDEAU, J.P. 1979 Use of principal component analysis to identify homogeneous precipitation stations for optimal interpolation. Water Resour. Res., vol. 15, nº 6, p. 1841-1850.
- MÜNNICH, K.O. 1957 Messung des  $^{14}\text{C}$  - Gehaltes von Hartem Grundwasser. Naturwissenschaften, vol. 44, p. 32-34.
- NATIONAL BUREAU OF STANDARDS 1980 Washington, USA.
- NIER, A.O. 1950 A redetermination for the relative abundances of the isotopes of Carbon, Nitrogen, oxygen, Argon and Potassium. Phys. Rev., vol. 74, p. 789.
- NIR, A. 1964 On the interpretation of tritium "age" measurements of groundwater. J. Geophys. Res., vol. 69, p. 2589-2595.
- NYDAL, R. & LÖVSETH, K. 1983 Tracing bomb  $^{14}\text{C}$  in the atmosphere 1962-1980. J. Geophys. Res., vol. 88, nº C6, p. 3621-3642.
- OLIVEIRA, E.P. 1933 Água subterrânea no nordeste. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, vol. 5, nº 1, p. 1-4.
- PEARSON, F.J. 1963 Use of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios to correct radiocarbon-ages of materials initially diluted by limestone. In: Int. Conf. Radiocarbon and Tritium Dating, p. 357-366.

- PEARSON, F.J. & HANSHAW, B.B. 1970 Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating. *Isotope Hydrology*, IAEA, Viena, p. 271-286.
- PETROBRÁS, 1986 Relatório geológico de poço - Poço - 2-AP-1-CE, PETROBRÁS, DIRGEO/SEPRAV.
- PIPER, A.M. 1944 A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 25, p. 914-923.
- PONTE, F.C. 1991a Arcabouço estrutural e evolução tectônica da Bacia Mesozóica do Araripe, no Nordeste do Brasil. Rio de Janeiro, PETROBRÁS-CENPES-DIVEX-SEBIPE.
- PONTE, F.C. 1991b Levantamento bibliográfico sobre a Geologia, Paleontologia e Hidrogeologia da Bacia do Araripe e das bacias sedimentares mesozóicas do interior do nordeste oriental do Brasil. DNPM/MINFRA.
- PONTE, F.C. 1992 Sistemas deposicionais na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. 2º Simpósio sobre as Bacias Cretácias Brasileiras. Resumos Expandidos. Rio Claro, SP, UNESP, p. 81-83.
- PONTE FILHO, F.C. & PONTE, F.C. 1992 Caracterização estratigráfica da Formação Abaiara, Cretácio Inferior da Bacia do Araripe. 2º Simpósio sobre as Bacias Cretácias Brasileiras. Resumos Expandidos. Rio Claro, SP, UNESP, p.61-63.
- PONTE, F.C. & APPI, C.J. 1990 Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Natal-RN, SBG, vol. 1, p. 211-226.
- RAND, H.M. & MANSO, V.A. 1984 Levantamento gravimétrico e magnetométrico da Bacia do Araripe. Anais do XXXIII cong. Brasileiro de Geologia, p. 2011-2016.

- REBOUÇAS, A.C. & GASPARY, J. 1966 As águas subterrâneas do nordeste - Estimativas preliminares. Sudene Ser. Hidrogeologia, 6, 80 p., Recife.
- REBOUÇAS, A.C. 1973 Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil. Tese de Doutorado, Université Louis Pasteur de Strasbourg, França.
- RIBEIRO, J.A. & CAVALCANTE, I.N. 1996 Contribuição da água subterrânea no desenvolvimento socio-econômico da Região do Cariri-Ce. Anais do IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 25 a 28 de agosto de 1996, Salvador-Ba.
- RIGHTMIRE, C.T. 1967 A radiocarbon study of the age and origin of galiche deposits. M.A. Thesis, University of Texas.
- ROBERTSON, F.N. 1992 Radiocarbon dating of groundwater in a confined aquifer in Southeast Arizona. Radiocarbon vol. 34, nº 3, p. 664-676.
- SAAD, M. & TURGEON, A. 1988 Application of principal components analysis to long-term reservoir management. Water Resour. Res., vol. 24, nº 7, p. 907-912.
- SANTIAGO, M.F. 1984 Mecanismos de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré, no Ceará. São Paulo, Tese de Doutorado, USP.
- SANTIAGO, M. F. FRISCHKORN, H, BEZERRA A. & BRASIL, R 1988 Medidas hidroquímicas em poços e fontes no Cariri - sul do Ceará. 5º Congr. Bras. Ág. Subt., São Paulo, p. 112 - 120.
- SANTIAGO, M.F.; FRISCHKORN, H. & BRASIL, R. 1989 Águas subterrâneas na Bacia do Cariri. XIII Simpósio de Geologia do Nordeste e II Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Atas. Fortaleza-CE, SBG, p.170-171.

- SANTIAGO, M. F.; FRISCHKORN, H. & SEREJO, A. N. 1990 Estudo Isotópico das Águas do Cariri. *Anais do 6º Congr. Bras. Ág. Subt.*, Porto Alegre, 16 a 21/9/90, p.338-343.
- SANTIAGO, M. F.; FRISCHKORN, H.; SEREJO, A. N.; STUDART, T. & MENDES FILHO, J. 1992 Rainfall and Aquifers in the Cariri: Regulator Agents of Social and Economical development. Impacts of Climatic Variations and Sustainable Development in Semi-arid Regions (ICID), Fortaleza, 27/01 a 01/02/1992, 19p.
- SANTIAGO, M. F.; SILVA, C. S. V.; MENDES FILHO, J. & FRISCHKORN, H. 1994 Caracterização isotópica da água subterrânea na Bacia sedimentar do Cariri II Congreso Latinoamericano de Hidrologia isotopica, Santiago do Chile, 1/1994, Vol. 2, p. 731 - 740.
- SÁRÓ, S. & DUKA-ZÓLYONI, A. 1976 The present level of tritium in the environment and some problems of its detection by liquid scintillation spectrometer. *Jardená Energie*, Bratislava, vol. 22, nº 9, p. 338-341.
- SCHOELLER, H. 1969 L'acide carbonique des eaux souterraines. *Bull. B.R.G.M., Sect. 3*, nº 1, p.1-32.
- SILVA, C.M.S.V. 1992 Estudo da dinâmica da água subterrânea no Cariri com base em dados de trício. Fortaleza, Dissertação de Mestrado-UFC.
- SILVA, C. M. V.; SANTIAGO, M. F.; FRISCHKORN, H. & SEREJO, A. N. 1992 Contribuição de medidas de trício no conhecimento da hidrologia subterrânea no Cariri. I Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Recife, nov. 1992, p. 287-295.
- SILVA, M.A.M. da 1983 The Araripe Basin, Northeastern Brazil: Regional geology and facies analysis of a lower Cretaceous evaporitic depositional complex. Columbia University, U.S.A., Ph.D. Thesis, 287 p.

- SILVA, M.A.M. da 1986a Lower Cretaceous unconformity truncating evaporite-carbonate sequence, Araripe Basin, Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, vol. 16, nº 3, p. 306-310.
- SILVA, M.A.M. da 1986b Lower Cretaceous sedimentary sequences in the Araripe Basin, Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, vol. 16, nº 3, p. 311-319.
- SIMPSON, G.G. 1983 *Fossilien Mosaiksteine zur geschichte de Lebens. Spektrum der Wissenschaft*, Heidelberg, Alemanha, 1983.
- SMALL, M.L. 1913 *Geologia e suprimento d'água subterrânea no Ceará e parte do Piauí*. Rio de Janeiro, IFOCS (Série 1D, Publicação 25).
- SOUZA, J.G. 1979 *O nordeste brasileiro: uma experiência de desenvolvimento regional*. Ed. BNB, Fortaleza, 410p.
- SRDOC, D.; KRAJCAR-BRONIC, I.; HORVATINCIC, N. & OBELIC, B. 1986 Increase of  $^{14}\text{C}$  activity of dissolved inorganic carbon along a river course. *Radiocarbon*, vol. 28, nº 2A, p. 515-521.
- STUDART, T. M. C.; FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. F. & BRASIL, R. W. 1992 Medidas de vazões de fontes no Cariri por diluição de um traçador. I Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Recife, nov. 1992, p.273-282.
- STUIVER, M. & POLACH, H. 1977 Reporting of  $^{14}\text{C}$  data. *Radiocarbon* vol. 19, nº 3, p. 355-363.
- SUESS, H.E. 1955 Radiocarbon concentration in modern wood. *Science*, vol. 122, p. 415-417.
- TALTASSE, P.; BON, H.; PEREIRA, V.X. & ANDRADE, I.V. 1961 *Reconhecimento hidrogeológico da Chapada do Araripe*. Recife, SUDENE.

- TAMERS, M.A. 1967 Radiocarbon ages of groundwater in arid zone unconfined aquifer.  
In: Isotope Techniques in the Hydrology Cycle. p. 143-152, IAEA, Viena.
- TEIXEIRA, J.A.; DUARTE, E.W. & BEZERRA, M.A. 1967 Informe hidrogeológico do extremo oeste de Pernambuco. Recife, SUDENE/CONESP, (Relatório, 20).
- THORTENSON, D.C.; WEEKS, E.O.; HASS, H. & WOODWARD, J.C. 1990 Physical and chemical characteristics of topographically affected airflow in a open berehole at Yucca Mountain, Nevada. In: Proceedings of the Topical Meeting on Nuclear Waste isolation in the unsaturated zone. America Nuclear Society, Inc., Gfarnge Park, Illinois.
- TROUGHTON, J.H. 1972 Carbon isotope fractionation by plants. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Radiocarbon Dating, New Zealand, 1972, p. 420-438.
- UREY, H., BRICKWEDDE, I.G. e MURPHY, G.M. 1932 A hydrogen isotope of mass 2 and its concentration. Phys. Rev., vol. 39, p. 75-91.
- VEIGA, P. 1966 Geologia da quadrícula de Juazeiro do Norte. E-0821, Folha Crato, Ceará. Recife, Pe, SUDENE, Série Geologia Regional 1.
- VOLLE, M. 1985 Analyse des données. Ed. Economica.
- WALLICK, E.I. 1976 Isotopic and chemical considerations in radiocarbon dating of ground-water within the semi-arid Tucson Basin, Arizona. In: Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groudwater Hydrology. IAEA, Viena, p. 195-212.
- WIGLEY, T.M.L. 1975 Carbon-14 dating of groundwater from closed and open system. Water Resources Research, vol. 11, p. 324-328.

ZUTSHI, P. & SAS-HUBICKI, J. 1966 A new cathode treatment for the reproducible electrolytic enrichment of tritium. Intern. J. Appl. Radiat. and Isotopes, vol. 17, nº 11/12, p.670-671.

---

RESUMO

PERFIS CONSTRUTIVAS E LITOLÓGICAS DOS POÇOS

## **ANEXO I**

### **PERFIS CONSTRUTIVOS E LITOLÓGICOS DOS POÇOS**

PERFIL DO POÇO	PROF. (m)	PERFIL LITOL.	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA
	00,00		Argila plástica marrom
	03,00		Idem parda
	06,00		Areia grossa a cascalho fino, creme
			Folhelho com argila de cor marrom
	17,00		Arenito fino, c/pequenos grãos de feldspatos, esverdeado.
	19,00		Argila com folhelho marrom
	23,00		Folhelho de coloração marrom
	38,00		Idem cinza esverdeado
	48,00		Idem
	53,00		Argila com folhelho marrom esverdeado
	75,00		Arenito esverdeado com fragmentos feldspato
	78,00		Arenito médio compacto com fragmentos de feldspato e quartzo, seixos.
	103,00		Arenito fino, homogêneo, coloração acinzentado
	122,00		Xisto avermelhado.
128,00			

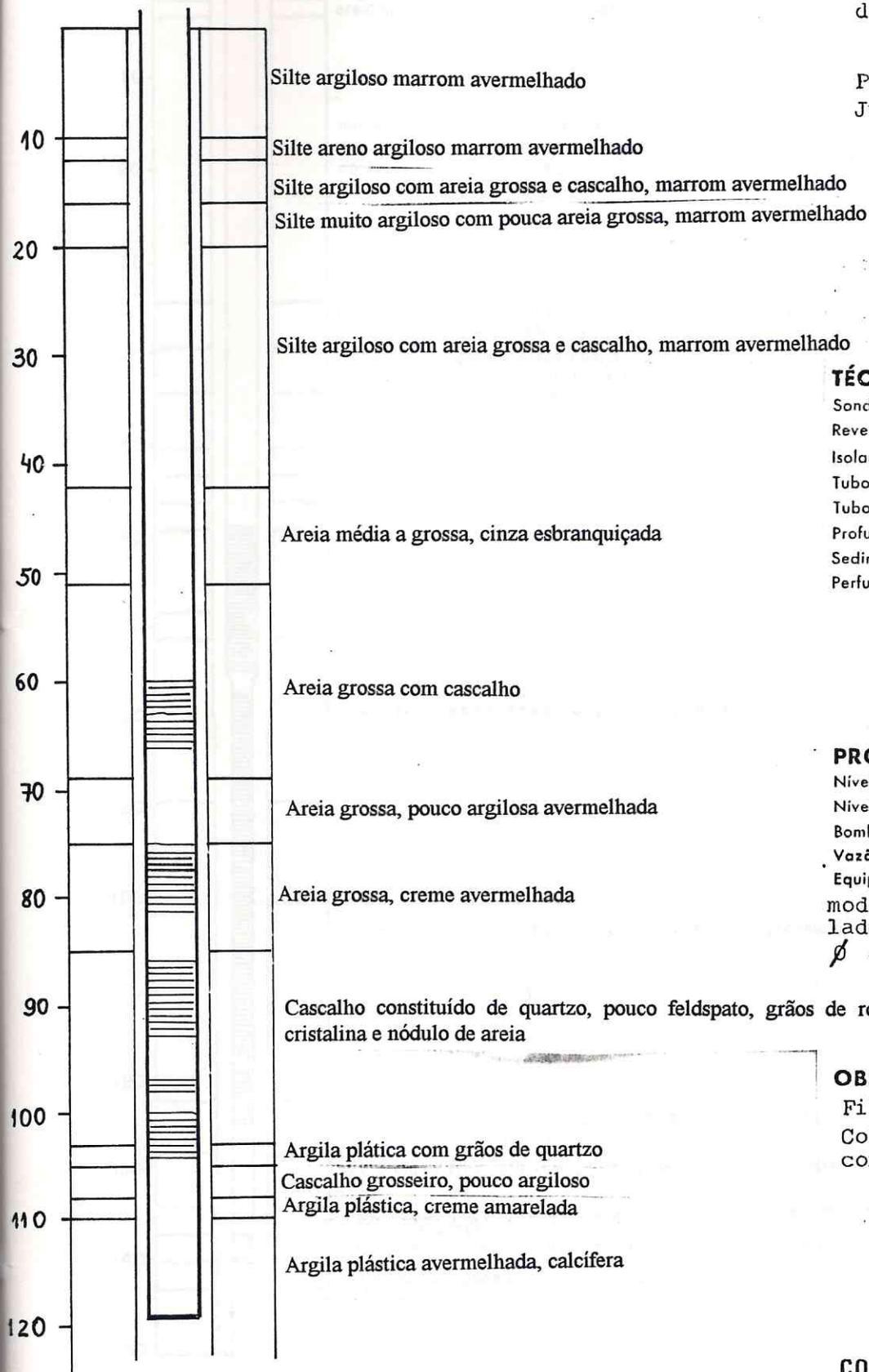
CAGECE - Cia de Água e Esgoto do Ceará

Poço JZ -09 = Lagoa Seca Juazeiro do Norte - Ce

3028/27

23 de julho de 1985

10 de agosto de 1985



**TÉCNICA**

Sondagem 9 7/8" até 227,00 metros  
 Revestimento - - metros  
 Isolamento/cimento até 15,00 metros  
 Tubos 10" de +1,10 até 119,43 metros  
 Tubos - - metros  
 Profundidade total (útil) 119,43 metros  
 Sedimentos permeáveis areias metros  
 Perfuração 17 1/2" até 125,00 metros  
 9 7/8" até 227,00 m

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático ..... 34,60 metros  
 Nível dinâmico ..... 40,38 metros  
 Bombeamento após ..... 12:00 horas  
 Vazão horária ..... 48.000 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco modelo VT-5, com injetor instalado a 119,00 metros e tubulação  $\phi$  4" x 1 1/2"

**OBSERVAÇÕES**

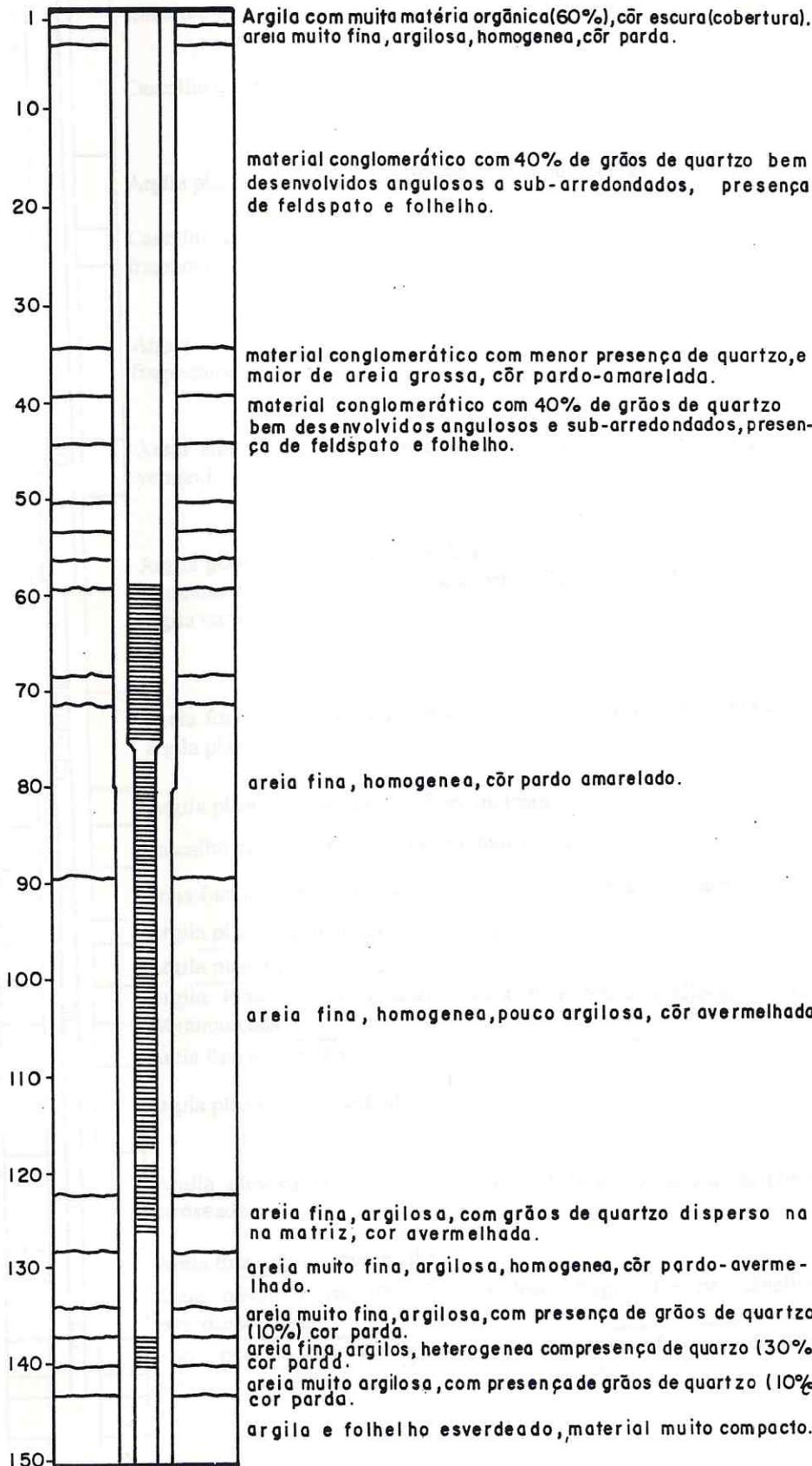
Filtros Johnson  $\phi$  10" Inox  
 Colocação dos filtros de acordo com Perfilagem elétrica.

João Bosco de Nêlio

30/09/85 789

CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS

**P5**



C - 346

COMPANHIA DE ÁGUA E  
ESGOTO DO CEARÁ - CAECE

Juazeiro do Norte - CE

CAGECE JZ-2/76

2150/6

INÍCIO 09 de agosto de 1976

TÉRMINO 19 de agosto de 1976

**TÉCNICA**

Sondagem com 6 3/4" até 150 metros

Revestimento -:- metros

Isolamento c/ cimento até 20 metros

Tubos 10" de 0,5 até 75,4 metros

Tubos 6" de 75,4 até 150 metros

Profundidade total 150 metros

Sedimentos permeáveis diversos metros

Perfuração com 18" até 80 metros

" com 16" até 150 "

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático 7,68 metros

Nível dinâmico 27,25 metros

Bombeamento após 24:00 horas

Vazão horária 120.000 litros

Equipamento Compressor Atlas Copco

modelo ST-71D. Encanamentos de

5" x 1 1/2", com injetor de ar

instalado a 75 metros de pro-

fundidade.

**OBSERVAÇÕES**

Filtros Johnson de 10" e 6",

aço inoxidável, tipo 304.

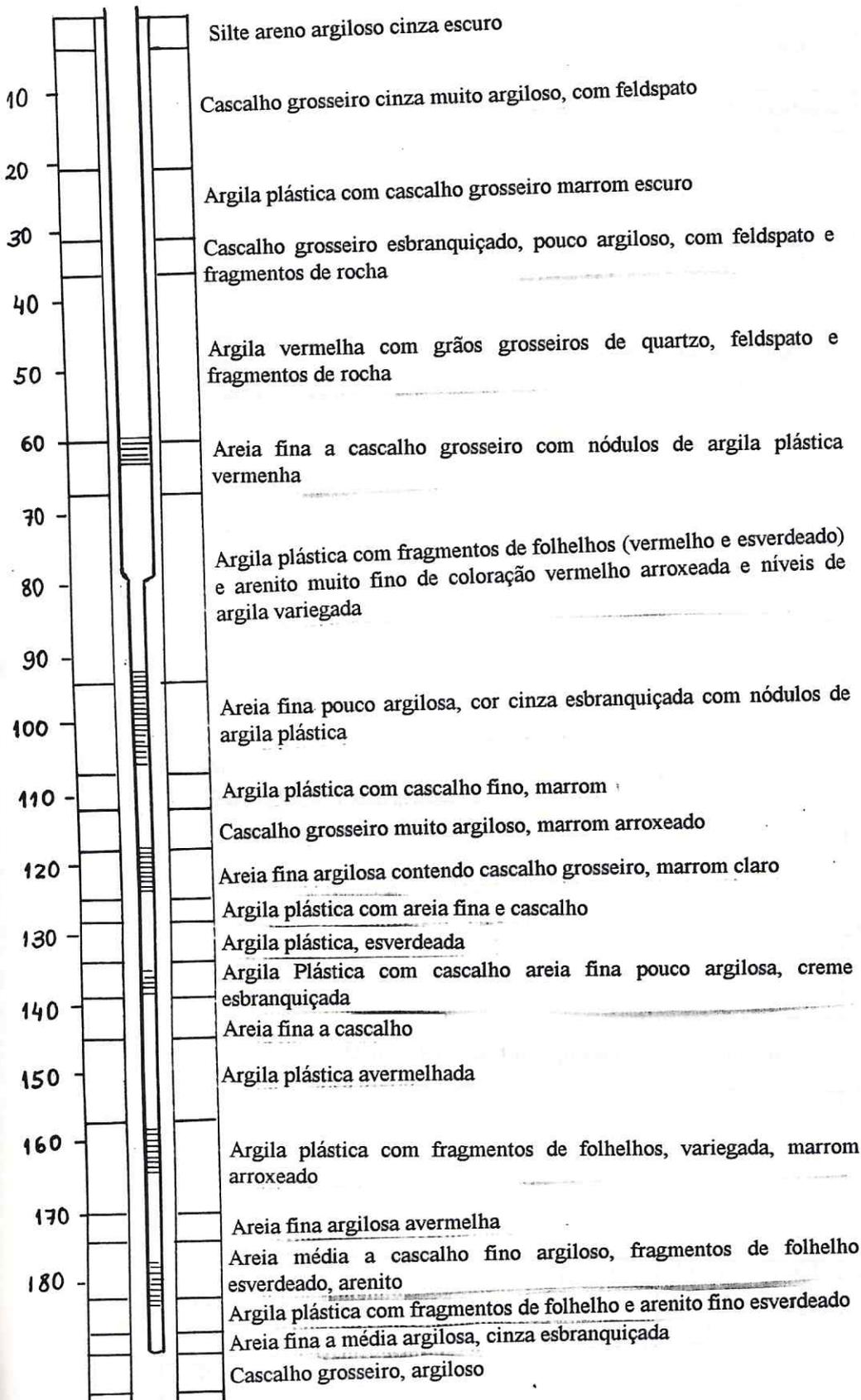
SUPERVISOR Reinaldo Rocha

09.09.76 01-785

**CORNER S.A. POÇOS ARTESIANOS,**

INDÚSTRIA E COMÉRCIO

# P6



C - 725

**CAGECE - Cia de Água e Esgoto do Ceará**  
 Estrada do Aeroporto JZ - 08  
 Juazeiro do Norte - CE

2999/32

18 de setembro de 1985

10 de outubro de 1985

### TÉCNICA

Sondagem 9 7/8" até 210,00 metros  
 Revestimento 20" (provisório) 8,0 metros  
 Isolamento cimento até 25,00 metros  
 Tubo 10" de +0,50 até 79,01 metros  
 Tubo 6" de 79,01 até 190,00 metros  
 Profundidade total (útil) 190,00 metros  
 Sedimentos permeáveis areias metros  
 Perfuração 17 1/2" até 85,00 metros  
 " 15" até 190,00 m  
 " 9 7/8" até 210,00 m

### PROVA DE VAZÃO

Nível estático ..... 15,875 metros  
 Nível dinâmico ..... 43,90 metros  
 Bombeamento após ..... 24,00 horas  
 Vazão horária ..... 46,580 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco modelo VT-5 com injetor instalado a 108,00 metros e tubulação  $\phi$  6" x 1 1/4"

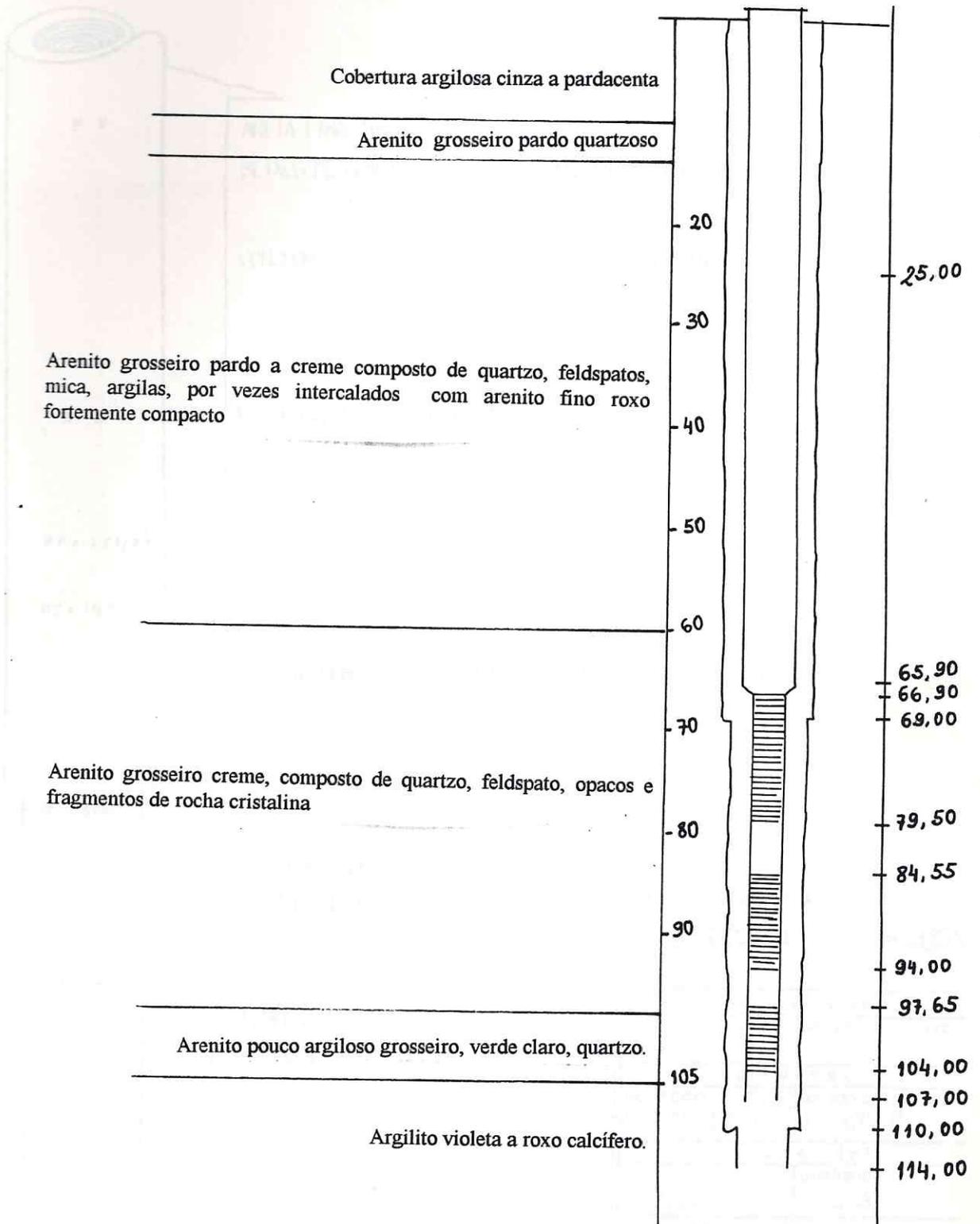
### OBSERVAÇÕES

Filtros Johnson Inox 10" e 6"  
 SLOT 40  
 Perfilagem elétrica executada pela Corner  
 João Bosco de Melo

12/11/85 789

CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS

P9

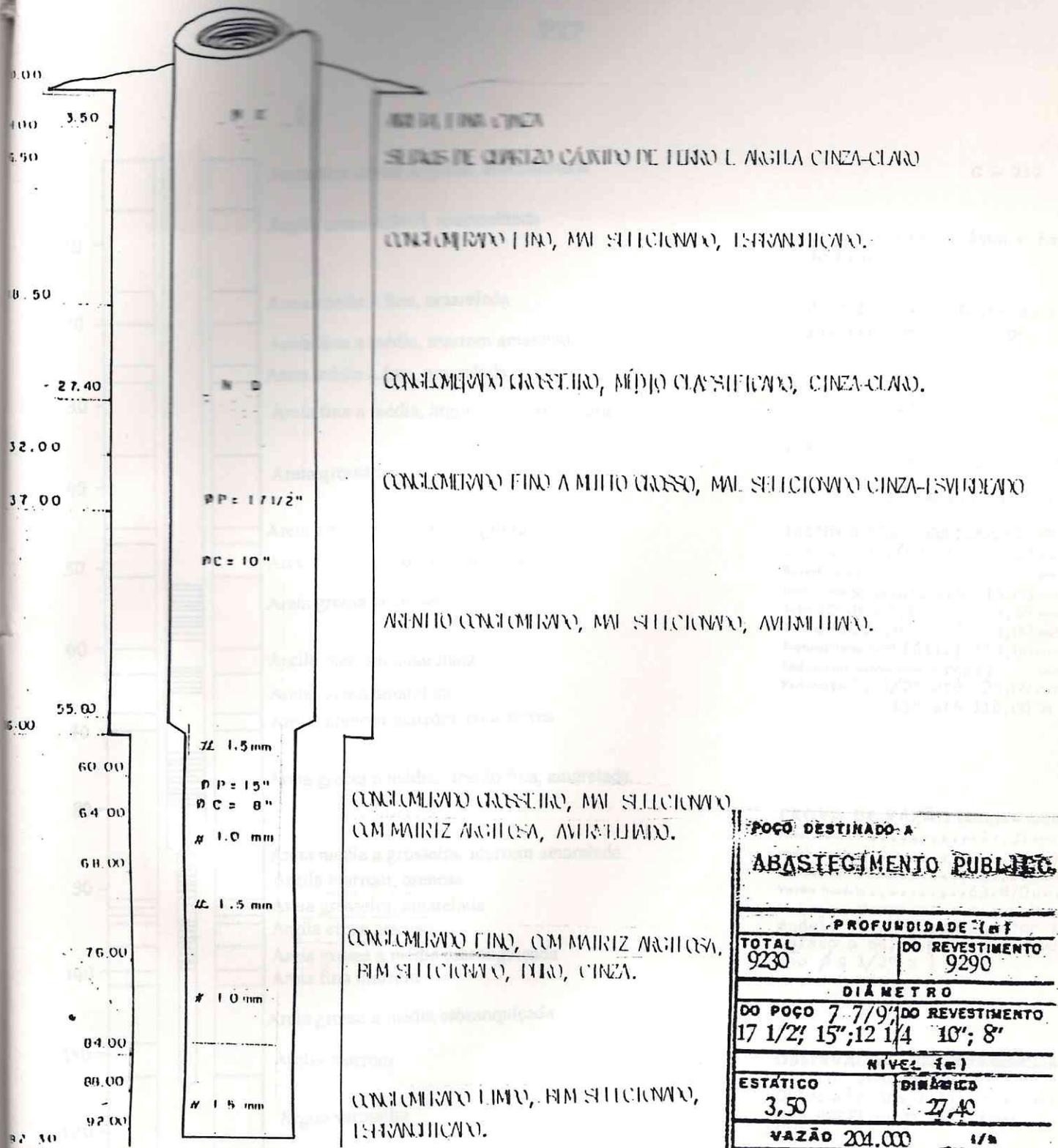


MUNICÍPIO: BARBALHA
LOCAL: ZONA URBANA
COORDENADAS:
<input type="checkbox"/> TUBO AÇO PRETO SCHEDULE - 40
<input type="checkbox"/> FILTRO INOXIDÁVEL JOHNSON
<input checked="" type="checkbox"/> PRÉ-FILTRO TIPO PÉROLA (1,5 e 3,5)
<input type="checkbox"/> CIMENTAÇÃO



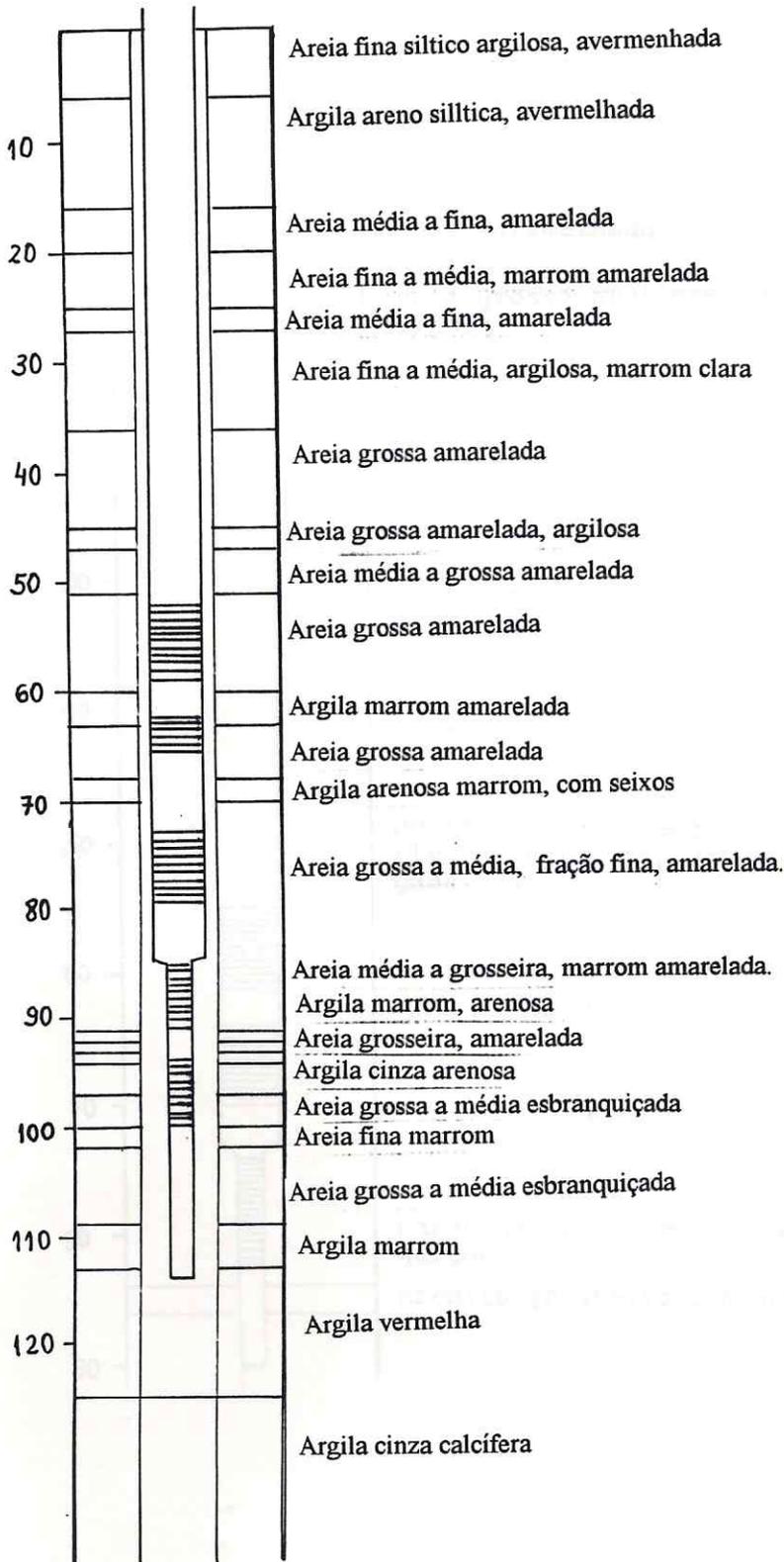
ANEXO  
73-2

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CLARA		
CAPTAÇÃO DE BARBALHA		
PÊNEIS GEOLÓGICO E TÉCNICO DO POÇO B B-04		
GEÓLOGO RESPONSÁVEL: MARIO PRATA LOSSI JR	FISCALIZAÇÃO: DELANO	
DESENHO: JOSÉ HARIO	ESC. VERTICAL: 1:500	DATA DE COMPLETAÇÃO: 10/02/86



<b>POÇO DESTINADO A</b>	
<b>ABASTECIMENTO PÚBLICO</b>	
<b>PROFUNDIDADE (m)</b>	
TOTAL 9230	DO REVESTIMENTO 9290
<b>DIÂMETRO</b>	
DO POÇO 17 1/2"; 15"; 12 1/4"	DO REVESTIMENTO 10"; 8"
<b>NÍVEL (m)</b>	
ESTÁTICO 3,50	DINÂMICO 2,40
VAZÃO 201.000 l/s	
MATERIAL DO REVESTIMENTO	
GEOMECÂNICO NERVADO	
TELA (FILTRO)	
TIPO GEOMECÂNICO FORTÍLIT	COMPRIMENTO (m) 28
DIÂMETRO 8"	RAHURA (mm) 1,00; 1,5

P27



C - 717

CAGECE - Cia de Água e Esgoto do Ceará

Poço JZ - 10 = Lagoa Seca Juazeiro do Norte - Ce

3036/28

13 de agosto de 1985

23 de agosto de 1985

**TÉCNICA**

Sondagem 9 7/8" até 116,00 metros  
 Revestimento - - - - - metros  
 Isolamento cimento até 15,00 metros  
 Tubos 10" de +1,10 até 84,86 metros  
 Tubos 5" de 84,86 até 114,00 metros  
 Profundidade total (útil) 114,00 metros  
 Sedimentos permeáveis arcias - - - - - metros  
 Perfuração 17 1/2" até 94,00 metros  
 15" até 116,00 m

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático .....17,31 metros  
 Nível dinâmico .....23,22 metros  
 Bombeamento após .....19:00 horas  
 Vazão horária .....63.970 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco modelo VT -5, com injetor instalado a 84,00 metros e tubulação  $\phi$  4 1/2" x 1 1/2"

**OBSERVAÇÕES**

Filtros Johnson  $\phi$  10" e 5" Inox  
 Colocação dos Filtros de acordo com perfilagem elétrica.

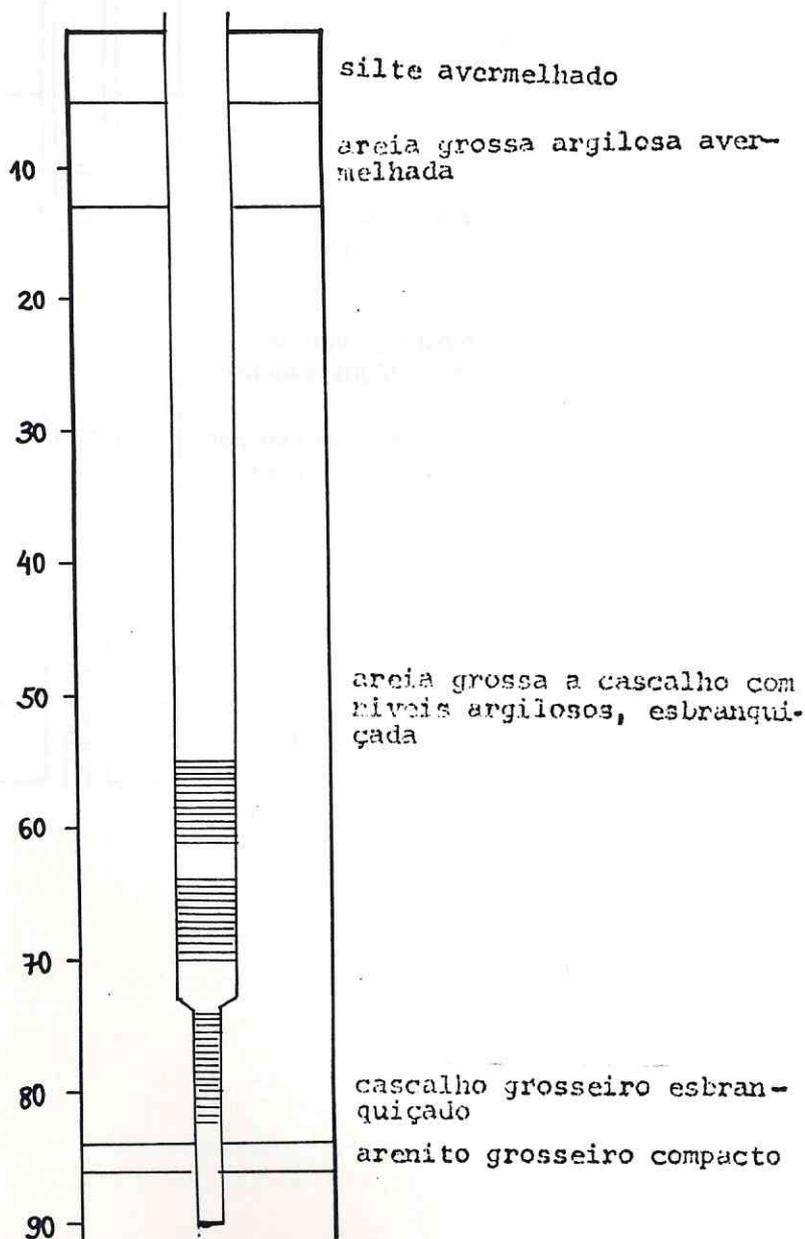
João Bosco de Mello

30/09/85 789

CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS

P28

C - 718



CAGECE - Cia de Água e Esgoto do Ceará

Bairro Lagoa Seca JZ - 11  
Juazeiro do Norte - CE

3037/29

P28

28 de agosto de 1985

11 de setembro de 1985

### TÉCNICA

Sondagem 9 7/8" até 112,00 metros  
Revestimento - - - metros  
Isolamento cimento até 15,00 metros  
Tubos 10" de + 1,00 até 73,35 metros  
Tubos 6" de 73,35 até 90,00 metros  
Profundidade total (útil) 90,00 metros  
Sedimentos permeáveis areias metros  
Perfuração 17 1/2" até 80,00 metros  
" 15" até 90,00 m  
" 9 7/8" até 112,00 m

### PROVA DE VAZÃO

Nível estático ..... 10,53 metros  
Nível dinâmico ..... 20,44 metros  
Bombearmento após ..... 24:00 horas  
Vazão horária ..... 66.000 litros  
Equipamento Compressor Atlas Copco  
modelo VT-5 com injetor instalado a 72,00 metros e tubulação  $\phi$  6" x 1 1/4"

### OBSERVAÇÕES

Filtros Johnson Inox  $\phi$  10" e  $\phi$  6" SLOT 40  
Perfilagem elétrica executada pela Corner

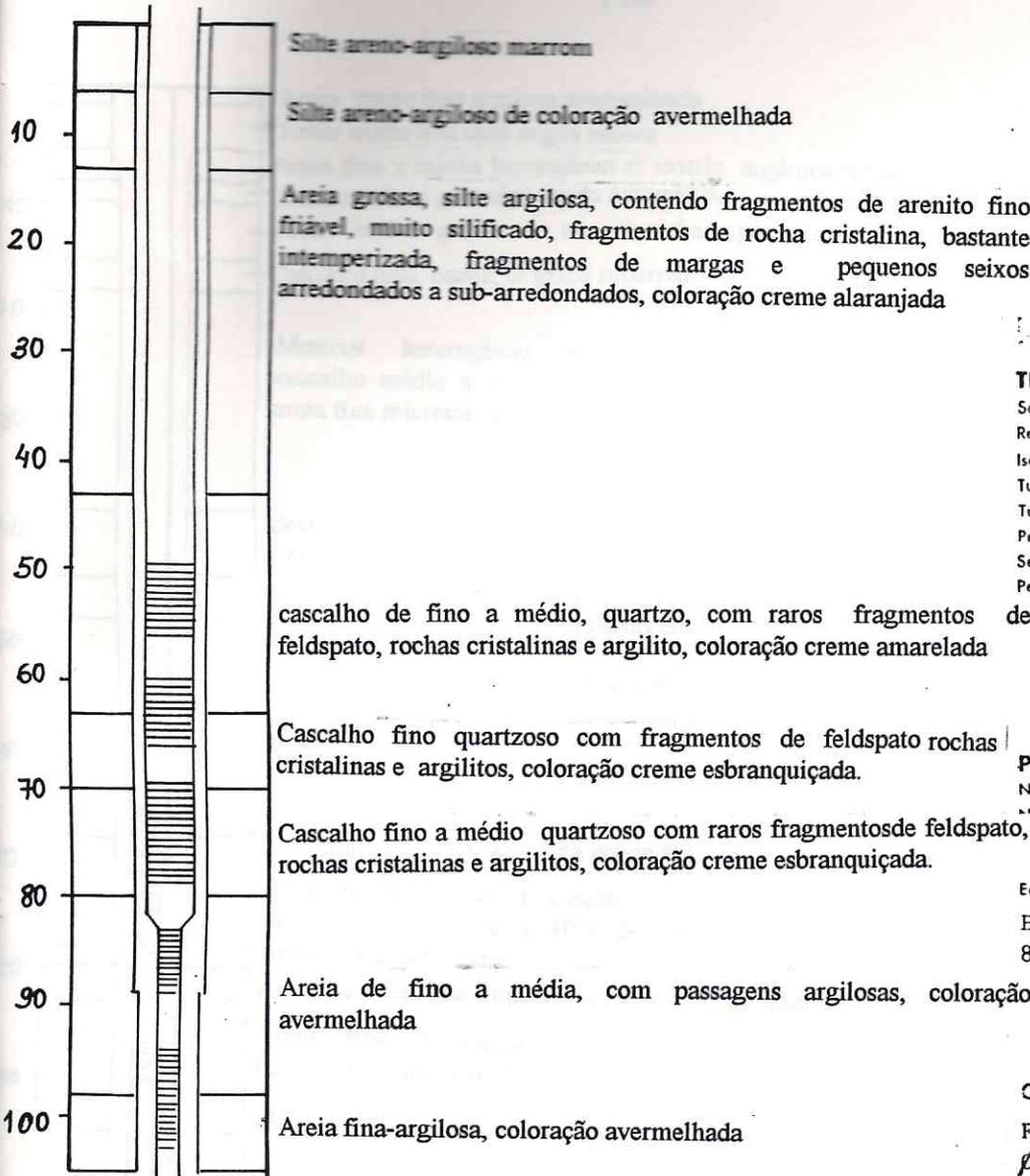
João Bosco de Melo

20/11/85 789

CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS

CAGECE -- Cia de Água e Esgoto do Ceará

Juazeiro do Norte - CE  
JZ - 16



3066/35

04 de novembro de 1985

14 de novembro de 1985

**TÉCNICA**

Sondagem  $\phi$  9 7/8" até 155,00 metros  
 Revestimentos ..... metros  
 Isolamento cimentado até 15,00 metros  
 Tubos 10" de + 0,76 até 82,20 metros  
 Tubos 6" de 82,20 até 128,00 metros  
 Profundidade total (útil) 128,00 metros  
 Sedimentos permeáveis areias ..... metros  
 Perfuração  $\phi$  17 1/2" até 90,00 metros  
 de  $\phi$  15" até 131,00 m  
 $\phi$  9 7/8" até 155,00 m

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático ..... 4,71 metros  
 Nível dinâmico ..... 13,91 metros  
 bombeamento após ..... 24:00 horas  
 vazão horária ..... 198.000 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco  
 BT 414 com injetor instalado a  
 81,0 m e tubulação  $\phi$  6" x 1 1/4"

**OBSERVAÇÕES**

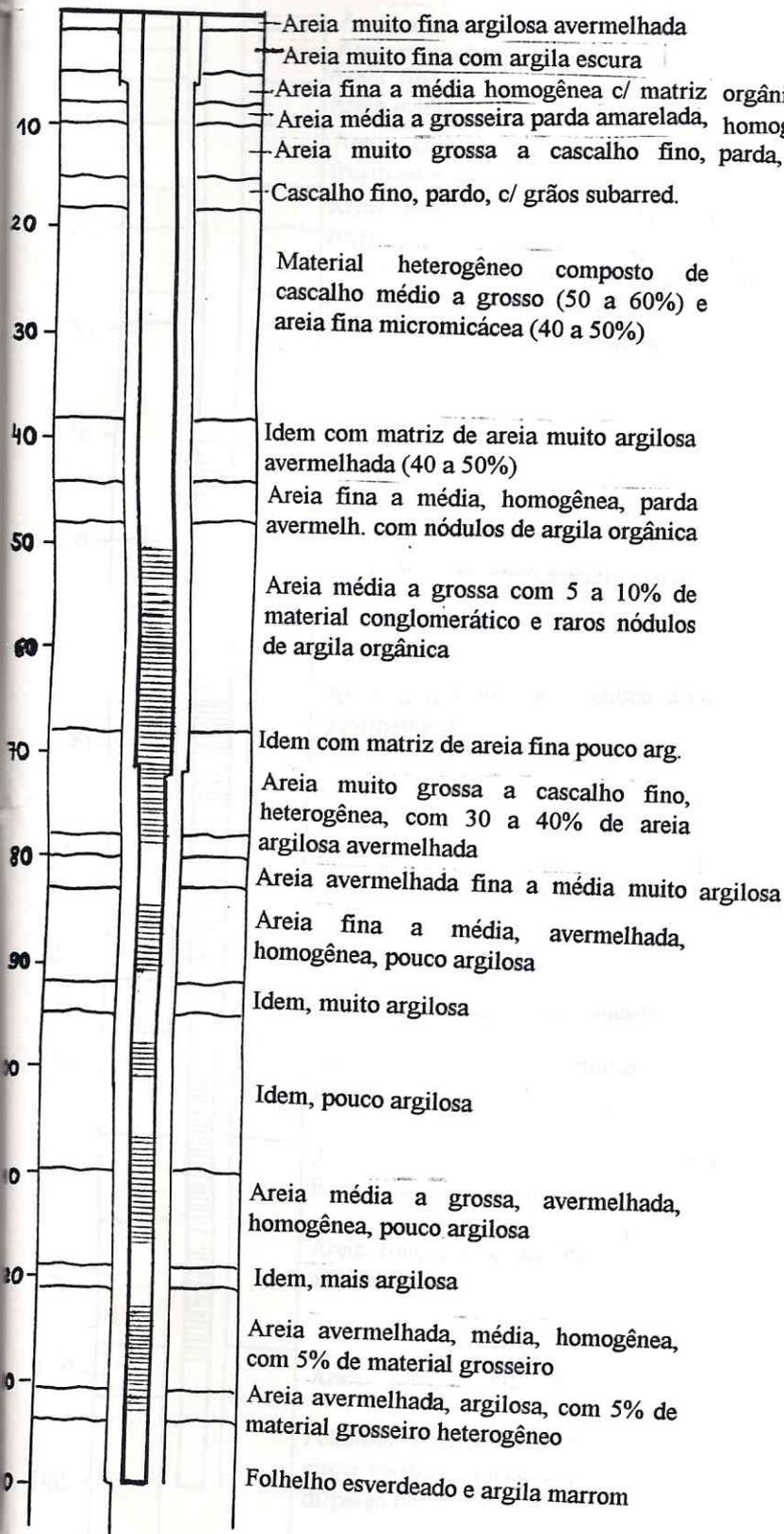
Filtros Johnson Inox SLOT 40  
 $\phi$  10" e  $\phi$  6"

João Bosco de Melo

03/02/86 789

CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS

P35



C-335

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ - CAGECE.

Aquífero de Missão Velha  
Juazeiro do Norte

JZ-3/76

2125/1

PV 86

105 de junho de 1976.

18 de junho de 1976.

**TÉCNICA**

Sondagem c/8 5/8" até 248,0 metros  
Revestimento -- metros  
Isolamento c/cimento até 20,0 metros  
Tubos de 10" de +0,45 a 71,45 metros  
Tubos de 6" de 71,45 a 139,75 metros  
Profundidade total 248,0 metros  
Sedimentos permeáveis diversos metros  
Perfuração com 22" até 6,0 metros  
" com 18" até 72,0 "  
" com 16" até 140,0 "  
" c/8 5/8" até 248,0 "

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático 2,52 metros  
Nível dinâmico 21,13 metros  
Bombeamento após 24:00 horas  
Vazão horária 120.000 litros  
Equipamento Compressor Atlas Copco modelo ST-71Dd. Encanamentos de 5" x 1 1/2", com injetor de ar instalado a 70,23 metros e sucção a 71,50 metros de profundidade.

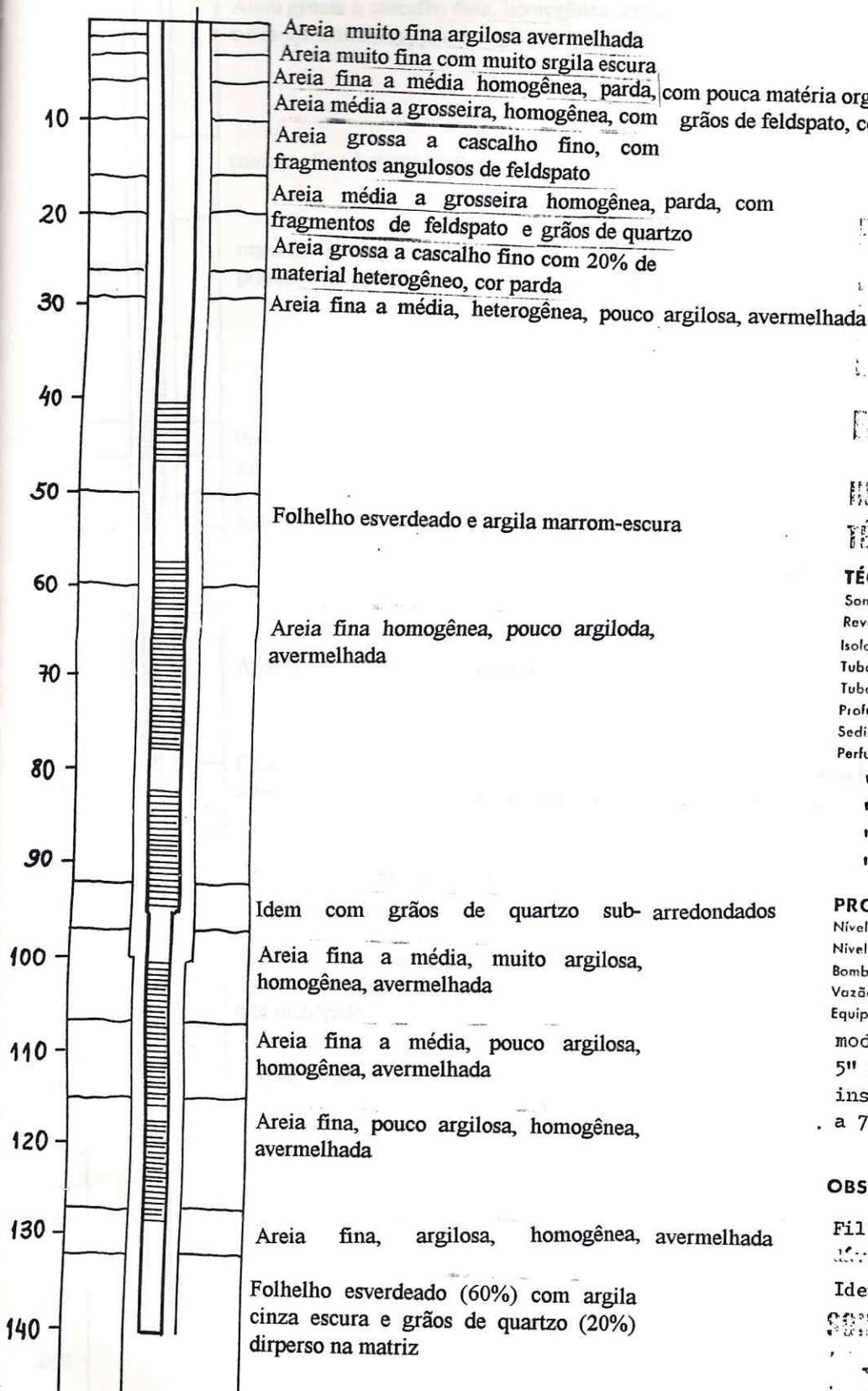
**OBSERVAÇÕES**

Filtros JOHNSON 10" e 6", aço inoxidável.

José Rodrigues

22.07.76 01-789

CORNER S.A. POÇOS ARTESIAIS,  
INDUSTRIA E COMERCIO



C-336

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ - CAGECE.

Aquífero de Missão Velha

Juazeiro do Norte

JZ-4/76

2126/2

INÍCIO 17 de junho de 1976.

TERMINO 27 de junho de 1976.

**TÉCNICA**

Sondagem c/8 5/8" até 152,0 metros  
 Revestimento de 20" até 6,0 metros  
 Isolamento c/cimento até 20,0 metros  
 Tubos de 10" de +0,90 a 94,5 metros  
 Tubos de 6" de 94,10 a 140,3 metros  
 Profundidade total útil 140,3 metros  
 Sedimentos permeáveis diversos metros  
 Perfuração com 22" até 6,0 metros  
 " com 18" até 100,0 "  
 " com 16" até 140,0 "  
 " com 12" até 142,0 "  
 " c/8 5/8" até 152,0 "

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático jorrante metros  
 Nível dinâmico 23,41 metros  
 Bombeamento após 24:00 horas  
 Vazão horária 144.000 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco modelo ST-71Dd. Encanamentos de 5" x 1 1/2", com injetor de ar instalado a 70 metros e sucção a 71,50 metros de profundidade.

**OBSERVAÇÕES**

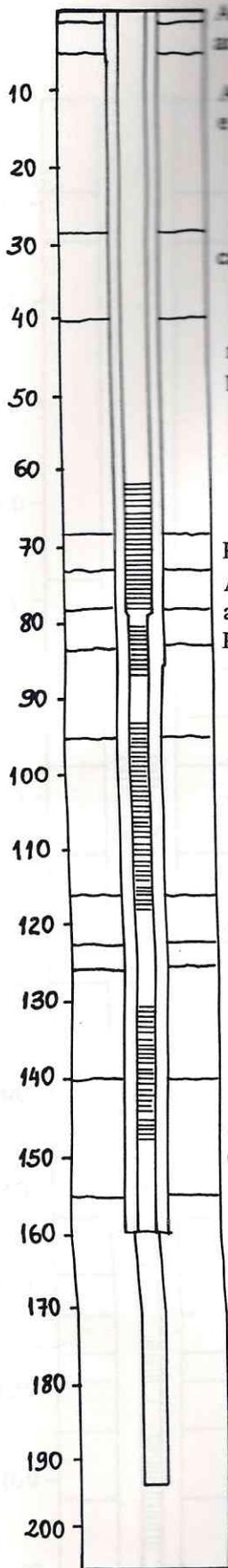
Filtros JOHNSON 10", aço inoxiável.

Idem, idem, de 6".

CONSTRUTOR Reinaldo Rocha

22.07.76 01-789

**CORNER S.A. POÇOS ARTESIANOS,**  
INDÚSTRIA E COMÉRCIO



Areia muito fina, homogênea, esbranquiçada (cobertura)  
 areia fina, argilosa, 40% de matéria orgânica, cor escura.

Areia grossa e cascalho fino, homogênea, grãos de quartzo angulosos e sub-arredondados, pouco argilosa, cor parda.

cascalho fino heterogêneo, pouco argiloso, cor pardo avermelhado.

material grosseiro, 40% quartzo, com grãos bem desenvolvidos, presença (20%) de folhelho esverdeado, disperso na matriz arenosa

Pedregulho

Areia grossa com grãos de quartzo heterogênea, pouco argilosa, cor avermelhada

Pedregulho

Areia grossa a cascalho fino, heterogênea, pouco argilosa, cor avermelhada.

Areia grossa e cascalho grosso, heterogêneo, avermelhada

Cascalho grosso heterogêneo, grãos de quartzo angulosos e sub-arredondados, avermelhados, areia média, heterogênea, argilosa.

Areia grossa, heterogênea, pouco argilosa, avermelhada.

cascalho fino, heterogêneo, grãos de quartzo sub-arredondados, alguma presença de folhelho esverdeado (10%), cor vermelho-esbranquiçado.

Argila marrom-escura e folhelho esverdeado, 30% de grãos de quartzo disperso na matriz

C - 340

COMPANHIA DE AGUA E  
 ESGOTO DO CEARÁ - CAGECE  
 Juazeiro do Norte - CE  
 CAGECE JZ-5/76  
 2139/5

INÍCIO 19 de julho de 1976  
 TÉRMINO 01 de agosto de 1976

**TÉCNICA**  
 Sondagem com 8 5/8" até 194 metros  
 Revestimento - " - " metros  
 Isolamento c/ cimento até 70 metros  
 Tubos 10" de +0,5 até 78,6 metros  
 Tubos 6" de 78,6 até 160,0 metros  
 Profundidade total útil 100,0 metros  
 Sedimentos permeáveis diversos metros  
 Perfuração com 22" até 6 metros  
 " com 18" até 80 " "  
 " com 16" até 100 " "  
 " com 8 5/8" até 194 " "

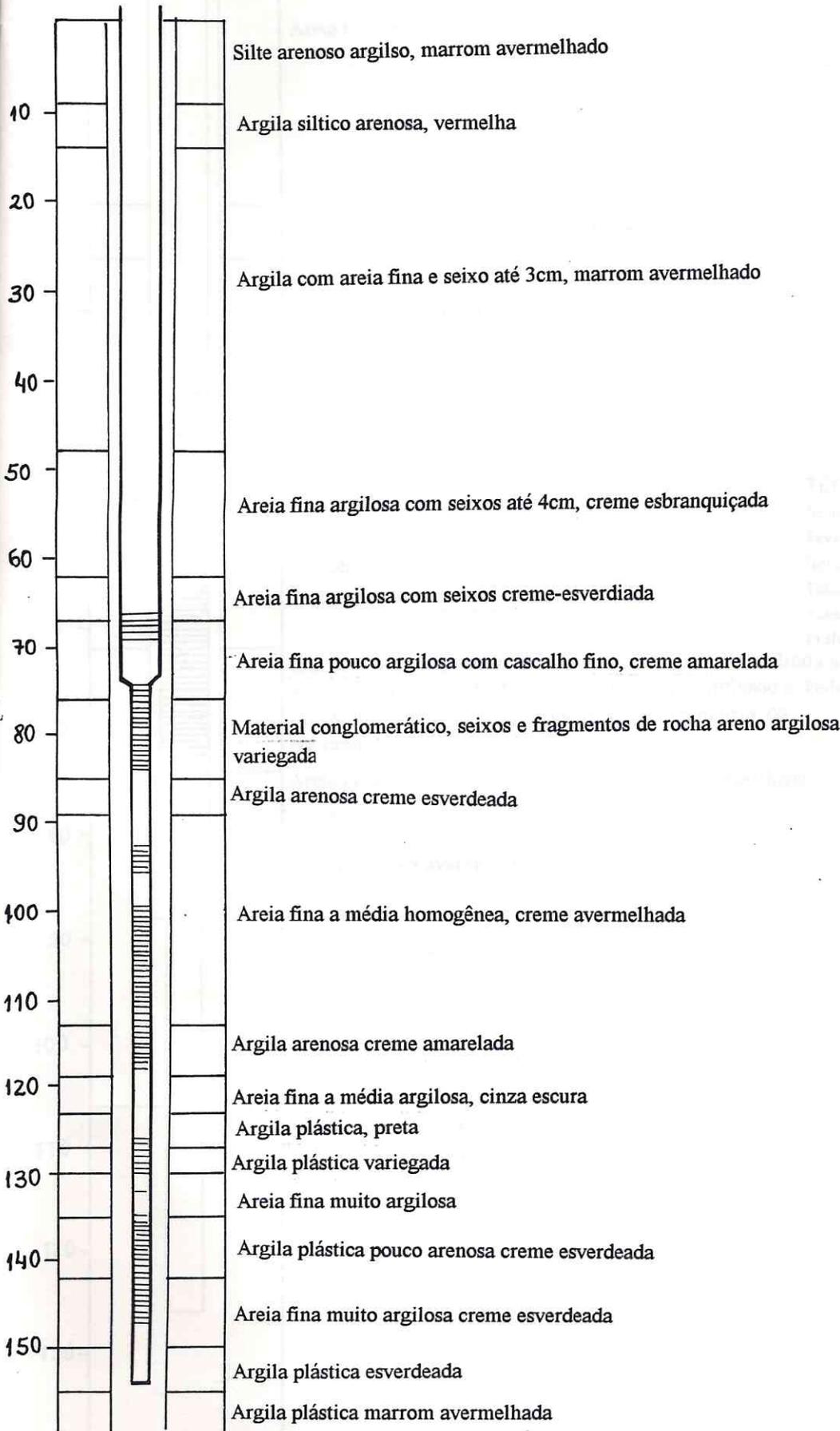
**PROVA DE VAZÃO**  
 Nivel estático jorrante metros  
 Nivel dinâmico 29,92 metros  
 Bombeamento após 24:00 horas  
 Vazão horária 144.000 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco modelo ST-71Dd. Encanamentos de 5" x 1 1/2", com injetor de ar instalado a 75 metros de profundidade.

**OBSERVAÇÕES**  
 Filtros Johnson de 10" e 6", aço inoxidável, tipo 304.

SONDADOR Reinaldo Rocha  
 16.08.76 01-789

CORNER S.A. POÇOS ARTESIANOS,  
 INDUSTRIA E COMERCIO

**P39**



C - 726

CAGECE - Cia de Água e Esgoto do Ceará

Lagoa Seca JZ - 14  
JUAZEIRO DO NORTE - CE

3053/33

02 de outubro de 1985

09 de outubro de 1985

**TÉCNICA**

Sondagem 9 7/8" até 170,00 metros  
 Revestimento - - - metros  
 Isolamento cimento até 15,00 metros  
 Tubos 10" de +0,76 até 74,20 metros  
 Tubos 6" de 74,20 até 154,00 metros  
 Profundidade total (útil) 154,00 metros  
 Sedimentos permeáveis areias - - - metros  
 Perfuração 17 1/2" até 80,00 metros  
 " 15" até 160,00 m  
 " 9 7/8" até 170,00 m

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático.....8,86 metros.  
 Nível dinâmico.....20,41 metros  
 Bombeamento após.....24:00 horas  
 Vazão horária.....158.400 litros  
 Equipamento Compressor Atlas Copco modelo VT-5 com injetor instalado a 72,00 metros e tubulação  $\phi$  6" x 1 1/4"

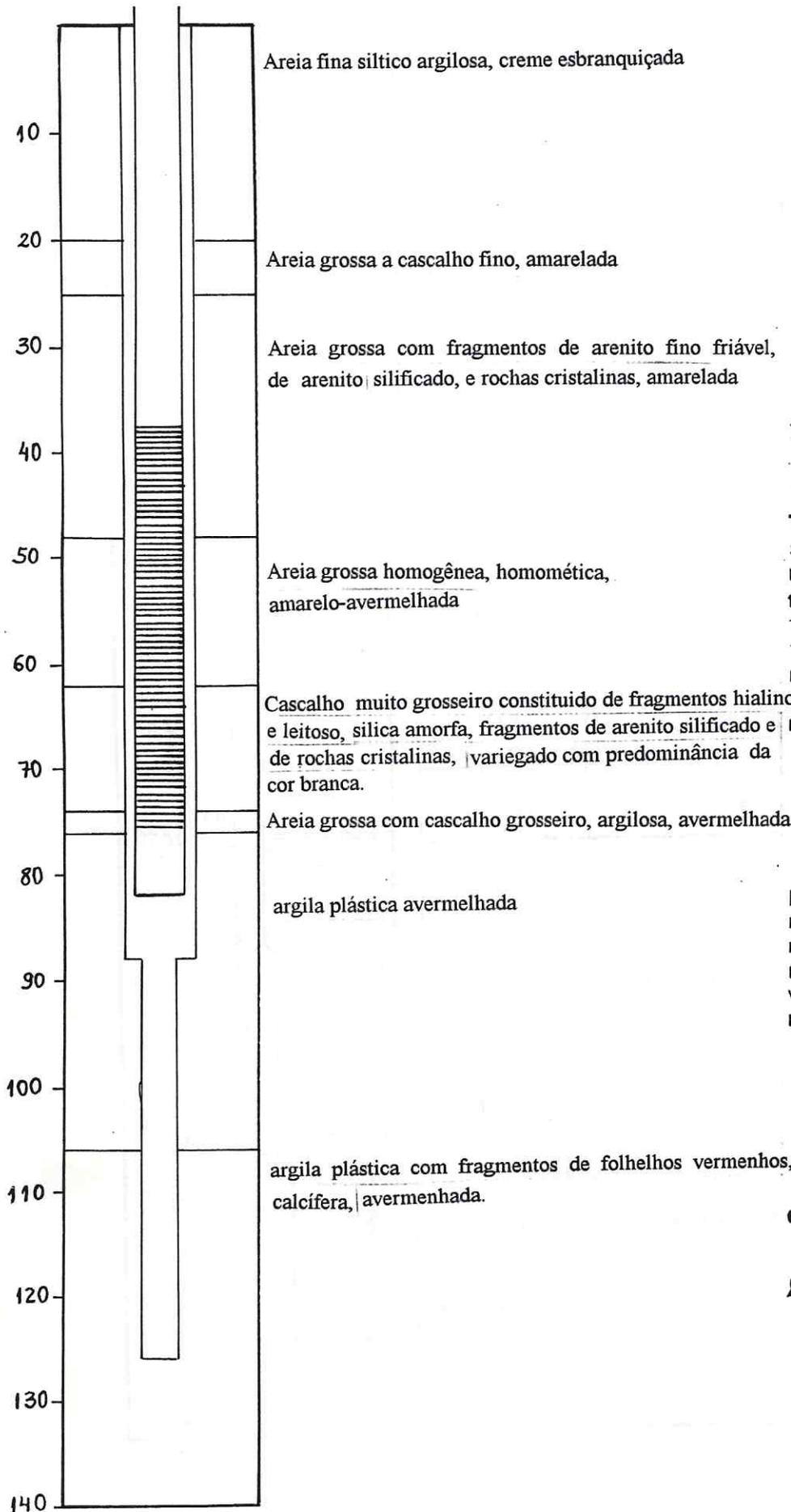
**OBSERVAÇÕES**

Filtros Johnson Inox 10" e 6" SLOT 40  
 Perfilagem elétrica executada pela Corner

João B. Alexandre

12/11/85 789

**CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS**



C - 741

CAGECE - Cia de Água e Esgoto do Ceará

Juazeiro do Norte - CE

JZ - 17

3080/36

20 de novembro de 1985

27 de novembro de 1985

**TÉCNICA**

Sondagem  $\phi$  9 7/8" até 126,00 metros

Revestimento ..... metros

Isolamento cimentado até 15,00 metros

Tubos 10" de + 0,80 até 82,00 metros

Tubos ..... metros

Profundidade total (útil) 82,00 metros

edimentos permeáveis areias ..... metros

Perfuração  $\phi$  17 1/2" até 88,00 metros

$\phi$  9 7/8" até 126,00 m

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático ..... 1,39 metros

Nível dinâmico ..... 13,06 metros

Bombeamento após ..... 24:00 horas

Vazão horária ..... 214,000 litros

Equipamento Compressor Atlas Copco

BT 414 com injetor instalado a

80,0 m e tubulação  $\phi$  6" x 1 1/4"

**OBSERVAÇÕES**

Filtros Johnson Inox SLOT 40  
 $\phi$  10"

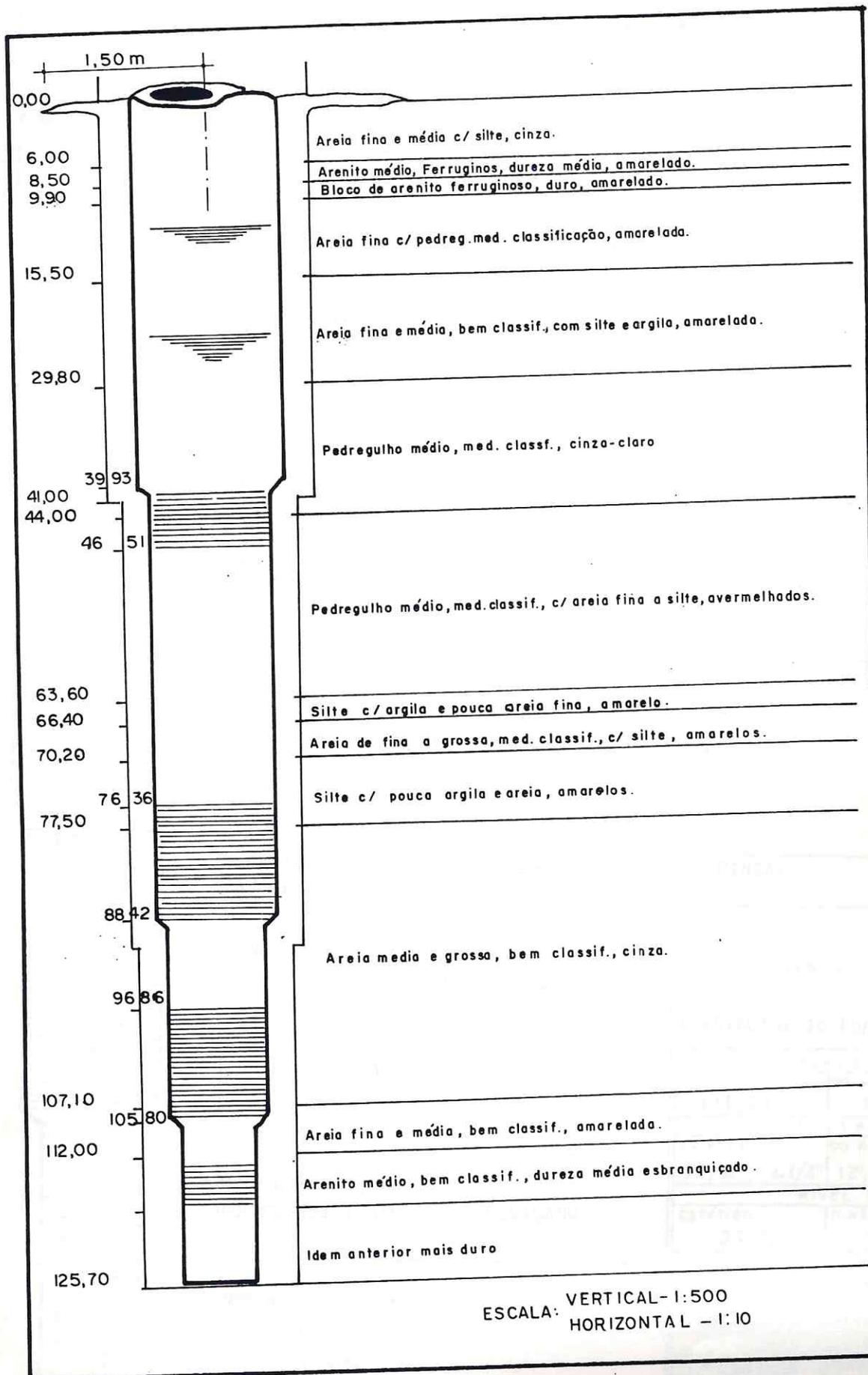
João Bosco de Melo

03/02/86

789

CORNER S.A. PERFURAÇÃO DE POÇOS

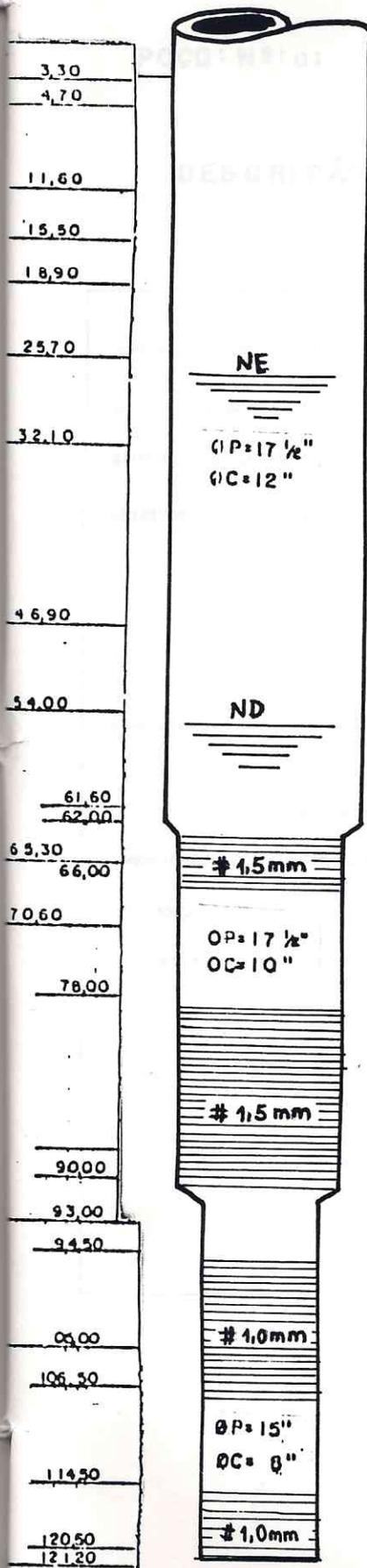
P45



**RELATÓRIO FINAL DO POÇO**

POÇO Nº PT.8 CE 44/91 CRA DIRETORIA REGIONAL DO CEARÁ ESTADO CEARÁ  
 MUNICÍPIO CRATO LOCALIDADE PARQUE DE EXPOSIÇÕES INICIADO EM 04/11 CONCLUÍDO EM 10/11  
 PERMANÊNCIA DA PERFURATRIZ NO LOCAL 08 DIAS DIAS EFETIVOS DE PERFURAÇÃO (P<sub>e</sub>) 05  
 SONDADOR EDILSON FERREIRA NOBERTO PERFURATRIZ CE-COMB.02

**P47**



AREIA MÉDIA, BEM CLASSIFICADA, AVERMELHADA  
 AREIA FINA E MÉDIA, AVERMELHADA  
 AREIA GROSSA BEM CLASSIFICADA, AVERMELHADA  
 CASCALHO FINO COM AREIA, BEM CLASSIFICADO, AMARELADO  
 CONGLOMERADO COM MATRIZ ARGILOSA  
 CONGLOMERADO FINO, DE DUREZA MÉDIA, AMARELADO  
 ARENITO GROSSEIRO, BEM CLASSIFICADO, DUREZA MÉDIA, AMARELADO  
 CONGLOMERADO MÉDIO, BEM CLASSIFICADO, DURO, CINZA-CLARO  
 ARENITO MÉDIO, MED, CLASSIFICADO, DURO, CINZA-AMARELADO  
 CONGLOMERADO POLIMÍTICO, MAL CLASSIFICADO, ESBRANQUIÇADO MUITO DURO

ARENITO MÉDIO, BEM CLASSIFICADO, ESBRANQUIÇADO  
 CONGLOMERADO POLIMÍTICO, MAL CLASSIFICADO, MUITO DURO, ESBRANQUIÇADO

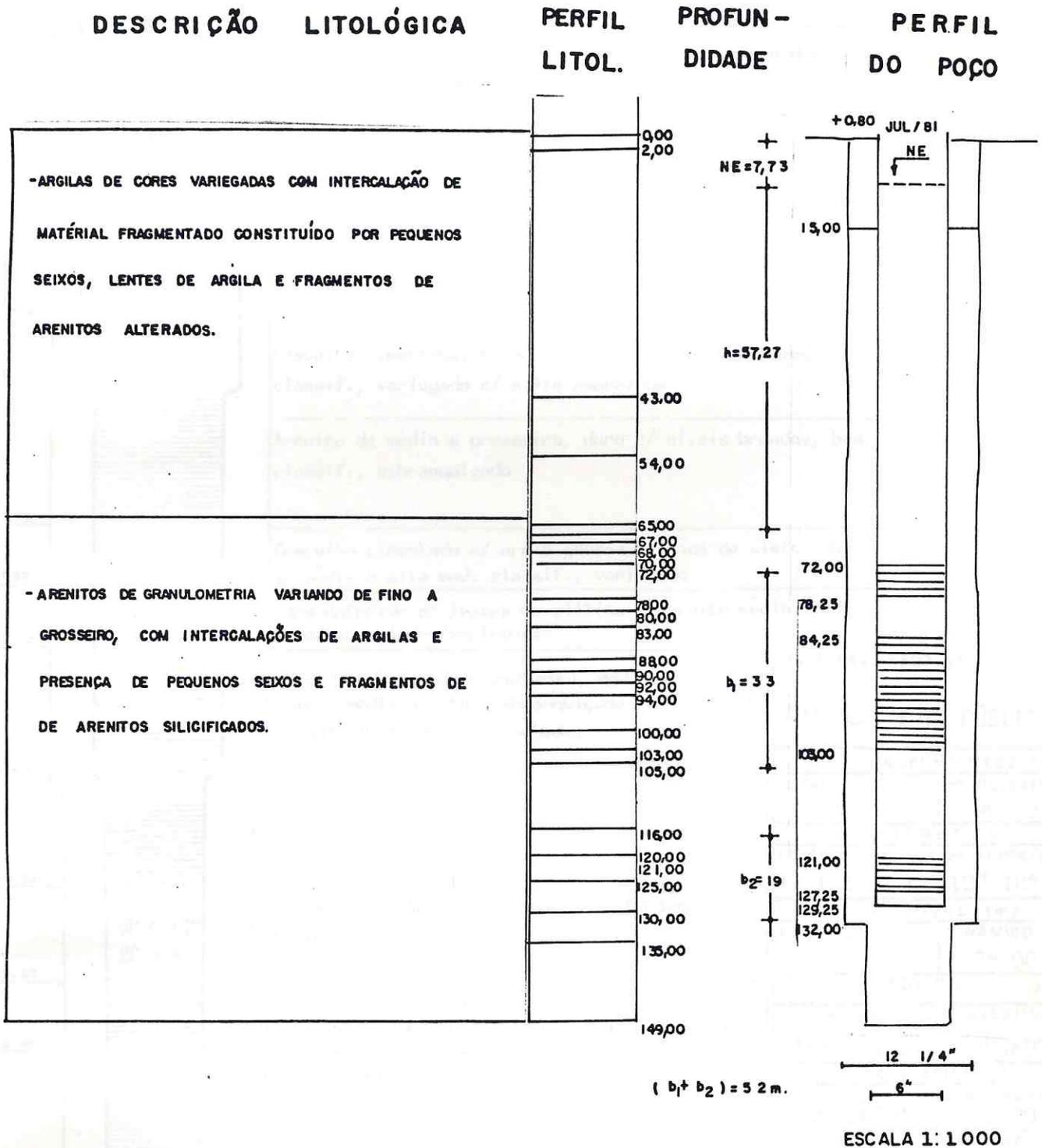
POÇO DESTINADO A:	
ABASTECIMENTO PÚBLICO	
PROFUNDIDADE (m)	
TOTAL	DO REVESTIMENTO
121,20	120,80
DIÂMETRO	
DO POÇO	DO REVESTIMENTO
17 1/2", 12.1/4"	12", 10", 8"
NÍVEL (m)	
ESTÁTICO	DINÂMICO
25,70	54,00
VAZÃO 230.000	l/h
MATERIAL DO REVESTIMENTO	
GEO MECÂNICO NERVURADO	
TELA (FILTRO)	
TIPO FORTLIT GEO MECÂNICO	COMPRIMENTO (m)
	34
DIÂMETRO	RANHURA (mm)
10", 8"	1.5 ; 1,0

P48

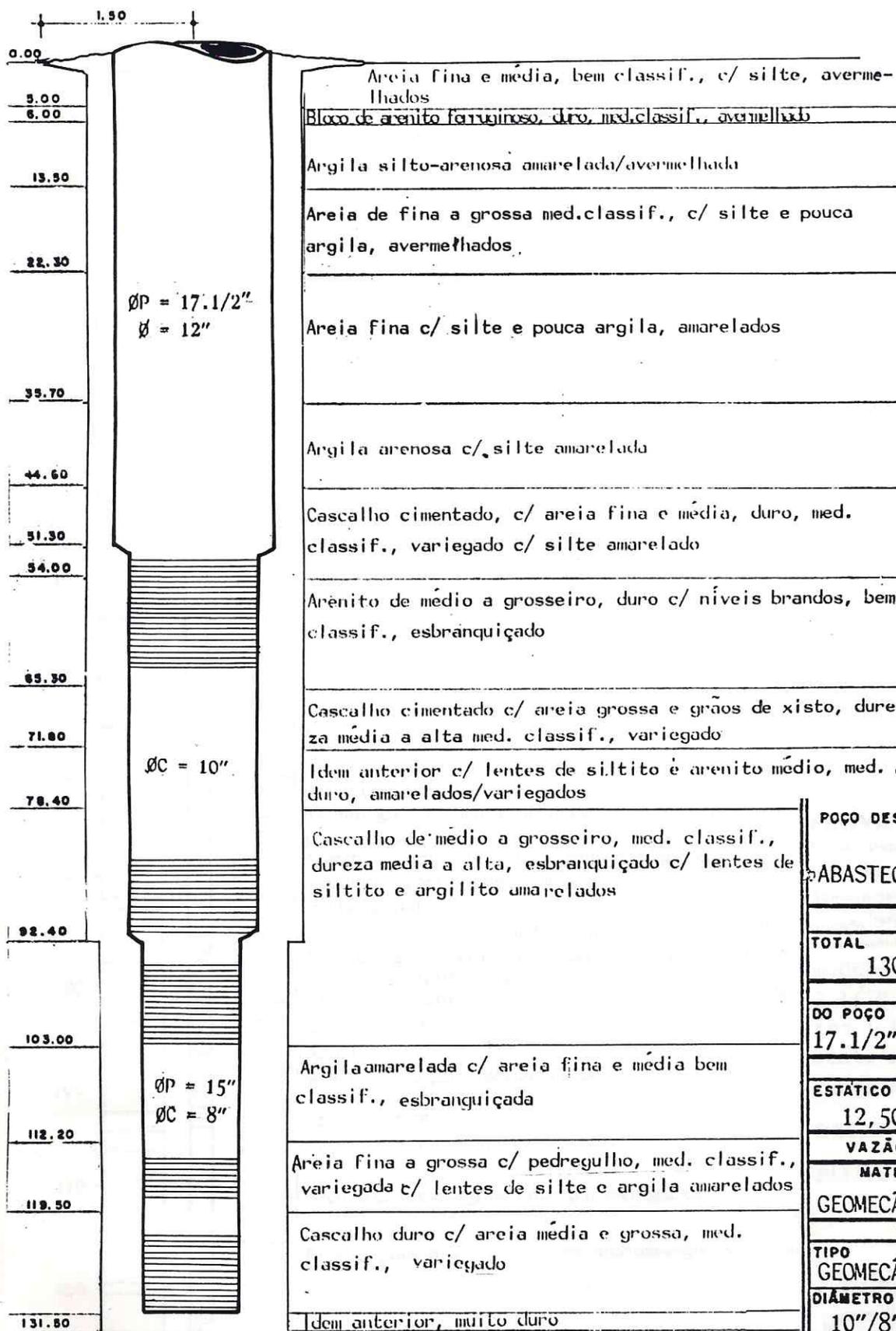
POÇO: Nº: 01

LOCAL: S. SÃO PEDRO

MUNICÍPIO: ABAIARA



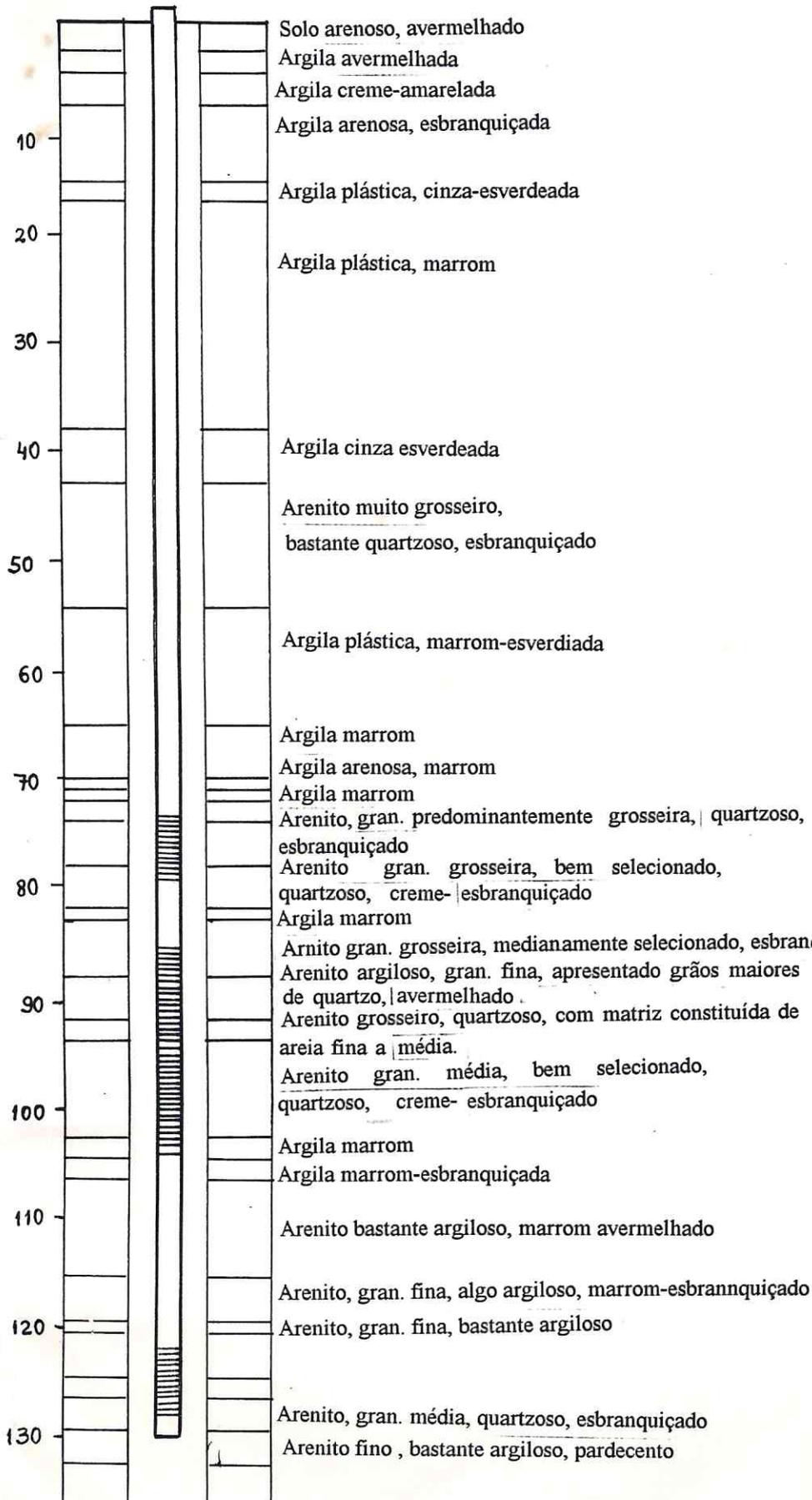
PT.6 CE-18/90 CRA (SÃO RAIMUNDO II)



POÇO DESTINADO A:

ABASTECIMENTO PÚBLICO

PROFUNDIDADE (m)	
TOTAL	DO REVESTIMENTO
130,00	90,30 m
DIÂMETRO	
DO POÇO	DO REVESTIMENTO
17.1/2" e 15"	12", 10" e 8"
NÍVEL (m)	
ESTÁTICO	DINÂMICO
12,50	28,00
VAZÃO 250.000 l/h	
MATERIAL DO REVESTIMENTO	
GEOMECÂNICO NERVURADO	
TELA (FILTRO)	
TIPO	COMPIMENTO (m)
GEOMECÂNICO	20/20
DIÂMETRO	RANHURA
10"/8"	0,75:1,00 e 1,50mm



COMPANHIA DE ÁGUA REES  
GOTO DO CEARÁ - SAGDOR  
PROPRIETÁRIO

Abatara - CE  
INDÍCIO (poco - 0)

PERFURAÇÃO 267/18

INÍCIO 07 de julho de 1981

TÉRMINO 25 de junho de 1982

**TÉCNICA**

Sondagem COM 8 1/8" até 149,00 metro  
Revestimento -.- metro  
Isolamento c/cimento até 15,00 metro  
Tubos de 6" de +0,80 a 129,25 metro  
Tubos -.- metro  
Profundidade total útil 129,25 metro  
Sedimentos permeáveis arenitos metro  
Perfuração COM 12 1/4" a 132,00 metro  
" " 8 5/8" a 149,00 "

**PROVA DE VAZÃO**

Nível estático 7,00 metro  
Nível dinâmico 17,00 metro  
Bombeamento após 24,00 hora  
horária 12.000 litro  
Equipamento Compressor Atlas Copc

modelo VT-5. Encanamentos de 3 1/2" x 1 1/4" ( ar por dentro ) instalados respectivamente a 78 e 82 metros de profundidade.

**OBSERVAÇÕES**

Filtros Hidrosolo galv., ø 6"

SONDADOR João Basco

04.08.81 01-77  
60-477-PA

**CORNER S.A. POÇOS ARTESIANO**

Avenida Corifeu de Azevedo Marques, 583 - Butan  
CEP 05581 - São Paulo, SP