UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MONOGRAFIA DO AQUÍFERO JANDAÍRA
DA BACIA POTIGUAR

Volume 1 - Texto

Gildo Mistretta

Orientador: Prof. Dr. André Davino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação

São Paulo
1984

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MONOGRAFIA DO AQUÍFERO JANDAÍRA DA BACIA POTIGUAR

Gildo Mistretta

Orientador: Prof. Dr. André Davino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente:	<u>Dr. A. Davino</u>	<u>[Signature]</u>
Examinadores:	<u>Dr. B.B. de Brito Neves</u>	<u>[Signature]</u>
	<u>Dr.^a M. Szikszay</u>	<u>[Signature]</u>

São Paulo
1984

... .O Senhor respondeu a Moisés:

"Passa adiante do povo, leva contigo alguns dos anciãos de Israel, toma na mão tua vara com que feriste o Nilo, e vai. Eis que estarei ali diante de ti sobre o rochedo do monte Horeb: ferirás o rochedo e a água jorrará dele: assim o povo poderá beber".

(Êxodo 17: 5 e 6)

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005223

A
Salvador (in memoriam) e Francisca,
meus pais; Maria Estela, minha espo
sa, e Guilherme e Mônica, meus fi
lhos, dedico esta monografia.

AGRADECIMENTOS

O autor externa pública e reverentemente a sua profunda gratidão às pessoas e instituições cuja colaboração e conjugação de esforços tornou possível a elaboração da presente monografia.

Ao Professor Doutor André Davino agradeço a orientação durante o curso de pós-graduação e desenvolvimento das atividades envolvidas na elaboração desta Dissertação.

Ao Professor Doutor Aldo da Cunha Rebouças agradeço as sugestões apresentadas por ocasião do início das pesquisas.

Ao Professor Doutor Benjamin Bley de Brito Neves agradeço as proveitosas sugestões apresentadas, na qualidade de relator de parecer sobre a Dissertação.

Especiais agradecimentos são dirigidos aos colegas do Agrupamento de Hidrogeologia do IPT, Geólogo José Luiz Albuquerque Filho e Geólogo Sergio Gouveia de Azevedo que, num gesto de verdadeiro altruísmo, assumiram a título de real colaboração, como se fossem suas as responsabilidades de muitas atividades durante o desenvolvimento dos trabalhos.

Ao Geólogo Dr. Alcides Frangipani e Geólogo José Pompeu dos Santos sou grato pelas proveitosas discussões técnicas sobre os temas desenvolvidos.

Aos colegas também do agrupamento de Hidrogeologia, Geólogo João Alberto Bottura e Geólogo Júlio Cesar Arantes Perroni apresento meus agradecimentos pela colaboração prestada.

Ao estudante Sr. Urandi Moreno Pires Correia, assistente aluno de Geologia no Agrupamento de Hidrogeologia sou grato pelo auxílio diligente ao autor, prestado em muitas atividades básicas de coleta e tratamento de dados.

Aos técnicos Maurício Acioly Ribeiro Junior, Otávio Martins e Vitório Celso Populin agradeço a colaboração prestada também na coleta e preparação de documentos básicos para o tratamento de dados.

Aos colegas do Agrupamento de Geomatemática, Engenheiro de Minas Genis Garcia Pereira Junior, Estatísticos Lucia de Fátima Silveira Dozzi e Hermes Chaves Filho e Físico Mário Otávio Costa, e também ao Estatístico José Alberto Quintanilha do Agru

pamento de Recursos Minerais, agradeço a dedicação no desenvolvimento e aplicação de programas computacionais para tratamento dos dados.

Ao Contabilista José Roberto Pissiguelli sou grato pelas considerações feitas no concernente à avaliação de custos de produção de água.

Aos colegas do Agrupamento de Geologia Geral, Geólogo Carlos Alberto Bistrichi e Geólogo Dr. Celso Dal Ré Carneiro pelas inestimáveis sugestões apresentadas.

Ao colega Geólogo Antonio Celso de Oliveira Braga, do Agrupamento de Geofísica, fico agradecido pelas atenções nas discussões técnicas na área de Geofísica.

Especiais agradecimentos manifesto também à Srta. Aradi Jecira da Cruz e Sra. Magali Caracciolo Martins que incansáveis e pacientes, com prestimosa datilografia transformaram desaparelhados manuscritos em um texto de modulada e atraente escrita.

Ao Sr. Francisco Carlos Ribeiro, Sr. Waldyr Dantas Cortez, Sr. Jayme Vergilio e ao Sr. Aluizio Souza Frota, agradeço o cuidadoso trabalho de preparação das ilustrações.

Ao Sr. Antonio Beraldo Filho fico agradecido pela disposição e presteza na reprodução dos documentos.

Aos bibliotecários Sra. Márcia Regina Migliorato Saad, Sra. Maria de Lourdes Assis Santos e Sr. Manoel Roque Galvão agradeço a presteza na recuperação bibliográfica sobre a qual se referenciou o autor em suas pesquisas; à Srta. Maria Inez do Prado e Srta. Maria Solange de Oliveira Pereira pela revisão feita na normalização das referências bibliográficas e à Sra. Lourdes Mangiollo Mioto, pelo empenho para a estruturação e montagem final da monografia.

A COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS MINERAIS DO RIO GRANDE DO NORTE-CDM/RN agradeço o fornecimento de dados e informações sobre poços tubulares, ensaios de bombeamento e laudos de análises físico-químicas de água de poços.

A SONGEO-Sondagens geológicas Ltda. de Natal, sou grato pelo fornecimento de dados e informações sobre poços tubulares.

Ao INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO-IPT através da Diretoria da Divisão de Minas e Geologia Aplicada, na pessoa do seu Diretor, Geólogo Ricardo Fernandes

da Silva, sou grato pelo ilimitado apoio institucional recebido.

Aqueles que, no anonimato da infra-estrutura contribuíram para que eu pudesse levar a bom termo o compromisso assumido, expresso ainda meus agradecimentos.

O autor

SUMÁRIO

VOLUME 1

	P.
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
ABSTRACT	vi
RESUMO	viii
ILUSTRAÇÕES	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O contexto hidrogeológico da Bacia Potiguar	2
1.2 Objetivos da Monografia do Aquífero Jandaíra	3
1.3 Metodologia Geral	3
2 BREVE HISTÓRICO DOS ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS NA BACIA POTIGUAR	6
3 FISIOGRAFIA DA BACIA POTIGUAR	11
3.1 Geomorfologia	11
3.2 Drenagem	14
4 HIDROMETEOROLOGIA	18
4.1 Introdução	18
4.2 Pluviometria	18
4.3 Temperatura	20
4.4 Insolação	20
4.5 Ventos	21
4.6 Umidade Relativa do Ar	21
4.7 Evaporação e Evapotranspiração	22
4.8 Clima	23

5	SÍNTESE GEOLÓGICA DA BACIA POTIGUAR	27
5.1	Introdução	27
5.2	Arcabouço Estrutural	27
5.3	Litoestratigrafia	30
5.3.1	Formação Pendência	30
5.3.2	Formação Alagamar	32
5.3.3	Formação Ponta do Mel	33
5.3.4	Formações Ubarana, Guamaré e Tibau	34
5.3.5	Formação Açú	36
5.3.6	Formação Jandaíra	37
5.3.7	Formação Macau	47
5.3.8	Grupo Barreiras (Terciário)	48
5.3.8.1	Introdução	48
5.3.8.2	Unidade inferior (Formação Serra do Mar tins	48
5.3.8.3	Unidade média (Formação Guararapes)	49
5.3.8.4	Unidade Superior (Formação Macaíba)	50
5.3.8.5	Ambiente deposicional e idade do grupo Barreiras	50
5.3.9	Aluviões, Praias e Dunas (Quaternário)	51
5.3.9.1	Aluvioes	51
5.3.9.2	Praias e dunas	52
6	EXPLORAÇÃO DO AQUÍFERO JANDAÍRA	54
6.1	Introdução	54
6.2	Investigações Geológicas	55
6.3	Investigações Geofísicas	55

6.3.1 Sondagens Geofísicas	55
6.3.2 Perfilagens Geofísicas	64
6.3.3 Isótopos ambientais	66
7 O AQUÍFERO JANDAÍRA	77
7.1 Características Dimensionais	77
7.2 Características das camadas semi-confinantes	79
7.3 Características hidrodinâmicas	80
7.4 Escoamento Natural	93
7.5 Interconexões Hidráulicas do Aquífero Jandaíra	101
7.5.1 Introdução	101
7.5.2 Interconexões hidráulicas entre os Aquíferos Jan daíra e Açu	101
7.5.3 Interconexões hidráulicas entre os Aquíferos Jandaíra e Dunas-Barreiras	103
7.6 Posição da Interface Água doce/salgada	104
7.7 Balanço Hídrico do Aquífero Jandaíra	107
7.7.1 Introdução	107
7.7.2 Descarga pelos exutórios naturais do aquífero (Q_{ES})	108
7.7.3 Descarga por drenança para o aquífero Açu ($Q_D^{J/A}$)	109
7.7.4 Descarga por exploração através de bombeamento de poços (Q_{BO})	110
7.7.5 Recarga por drenança do Aquífero Açu para o Aquífero Jandaíra ($Q_D^{A/J}$)	111
7.7.6 Recarga por drenança do sistema aquífero Dunas- Barreiras para o Aquífero Jandaíra ($Q_D^{B/J}$)	112

7.7.7 Recarga através da infiltração de águas plu	
viais (Q_I)	113
7.8 Avaliação das reservas do Aquífero Jandaíra	114
7.8.1 Introdução	114
7.8.2 Reservas permanentes e reservas reguladoras.....	114
7.8.3 Renovação das reservas do Aquífero Jandaíra.....	115
7.8.4 Recursos explotáveis do Aquífero Jandaíra	116
8. HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO JANDAÍRA	119
8.1 Introdução	119
8.2 Caracterização hidroquímica do Aquífero Jandaíra	121
8.3 Classificação das Águas do Aquífero Jandaíra	148
8.4 Comportamento espacial das características químicas	
e físico-químicas das águas do Aquífero Jandaíra	156
8.4.1 Mapa de Total de Sólidos Dissolvidos (TSD).....	157
8.4.2 Mapa de Dureza total.....	162
8.4.3 Mapa de cloretos	165
8.4.4 Mapa de sulfatos	168
8.4.5 Mapa de Índices de Troca de Bases (ITB)	169
8.4.6 Mapa de Índices de Estabilidade do carbonato de	
cálcio (IE).....	170
8.4.7 Mapa de diagramas de Stiff	172
8.5 Qualidade das águas do Aquífero Jandaíra	173
8.5.1 Introdução	173
8.5.2 Adequação para consumo humano	173
8.5.3 Adequação para consumo agropecuário	179
8.5.3.1 Adequação para consumo agrícola	179
8.5.3.2 Adequação para consumo animal	183
8.5.4 Adequação para consumo industrial	184

9 SITUAÇÃO ATUAL DA CAPTAÇÃO NO AQUIFERO JANDAÍRA	187
9.1 Introdução	187
9.2 Evolução das captações no aquífero Jandaíra	187
9.3 Características construtivas dos poços tubulares.....	192
9.4 Equipamentos de bombeamento	193
9.5 Estado atual dos poços tubulares	193
9.6 Volume de águas explotadas	195
9.7 Usos da água	196
10 CUSTO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DO AQUIFERO JAN	
DAÍRA	198
10.1 Introdução	198
10.2 Metodologia de avaliação	198
10.3 Estimativas de custos	199
11 CONCLUSÕES	206
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	206

VOLUME 2

ANEXO A - Inventário complementar de poços tubulares, cacim	
bas e fontes	1
ANEXO B - Tabelas	10
ANEXO C - Ensaio de bombeamento	117
ANEXO D - Mapas e seções hidrogeológicas	142

ILUSTRAÇÕES
TABELAS

Nº	Título	P.
1	Dados de sondagens elétricas verticais na Bacia Poti <u>guar</u>	11*
2a	Dados de isótopos ambientais de águas pluviais do nor <u>deste</u> brasileiro	14*
2b	Dados de isótopos ambientais de águas fluviais do nor <u>deste</u> brasileiro	15*
3a	Dados de isótopos ambientais nas águas subterrâneas do aquífero Barreiras	16*
3b	Dados de isótopos ambientais nas águas subterrâneas do aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar	17*
3c	Dados de isótopos ambientais nas águas subterrâneas do aquífero Açú da Bacia Potiguar.....	18*
4	Frequências de probabilidade de vazões específicas..	19*
5	Dados de vazão específica e de transmissividade ob <u>tidos</u> através de ensaios de bombeamento	20*
6	Volumes anuais de água escoada pelos exutórios natu <u>rais</u> do aquífero Jandaíra	109
7	Volumes anuais de água drenada do aquífero Jandaíra para o aquífero Açú	111
8	Volumes anuais de água drenada do aquífero Açú para o aquífero Jandaíra	111
9	Volumes anuais de água drenada do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra	112
10	Listagem de dados gerais das amostras e parâmetros físico-químicos das águas	25*
11	Listagem de cátions	38*
12	Listagem de ânions	51*
13	Listagem de relações iônicas	64*

* Tabela constante do ANEXO B, VOLUME 2.

Nº	Título	P.
14	Listagem de índices hidrogeoquímicos	77*
15	Listagem das porcentagens de miliequivalentes	90*
16	Listagem da dominância relativa dos ânions e dos cã tions	102*
17	Correspondência dos números dos poços nos cadastra mentos das diferentes entidades	114*
18	Composição química média das águas do aquífero Jan daíra, comparativamente às águas de chuvas	122
19	Poços anômalos em relação ao intervalo de confiança em 95% :	124
20	Dados de Resíduo Seco de águas de poços e cacimbas medidos em diferentes datas	115* ✕
21	Associação de amostras de água obtida por análise de agrupamento	116* ✓
22	Classificação das águas pelos íons dominantes	151
23	Parâmetros estatísticos dos constituintes químicos , físico-químicos e das relações iônicas para os dife rentes tipos de águas	155
24	Padrões para água de uso industrial	117
25	Custo de produção do m ³ de água pelos poços-padrão .	205

* Tabela constante do ANEXO B, VOLUME 2.

QUADROS

Nº	Título	P.
1	Pluviometria anual média na Bacia Potiguar	18
2	Temperaturas mensais médias na Bacia Potiguar	20
3	Insolação mensal média na Bacia Potiguar	21
4	Velocidade média de ventos na Bacia Potiguar	21
5	Valores mensais médios de umidade relativa do ar na Bacia Potiguar	22
6	Evaporação Potencial mensal média na Bacia Potiguar ..	22
7	Campanhas de medições geelétricas de longo alcance na Bacia Potiguar	57
8	Características geelétricas das principais formações geológicas da Bacia Potiguar	58
9	Características geelétricas da seqüência estratigráficas do extremo oriente na Bacia Potiguar	62
10	Parâmetros estatísticos de vazão específica, transmissividade e permeabilidade	92
11	Pluviometria anual média na área de exposição dos calcários Jandaíra	113
12	Origem das amostras de água	120
13	Teores médios de constituintes químicos das águas dos aquíferos Jandaíra, Açú, Barreiras e Cristalino no Estado do Rio Grande do Norte	123
14	Frequência de anomalias dos parâmetros físicos e químicos nas águas dos poços	125
15	Teores máximos dos constituintes químicos para 75% das amostras	127
16	Classificação das águas pelo Resíduo Seco	149
17	Classificação das águas pela Dureza Total	149
18	Dados gerais dos Mapas hidroquímicos	156
19	Frequência das amostras em relação aos padrões de potabilidade	178

Nº	Título	P.
20	Frequência das classes de água para fins de irrigação	180
21	Frequência das amostras por categoria de salinidade e de RAS	181
22	Classificação das águas para consumo animal	183
23	Frequência do caráter das águas em relação aos valores do índice de estabilidade do carbonato de cálcio (IE).	185
24	Equipamentos de bombeamento utilizados nos poços do aquífero Jandaíra	193
25	Frequência dos poços e volumes explotados segundo os usos da água	197
26	Características técnicas dos poços-padrão do aquífero Jandaíra.....	199

FIGURAS

Nº	Título	P.
1	Localização da Bacia Potiguar	1
2	Articulação das folhas topográficas, escala 1:100 000	5
3	Mapa de isoietas do Estado do Rio Grande do Norte ...	19
4	Zoneamento climático do Nordeste, segundo de Martonne.	24
5	Zoneamento climático do nordeste (parcial) segundo Köppen	26
6	Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar	28
7	Litoestratigrafia da Bacia Potiguar	31
8	Mapa de dominância litológica aflorante em carbonatos da Formação Jandaíra	40
9	Distribuição de CaO-MgO nas rochas carbonáticas do topo da Formação Açu e da Formação Jandaíra	41
10	Mapa com as áreas de dominância dos calcários aflorantes de alta pureza	42
11	Mapa com as áreas de dominância das rochas dolomíticas aflorantes de alta pureza	43
12	Exemplos de sondagens elétricas na porção ocidental da Bacia Potiguar.....	59
13	Exemplos de sondagens elétricas verticais na porção oriental da Bacia Potiguar	61
14	Exemplo de perfilagem térmica em poços do aquífero Jandaíra	65
15	Relação entre δD e δO^{18} em águas meteóricas do nordeste brasileiro	69
16	Relação entre δD e δO^{18} em águas fluviais do Nordeste brasileiro	71
17	Relação entre δD e δO^{18} em águas subterrâneas dos aquíferos Jandaíra e Açu	72
18	Representação da relação δD e δO^{18} em águas meteóricas, superficiais e subterrâneas do nordeste brasileiro e	

Nº	Título	P.
	meteóricas segundo CRAIG	75
19	Histograma de freqüências dos valores de vazões específicas	82
20	Diagrama de juntas ("boxplot") dos valores de vazão específica	83
21	Distribuição de probabilidade lognormal dos valores de vazão específica	84
22	Distribuição de probabilidade lognormal para 9 classes de valores de vazão específica	85
23	Relação entre vazão específica e profundidade dos poços	86
24	Curva acumulativa das médias das vazões específicas em intervalos de 10 m de profundidade	86
25	Relação entre vazão específica e profundidade dos níveis d'água	87
26	Histograma de freqüências de valores de transmissividade obtidos através de ensaios de bombeamento	89
27	Histograma de freqüências de valores de transmissividade obtidos através de ensaios e calculados através da relação T x Q/s.	90
28	Relação entre transmissividade e vazão específica .	91
29	Histograma de freqüências de profundidades de níveis d'água estáticos nos poços	98
30	Esquema do funcionamento hidráulico do aquífero Jandaíra	102
31a	Freqüência dos teores de Magnésio (mg/l Mg^{+2})	128
31b	Freqüência dos teores de Cálcio (mg/l Ca^{+2})	128
31c	Freqüência dos teores de Sódio (mg/l Na^{+1})	129
31d	Freqüência dos teores de Potássio (mg/l K^{+1})	129
31e	Freqüência dos teores de Ferro (mg/l de Fe)	130

Nº	Título	P.
31f	Frequência dos teores de Fluoretos (mg/l F^{-1})	131
31g	Frequência dos teores de Cloretos (mg/l Cl^{-1})	131
31h	Frequência dos teores de Bicarbonatos (mg/l HCO_3^{-1})	132
31i	Frequência dos teores de Carbonatos (mg/l CO_3^{-2}) ...	132
31j	Frequência dos teores de Sulfatos (mg/l SO_4^{-2})	133
31k	Frequência dos teores de Nitratos (mg/l NO_3^{-1})	133
31l	Frequência dos valores de pH	134
31m	Frequência dos valores de Dureza total (mg/l $CaCO_3$ equivalente)	134
31n	Frequência dos valores de condutividade elétrica (CE) a 25°C	135
31o	Frequência dos valores de TSD (mg/l)	135
31p	Frequência dos valores de Alcalinidade total (mg/l $CaCO_3$ equivalente)	136
31q	Frequência dos valores de Alcalinidade parcial (mg/l $CaCO_3$ equivalente)	136
32	Regressão: CE x RS	137
33a	Regressão: CE x Soma de íons para o conjunto das 239 amostras	138
33b	Regressão: CE x Soma de íons para águas com <u>dominância</u> de cloretos	138
33c	Regressão: CE x Soma de íons para águas com <u>dominância</u> de bicarbonatos	139
33d	Regressão: CE x Soma de íons para águas com <u>dominância</u> de sulfatos	139
34	Regressão: CE x Q/s	140
35	Regressão: CE x T	141
36	Regressão: CE x prof. NE	141
37	Regressão: CE x espessura dos sedimentos de cobertura dos calcários	142
38	Regressão: Soma de íons x Cloretos	143

Nº	Título	P.
39	Regressão: soma de íons x bicarbonatos	143
40	Regressão: soma de íons x sulfatos	144
41	Regressão: soma de íons x sódio	144
42	Regressão: profundidade dos poços x cloretos	145
43	Correlação entre RS em águas de poços e cacimbas e a pluviometria	146
44	Classificação das águas do Aquífero Jandaíra segundo o Diagrama de Piper	152
45	Poços construídos no Estado do Rio Grande do Norte no período 1918/79 segundo os aquíferos	188
46	Evolução da construção de poços tubulares no Estado do Rio Grande do Norte, no período 1918/79, segundo os aquíferos	189
47	Evolução da construção de poços tubulares no Estado do Rio Grande do Norte, no período 1918/79, conforme <u>in</u> iciativas particular ou pública	190
48	Poços construídos até 1979 no Estado do Rio Grande do Norte, por aquífero, segundo iniciativas particular ou pública	191
49	Histograma de freqüências das profundidades dos poços	192
50	Estado atual dos poços do aquífero Jandaíra (a) e <u>mis</u> tos (b) no Estado do Rio Grande do Norte	194
51	Histograma de freqüências dos valores de vazão	195

MAPAS

Nº	Título
1	Mapa plani-altimétrico .
2	Mapa de drenagem superficial .
3	Mapa geológico .
4	Mapa de contorno estrutural da base da Formação Jandaí- ra .
5	Mapa de isópacas da Formação Jandaíra .
6	Mapa de freqüência de direções das descontinuidades .
7	Mapa de direções médias das descontinuidades .
8	Mapa de comprimento relativo das descontinuidades .
9	Mapa de freqüência de descontinuidades .
10	Mapa de densidade de descontinuidades .
11	Mapa de contorno estrutural da base da cobertura da For- mação Jandaíra .
12	Mapa de isópacas da cobertura da Formação Jandaíra .
13	Mapa de vazão específica .
14	Mapa piezométrico - janeiro 1980 .
15	Mapa de cotas dos níveis d'água no sistema Dunas-Barrei- ras - março de 1979/80 .
16	Mapa de grupos de águas obtidos por análise de agrupa- mento .
17	Mapa de Total de Sólidos Dissolvidos (TSD) .
18	Mapa de Dureza total .
19	Mapa de Cloretos .
20	Mapa de Sulfatos .
21	Mapa de índices de troca de bases (ITB) .
22	Mapa de índice de estabilidade do Carbonato de cálcio (IE) .
23	Mapa de diagramas de Stiff .
24	Mapa de classes de água para irrigação .

ABSTRACT

Data obtained from reports and publications on Geology, Hidrogeology, Hidrochemistry, Geophysics and Climatology of the Potiguar Basin complemented by new data from tube wells, dug wells and springs have been utilized in making a detailed study of the physical environment of the Jandaíra aquifer.

On the basis of this study it has been possible to make an analysis and synthesis of lithological, dimensional and hydrodynamical characteristics of the aquifer, its mechanisms of recharge and discharge, circulation pattern, reserves, hydrochemistry and quality of stored waters, water exploitation techniques and different uses of waters.

The Jandaíra aquifer is located in the upper portion of the Jandaíra Formation, covers an area of 16 278 km², has mean saturated thickness of 150 m and is characteristically an unconfined aquifer. It is hydraulically connected with the underlying Açu aquifer and along a narrow strip near the atlantic border with the overlying Dunas-Barreiras aquifer.

Considering the space variation of the lithological composition, joints and faults, evidences of karstification and also the broad range of the transmissivity and specific capacity values, it is possible to say that the Jandaíra is an heterogeneous and anisotropic aquifer, with characteristical karstic flow.

The most significant underground flow has its origin in the southern parts, near the contact of the Jandaíra and Açu formations, with flow toward the ocean under a mean hydraulic gradient of 10^{-3} . There are also secondary flows toward the Jaguaribe, Mossoró, Açu and Mulungu valleys, behaving drains like, conducting groundwater through their alluvial plains toward the ocean, with no manifestations of surface flow.

Rainfall is the main source of aquifer recharge and environmental isotopes studies show that waters are subjected to intensive evaporation before reaching the aquifer. Stored waters can be divided in chloride (52%), carbonate (21%), sulfate (68%) and a mixed one (21%).

Most of the aquifer is included in the Rio Grande do Norte State where 853 wells were inventoried in 1979, with an exploitation rate of $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. Waters were used for various purposes, being domestic and livestock the main uses.

Concentration of some water constituents, when compared with the requirements specified for human consumption, showed values higher than the maximum allowable limits: 69% of the samples had higher values of TDS (Total Dissolved Solids), 95% had higher hardness values, 77% showed higher Mg, concentrations and 96% were outside the recommended fluoride concentration interval.

Concerning agricultural uses these waters can be applied on crops with high tolerance for salt content and in soils with high permeability and good drainage. However some excess water must be used to induce salt lixiviation in soils.

In their natural state, waters of Jandaíra aquifer are not suitable for industrial uses mainly due to their incrustation characteristics.

RESUMO

Utilizando-se de dados levantados a partir de relatórios e publicações diversas sobre Climatologia, Geologia, Geofísica, Hidrogeologia e Hidrogeoquímica envolvendo a Bacia Potiguar e inventariação complementar de poços tubulares, cacimbas e fontes, foram feitos estudos específicos que permitiram o conhecimento do meio físico, analisado como um sistema amplo no qual está inserido o aquífero Jandaíra. Sobre essa base de conhecimentos foi possível então o aprofundamento, análise e síntese dos conhecimentos sobre o aquífero no que concerne às suas características litológicas, dimensionais e hidrodinâmicas, aos mecanismos de recarga e circulação das águas, às suas reservas, à caracterização hidroquímica e qualidade das águas armazenadas, à engenharia de captação dos recursos e aos usos a que se destinam as águas exploradas.

O aquífero Jandaíra instala-se na porção superior da Formação Jandaíra da Bacia Potiguar, com um domínio de $16\,278\text{ km}^2$ e uma espessura média saturada da ordem de 150 m, apresentando-se caracteristicamente livre na maior parte do domínio. Conexões hidráulicas existem entre ele e a unidade sotoposta, o aquífero Açu, da mesma forma que numa estreita faixa junto à orla atlântica ocorre conexão com o sistema aquífero Dunas-Barreiras, a ele sobreposto.

Consideradas a grande variação espacial da constituição litológica dos calcários da Formação Jandaíra, as discontinuidades, as evidências de carstificação e ainda a amplitude dos valores de vazão específica e de transmissividade, o aquífero Jandaíra se apresenta heterogêneo e hidráulicamente anisotrópico, promovendo circulação tipicamente cárstica no seu interior.

O fluxo subterrâneo mais expressivo parte das áreas de recarga geralmente situadas a sul, nas proximidades do contacto entre as formações Jandaíra e Açu, e interioriza as águas no domínio do aquífero, levando-as com gradientes médios da ordem de 10^{-3} , até os seus exutórios junto ao oceano. Secundariamente o fluxo se faz em direção aos vales dos rios Jaguaribe, Mossoró, Açu e Mulungu, que funcionam então como verdadeiros drenos, sem contudo constituir fluxo superficial, conduzindo-as ao oceano, provavelmente através dos seus aluviões.

A recarga do aquífero se processa essencialmente por águas pluviais e estudos de isótopos ambientais revelaram que essas águas são submetidas a intenso processo de evaporação antes de participarem das reservas aquíferas. Das suas reservas participam 52% de águas cloretadas, 21% de águas bicarbonatadas, 6% de águas sulfatadas e 21% de águas mistas.

O acesso às reservas aquíferas é geralmente feito por captação através de poços tubulares que atingiram profundidade máxima de 300 m. No Estado do Rio Grande do Norte, que cobre a maior parte da superfície de domínio do aquífero Jandaíra, foram cadastrados 853 poços tubulares em 1979, que exploram cerca de $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ de águas do aquífero, destinando-as aos mais diversos usos, sobressaindo-se no entanto o abastecimento doméstico e pecuário.

Quando se comparam os teores de alguns dos constituintes das águas do aquífero Jandaíra com padrões estabelecidos em legislação específica, essas águas são insatisfatórias para consumo humano. Dentre as amostras consideradas, grandes percentuais ultrapassam os valores ou intervalos recomendados tais como 69% para valores de TSD (Total de Sólidos Dissolvidos), 95% para Dureza total, 77% para teores de Magnésio e 96% para teores de Flúor.

No que concerne à adequação para usos na agricultura pôde-se constatar que devem ser somente aplicadas em culturas com alta tolerância a sais e em solos de alta permeabilidade e boa drenagem, devendo-se empregar água em excesso para promover a lixiviação de sais.

Em seu estado natural as águas do aquífero Jandaíra não são adequadas para consumo industrial devido principalmente ao seu caráter essencialmente incrustante.

MONOGRAFIA DO AQUIFERO JANDAÍRA DA BACIA POTIGUAR

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Potiguar, também denominada Bacia do Apodi, está situada no extremo nordeste do Brasil, entre os paralelos $4^{\circ}10'$ e $5^{\circ}50'S$ e os meridianos $35^{\circ}00'$ e $38^{\circ}20'W$. Ocupa uma superfície emersa de aproximadamente $25\ 000\ km^2$, dominando a metade setentrional do Estado do Rio Grande do Norte e uma estreita faixa no extremo nordeste do Estado do Ceará. Estende-se na direção E-W por aproximadamente 300 km, com a maior largura na porção ocidental, atingindo cerca de 120 km, estreitando-se para leste onde se reduz a apenas 40 km, dando lugar à denominada Bacia Pernambuco-Paraíba (FIGURA 1).

FIGURA 1 - Localização da Bacia Potiguar

No continente os limites da Bacia Potiguar ocorrem aproximadamente ao longo de uma linha que, de oeste para leste, une as cidades de Aracati (CE), Jaguaruana (CE), Russas (CE), Limoeiro do Norte (CE), Potiretama (CE), Apodi (RN), Caraúbas (RN), Upanema (RN), Açu (RN), Afonso Bezerra (RN), Pedro Avelino (RN),

João Câmara (RN), Ceará-Mirim (RN) e Natal (RN). Na parte submarina os seus limites são ainda desconhecidos.

Resultante de um tectonismo relativamente brando de distensão crustal que gerou uma calha periclinal com mergulho para nordeste - para o oceano, a Bacia Potiguar, em sua porção emersa, contém sedimentos paleozóicos, representados pelas formações Pendência (folhelhos, siltitos e arenitos), Açu (arenitos finos a grosseiros e siltitos argilosos) e Jandaíra (calcários, margas, siltitos, dolomitos e folhelhos) e sedimentos cenozóicos representados pelo Grupo Barreiras (areias finas a médias com intercalações argilosas), aluviões e dunas.

1.1 O contexto hidrogeológico da Bacia Potiguar

Na Bacia Potiguar destacam-se duas unidades aquíferas de ocorrência regional, reconhecidas desde os primeiros estudos hidrogeológicos realizados na área, a saber:

- aquífero Açu - representado, via de regra, pela porção basal da Formação Açu; unidade aquífera constituída por uma camada com porosidade primária intersticial na qual predominam condições de semiconfinamento;
- Aquífero Jandaíra - sobreposto ao anterior, representado pela porção superior de seqüência carbonática da Formação Jandaíra; unidade aquífera constituída por uma camada com porosidade predominantemente secundária (por fraturamento e carstificação), apresentando-se localmente litologicamente heterogênea e hidraulicamente anisotrópica, com circulação cárstica; porém regionalmente considerada homogênea, e isotrópica, com predomínio de condições livres na maior parte de seu domínio.

As duas unidades aquíferas apresentam-se superpostas e em conexão hidráulica através de uma camada pouco permeável, corrrespondente à porção inferior da Formação Jandaíra e superior da Formação Açu.

Sobrepondo-se ao aquífero Jandaíra, em uma estreita faixa em sua porção norte, estão presentes os sedimentos do grupo Barreiras e as dunas que, em algumas áreas, podem se constituir em um sistema aquífero livre Dunas-Barreiras, onde exerce influênça.

cia hidráulica e hidroquímica sobre o aquífero Jandaíra.

Devido à extensa área de domínio do aquífero Jandaíra (16 278 km²) e devido também à facilidade de acesso ao recurso hídrico, por ser a Formação Jandaíra aflorante na maior parte do seu domínio (10 298 km²), esse aquífero se reveste de extrema importância no suprimento de água para consumo humano e animal dessa região semi-árida. Assim é que dos 1 300 poços cadastrados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT na área da Bacia Potiguar, 760 deles captam águas do Aquífero Jandaíra (IPT, 1982).

1.2 Objetivos da Monografia do Aquífero Jandaíra

Os estudos hidrogeológicos até agora realizados na Bacia Potiguar tornaram evidente a necessidade de um estudo específico do Aquífero Jandaíra. Esta monografia tem como objetivos analisar, aprofundar e sintetizar os conhecimentos hidrogeológicos até agora adquiridos através dos diferentes estudos realizados na área da Bacia Potiguar e que envolveram o Aquífero Jandaíra. Tal investigação e síntese têm suas bases no que concerne à quantificação dos recursos hídricos do Aquífero Jandaíra, à caracterização hidroquímica, aos mecanismos de recarga e circulação das águas, à engenharia de captação desses recursos e aos usos a que se destinam as águas exploradas.

1.3 Metodologia Geral

Para a consecução dos objetivos propostos para esta Monografia, considerou-se a necessidade, por um lado, do conhecimento do meio físico a ser analisado como um sistema amplo que abriga o Aquífero Jandaíra e, por outro, da avaliação da interação do Homem com esse sistema, que se processa através do acesso e uso dos recursos hídricos desse aquífero. Esses conhecimentos para a análise e avaliação, julgou-se possível serem obtidos através das atividades a seguir expostas.

a) Levantamentos bibliográficos

Levantamento de literatura que incluísse a Bacia Potiguar e que contivesse dados de interesse nas seguintes áreas: Geologia, Geomorfologia, Geofísica, Pedologia, Hidrogeologia,

Hidrologia de Superfície (Pluviometria e Fluviometria) e Climatologia. A análise da literatura selecionada permitiu a compilação dos dados de interesse para os estudos realizados nos diferentes campos das investigações, com os quais foi possível a elaboração de mapas, relações, tabelas, gráficos, etc.

Considerando-se o ponto d'água como a principal fonte de informações para os estudos hidrogeológicos, procurou-se, nesta fase, correlacionar os pontos inventariados pelas diferentes entidades que desenvolveram os estudos. Dificuldades de correlação, impediram porém, a utilização de grande parte de dados contidos nos documentos.

b) Complementação de dados e informações

Novos dados de interesse foram levantados junto à Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Rio Grande do Norte - CDM/RN, entidade estatal construtora de poços tubulares e que atua na área de estudos. Assim foram obtidos novos dados de construção de poços, de ensaios de bombeamento e de análises físico-químicas de água. Para o cadastramento de poços, complementar ao efetuado pelo IPT, foram utilizadas as folhas topográficas em escala 1:100 000, da SUDENE, cuja articulação e codificação são apresentadas na FIGURA 2. Cada ponto cadastrado recebeu o número da folha topográfica seguido do número de ordem de cadastramento. A inventariação complementar é apresentada no ANEXO A.

c) Tratamento de dados obtidos

Os dados obtidos foram então sistematizados de acordo com os objetivos de cada área de investigação hidrogeológica para possibilitar o tratamento dos mesmos, de acordo com as técnicas inerentes a cada uma dessas áreas e que serão explanadas na apresentação dos temas desenvolvidos.

2 BREVE HISTÓRICO DOS ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS NA BACIA POTIGUAR

A bibliografia referente a recursos hídricos subterrâneos na área da Bacia Potiguar inclui estudos realizados no início deste século. A partir de 1967, porém, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE, (criada pela Lei 3692 de 15 de dezembro de 1959) começa a publicar os resultados dos primeiros estudos hidrogeológicos sistemáticos realizados na área.

Atualmente se dispõe de um bom número de publicações abordando aspectos hidrogeológicos da Bacia Potiguar. Citaremos a seguir os trabalhos já realizados, em seqüência cronológica de sua publicação e as principais fontes de veiculação desses conhecimentos.

1910

- O Ministério da Viação e Obras Públicas, através da Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas - IFOCS, publica: "Geographia, Geologia, suprimento d'água, transporte e açudagem nos estados orientais do Norte do Brasil: Ceará, Rio Grande do Norte, Parahyba". (CRANDALL, 1910).

1912

- A IFOCS publica: "Suprimento d'água no nordeste do Brasil. (WARING, 1912).

1913

- A IFOCS publica o primeiro trabalho sobre suprimento de água subterrânea na região: "Geologia e suprimento de água subterrânea no Rio Grande do Norte e Parahyba". (SOPPER, 1913).

1937

- O Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM, publica: "Água subterrânea - Estado do Rio Grande do Norte". (PAIVA, 1937).

1954

- O Governo do Estado do Rio Grande do Norte publica trabalhos

sobre águas subterrâneas, realizados no bojo de estudos agrogeológicos: "As águas subterrâneas no Estado do Rio Grande do Norte". (VAGESACK, 1954), em levantamento agrogeológico do estado, elaborado por VAGELER e outros.

1962

- A PETROBRÁS elabora o primeiro estudo sobre água subterrânea a nível regional do Estado do Rio Grande do Norte, em documento intitulado: "Geological Summary and Ground Water Potential of the Potiguar Basin in Rio Grande do Norte". (BLANKENNAGEL, 1962, inédito).

1965

- A SUDENE, contando com a cooperação técnica francesa (Association pour L'Organisation des Missions de Cooperation Technique-ASMIC) iniciou um programa de formação de técnicos especializados no campo da Hidrogeologia, Geofísica e Perfuração de Poços na Bacia Potiguar, selecionada como "Bacia Escola de Hidrologia".
- O DNPM publica dois trabalhos enfocando as águas subterrâneas na Bacia Potiguar: "Reconhecimento hidrogeológico no Vale Açu do rio Piranhas". (ARAÚJO & RODIS, 1965), iniciando-se assim os estudos de semi-detálhe dentro do domínio da Bacia Potiguar, com sistematização metodológica específica para estudos hidrogeológicos.

1966

- A Sociedade Brasileira de Geologia publica nos anais do Simpósio de Geologia do Nordeste: "Faixa sedimentar costeira (Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte) - aspectos hidrogeológicos (REBOUÇAS, 1966).

1967

- A Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE publica estudos hidrogeológicos realizados no domínio da Bacia Potiguar:
"Bacia Potiguar: estudo hidrogeológico" (REBOUÇAS e outros, 1967) e "Estudo geral de base do vale do Jaguaribe (SUDENE/ASMIC, 1967).

1969

- A SUDENE publica ainda novos estudos hidrogeológicos no âmbito da Bacia Potiguar: "Ground Water in northeastern Brazil". (SOUTO MAIOR, 1969) e "Bacia Potiguar - estudos por analogia elétrica das condições de exploração das águas subterrâneas do arenito Açú na região de Mossoró, RN". (MANOEL FILHO e outros, 1969). Este foi o primeiro estudo tentativo que se fez para a utilização de modelos de simulação de aquífero da Bacia Potiguar.

1970

- É a partir de 1970 que a SUDENE, através da "Série Hidrogeologia" começa a apresentar os trabalhos de maior importância e repercussão no campo da Hidrogeologia Regional, com a publicação dos Inventários hidrogeológicos básicos no nordeste envolvendo a Bacia Potiguar. Assim temos:

"Inventário hidrogeológico básico do nordeste. Folha nº 10. Jaguaribe-NE". (MANOEL FILHO, 1970).

"Inventário hidrogeológico básico do nordeste. Folha nº 14. Jaguaribe-SO". (CRUZ & FRANÇA, 1970).

"Inventário hidrogeológico básico do nordeste. Folha nº 15. Jaguaribe-SE". (ALBUQUERQUE, 1970).

1971

- A SUDENE publica novo estudo hidrogeológico envolvendo a Bacia Potiguar: "As águas subterrâneas do nordeste: estimativas preliminares". (REBOUCAS & GASPARY, 1971).

1972

- A SUDENE publica "Hidrologia das secas: nordeste do Brasil" (REBOUCAS, 1972).

1973

- A SUDENE publica o "Reconhecimento hidrogeológico da planície aluvial do Apodi; RN: definição preliminar de viabilidade para irrigação" (MANOEL FILHO, 1971).

1974

- A SUDENE publica os resultados de novos estudos hidrogeológicos envolvendo o domínio da Bacia Potiguar, a saber:

"Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do nordeste do Brasil". (CRUZ & MELLO, 1974).

"Caracterização de águas do nordeste brasileiro com isótopos ambientais". (LEAL et alii, 1974).

A partir de 1957, a Universidade Federal de Pernambuco - UFPe - com trabalhos independentes e também em convênio com diferentes entidades federais (SUDENE e MEC) e estaduais (CDM/RN, etc) tem contribuído com estudos geológicos e hidrogeológicos em diferentes áreas dos estados nordestinos, publicados através de relatórios para graduação em Geologia. Assim, em 1974 foram publicados vários trabalhos executados no domínio dos calcários da Formação Jandaíra, tais como:

"Aspectos geológicos e hidrogeológicos em áreas dos municípios de Touros, Pedra Grande e Parazinho, RN". (AGUIAR, 1974).

"Geologia e aspectos hidrogeológicos dos municípios de Pedra Grande, Parazinho e João Câmara, RN". (ARRUDA PINTO, 1974).

"Geologia e aspectos hidrogeológicos em áreas de municípios de Touros, Pedra Grande e Parazinho, RN". (OLIVEIRA, 1974).

"Geologia e aspectos hidrogeológicos em áreas do município de São Bento do Norte, Parazinho e Pedra Grande, RN". (TEIXEIRA, 1974).

1976

- O DNOCS, em convênio com a SERETE S.A. - Engenharia, executa estudo hidrogeológico de detalhe e publica o "Estudo hidrogeológico do Baixo Açu".
- A SUDENE, em convênio com o DRN/CONESP/OESA, efetua o "Estudo de reconhecimento e Estudos hidrogeológicos para aproveitamento integrado; região centro-oeste da Bacia Potiguar e Bacias Costeiras da Paraíba e Pernambuco - Área A".

1977

- A SUDENE, através do convênio MINTER-SUDENE-DRN/MEC-UFPE-CT e executa trabalhos de detalhe também no vale do rio Apodi, dentro do denominado "Estudo hidrogeológico da planície aluvial do Apodi, RN - Economicidade de poços para irrigação". (SANTOS, 1977).

1978

- O Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, em convênio com a HIDROSERVICE, elabora o "Plano Diretor para o aproveitamento dos recursos de solo e água no Vale do Apodi, Rio Grande do Norte".

1980

- A SUDENE publica o "Plano de aproveitamento integrado dos recursos hídricos do nordeste do Brasil - Fase I" onde aborda genérica e resumidamente os recursos hídricos subterrâneos da Bacia Potiguar.

1982

- A Secretaria de Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Norte - SIC/RN em convênio com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, elabora o relatório final do "Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte".

3 FISIOGRAFIA DA BACIA POTIGUAR

3.1 Geomorfologia

A morfologia da Bacia Potiguar é caracterizada por uma chapada relativamente plana, constituída pela seqüência sedimentar trabalhada ainda no Plioceno, que mergulha suavemente em direção ao oceano. Essa feição na porção oeste da Bacia é conhecida genericamente pelo nome de Chapada do Apodi, representada pela superfície aflorante dos calcários da Formação Jandaíra (MAPAS 1 e 3). Aí se encaixam os vales de dois dos principais rios da Bacia: rio Apodi-Mossorô e rio Upanema-do Carmo. (MAPA 2).

Nos limites sul e oeste da Bacia Potiguar essa monotonia é abruptamente interrompida por escarpas onde se apresenta uma frente de "cuesta" instalada no contato entre os calcários da Formação Jandaíra e os arenitos e siltitos da Formação Açu a ela sotoposta. Esse relevo de "cuestas" é encontrado desde o extremo noroeste da Bacia, a partir da Serra Dantas e Serrote dos Porcos, ambas correspondentes a afloramentos de rochas cristalinas no interior da Bacia, seguindo ao longo da planície aluvial do rio Jaguaribe até a cidade de Tabuleiro do Norte (CE). Dirige-se depois para sul até Apodi (RN), desviando-se depois para leste, passando por Upanema (RN), tornando-se gradativamente atípica e completamente obliterada a leste do vale do rio Açu. A partir daí então aparece de maneira reticente e com pequenos desníveis topográficos.

A topografia da Bacia Potiguar é pouco acentuada e caracterizada por um relevo muito pouco movimentado, apresentando cotas de 10 a 20 m junto à costa, ascendendo gradualmente para o interior, com a maior parte da área da Bacia porém compreendida entre 0-150 m (MAPA 1). Esse relevo monótono é às vezes interrompido por vales abertos, de direção geral NNE-SSW, correspondentes aos lineamentos estruturais dominantes do embasamento cristalino, tais como os vales dos rios Apodi-Mossorô, Piranhas-Açu e vales de menor expressão, com orientação aproximada N-S, por vezes transversais às estruturas regionais como o vale do rio do Carmo e do rio Cabugi-Mulungu-Amargoso.

Algumas áreas com altitudes mais pronunciadas e com direção grosseiramente estabelecida SW-NE, se destacam nessa paisagem de platô (MAPA 1);

- a) no extremo noroeste da área, a sudeste de Jaguaruana (CE) , servindo como referencial de limite entre os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, surgem a Serra Dantas, com altitude máxima de 232 m e o Serrote dos Porcos, com 186 m, ambas sustentadas por rochas pré-cambrianas quartzíticas;
- b) a noroeste de Mossoró se destaca uma elevação isolada encimada por sedimentos do Grupo Barreiras (item 5.3.8) denominada Serra de Mossoró, que atinge 265 m de altitude;
- c) no extremo sudoeste da Bacia, a oeste da cidade de Apodi e sustentada por sedimentos da Formação Açu (item 5.3.5) apresenta-se uma extensa área, topograficamente a mais elevada da porção oeste da bacia, também servindo de referencial para a divisa dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, ramificada em dois corpos: o primeiro, com direção N-S e altitude máxima de 257 m; o segundo com direção E-W e altitude máxima de 285 m, separados por uma região baixa onde se instala o Riacho da Barra, com direção SW-NE, encaixado em zona de falha (MAPAS 1, 2 e 3). Ainda nessa área elevada, a noroeste de Potiretama (CE) já fora do domínio da Bacia porém próximo à sua borda, chama a atenção uma área de forma circular apresentando altitude máxima de 200 m, recoberta por sedimentos da Formação Açu, esculpida pelo riacho Seco que a circunda ao norte e pelo riacho do Logradouro, ao sul.
- d) a nordeste de Caraúbas, na localidade denominada Retiro, e sustentada também por sedimentos da Formação Açu, ocorre uma elevação de pequena expressão em área que atinge porém 205 m de altitude;
- e) entre Mossoró e Carnaubais, encontramos talvez a mais forte expressão do relevo na Bacia Potiguar, constituída pelo conjunto denominado: Serra do Carmo, Serra do Mel e Serra do Cajueiro, instaladas, graças à cobertura dos calcários Jandaíra pelos sedimentos do Grupo Barreiras. As altitudes aí atingem 271 m, na Serra do Carmo;
- f) entre João Câmara e Jandaíra se situam as maiores elevações da porção oriental da Bacia Potiguar. As elevações rochosas que aqui se instalam, ainda com direção geral SW-NE, podem

ser apresentadas em três setores (MAPA 1):

- o primeiro setor, situado mais ao sul, com as cristas orientadas na direção SW-NE, se constitui essencialmente nas elevações das rochas cristalinas mais próximas da margem da Bacia. A altitude máxima é de 261 m, na Serra do Lombo, a noroeste da cidade de Pedra Preta, já na área de cobertura daquelas pela Formação Açu;
- o segundo setor, mais amplo, de direção E-W, corresponde à continuação do corpo anteriormente descrito, porém já totalmente dentro do domínio da Bacia Potiguar, instalando-se ao longo do contacto dos sedimentos da Formação Açu com os calcários da Formação Jandaíra. A sua porção oeste recebe a denominação de Serra Verde e apresenta altitude máxima de 295 m a sudoeste da cidade de Jandaíra; a porção leste recebe a denominação de Serra da Macambira, apresentando altitude máxima de 268 m, na localidade denominada Serrinha, a oeste da cidade de João Câmara;
- O terceiro setor, a Serra dos Macacos, também de direção SW-NE, a norte de João Câmara, atinge a altitude máxima de 310 m na localidade denominada Baixa dos Macacos. Este se constitui no ponto de maior altitude no interior da Bacia Potiguar. O conjunto do segundo e terceiros setores são porém conhecidos regionalmente com a denominação genérica de Serra Verde.

Correlacionando-se a topografia (MAPA 1) com a geologia da área (MAPA 3), pode-se notar que algumas das elevações máximas desse maciço se instalam sobre afloramentos de rochas ultrabásicas - derrames basálticos do Terciário - como é o caso, por exemplo, da Serra Preta, a nordeste de Pedro Avelino, com 228 m, e a Serra Aguda, próximo à anterior, com 267 m. Fora do domínio da Bacia Potiguar, em área de rochas cristalinas, porém originária das mesmas manifestações basálticas deve ser citada a Serra do Cabugi, a oeste de Lages, onde se ergue o Pico do Cabugi com 590 m, com feição conspícua de chaminé vulcânica (item 5.3.7.).

Observando-se ainda a drenagem (MAPA 2) e o relevo (MAPA

1), nota-se que esse conjunto rochoso se constitui em um importante divisor das águas superficiais.

De menor expressão topográfica, porém com forma tipicamente dômica, apresenta-se nítida a Serra do Mangue Seco, situada junto à costa norte, a sudoeste de Guamaré e que atinge apenas 104 m.

Na região costeira encontramos os cordões de dumas que no litoral norte são menos expressivos do que no litoral leste. Os cordões de dunas móveis ora se sobrepõem aos sedimentos do Grupo Barreiras, ora às dunas fixas pré-existentes.

Os sedimentos dunares quando são interrompidos pela desembocadura dos maiores rios, cedem lugar aos aluviões. Tal feição pode ser encontrada na foz do rio Apodi-Mossorô (em Grossos) rio Piranhas-Açu (em Pendências), rio Mulungu - Amargoso (em Macau) e rio Camurupim (em Guamaré).

As planícies fluviais dilatam-se nas vizinhanças da foz onde se elevam muito pouco acima das marés altas, constituindo planícies quase horizontais, propiciando a formação de extensos alagamares. Nessas áreas se acham localizadas as grandes salinas que alimentam uma das mais importantes atividades econômicas da região.

As praias geralmente se desenvolvem em continuidade aos sedimentos dunares porém às vezes podem se instalar no sopé de falésias esculpidas nos sedimentos do Grupo Barreiras, como ocorre, por exemplo, a nordeste da Serra do Mel (Ponta da Pedra Grande) e Tibau.

3.2 Drenagem

Excetuando-se as grandes linhas que, vindo das áreas Pré-Cambrianas atravessam a bacia sedimentar, a drenagem no domínio da Bacia Potiguar é em geral pouco densa e caracterizada por uma rede preferencialmente difusa de riachos intermitentes com pequena expressão em área (MAPA 2). Há ainda a presença, em áreas restritas, de drenagem endorrêica, convergindo para fundos de dolinas esculpidas em áreas de afloramentos dos calcários da Formação Jandaíra, ou mesmo onde estes estão recobertos pelos sedimentos do Grupo Barreiras.

Quanto à drenagem principal, observando-se o mapa de estru

turas geológicas da Bacia Potiguar (FIGURA 6 item 5.2) e o de drenagem (MAPA 2) pode-se notar que os rios de maior porte, de uma maneira geral têm o traçado dos seus vales condicionado às principais linhas estruturais.

Esses rios, quase todos intermitentes, cortam transversalmente a seqüência sedimentar, vindos das áreas cristalinas ao sul.

Entre os rios mais importantes temos, de oeste para leste: rio Jaguaribe (CE), rio Apodi-Mossoró (RN), rio Upanema-do Carmo, rio Piranhas - Açu (RN), rio Cabugi-Mulungu-Amargoso (RN).

O rio Açu, desde 1961 tem tido em seu médio e baixo cursos um fluxo de água contínuo, embora bastante reduzido, devido à soltura periódica de águas armazenadas no açude Itãs, em Caicó. Durante as enchentes transborda em suas margens chegando a inverter o curso de alguns de seus afluentes, como ocorre com o rio Pataxós que tem seu curso invertido por três a cinco semanas, enchendo dois lagos situados a leste da cidade de Ipanguaçu (ARAÚJO & RODIS, 1967).

A maioria dos rios acima mencionados corta o relevo de chapada, e em alguns trechos como os correspondentes às entradas do rio Apodi e do rio Açu na bacia sedimentar, existem profundos "canyons" nas áreas de contato dos sedimentos da Formação Açu com os calcários da Formação Jandaíra.

Como visto no item anterior, a região da Serra Verde, ou seja, as elevações de relevo entre João Câmara e Jandaíra (Serra Verde propriamente dita, Serra da Macambira e região da Baixa dos Macacos) se instala como divisor de águas superficiais, impondo à drenagem um padrão característico.

O rio Mulungu-Amargoso se constitui assim na última drenagem que conduz águas desde as rochas cristalinas de sul até a costa atlântica norte, pois deste rio até o riacho do Cabelo, a zona de contacto entre os sedimentos da Formação Açu e os calcários da Formação Jandaíra na área da Serra Verde propriamente dita e Serra da Macambira - Setor E-W - (item 3.1), se impõe como eixo divisor das águas superficiais. Assim, a partir do rio Mulungu-Amargoso temos uma drenagem paralela, constituída por rios de curto percurso e que já nascendo dentro da Bacia, conduzem águas para a costa norte. Em oposição a esta se estabelece

uma densa drenagem com linhas muito curtas, que com as cabeceiras naquele divisor, dirigem-se obseqüentemente para sul, e que atravessando a estreita faixa de afloramento da Formação Açu, levam suas águas até o vale do rio Ceará-Mirim, de direção E-W. Este vale, esculpido em rochas cristalinas, constitui então um verdadeiro coletor que, captando essas águas, as conduz para a costa leste.

Na porção sudoeste desse maciço, entre a Serra Verde e a Serra Aguda instalam-se linhas de drenagem de águas que vão atingir também o litoral norte, porém o fazem indiretamente, deslocando-se primeiramente para oeste, através do rio Serra Aguda até desaguar no rio Cabugi-Mulungu-Amargoso que as conduz até a costa norte.

Do riacho do Cabelo para leste, o terceiro setor da Serra Verde (item 3.1) - região denominada Serra dos Macacos - funcionando também como divisor de águas, impõe três comportamentos para a drenagem que aqui já se apresenta instalada em vales esculpidos integralmente dentro da bacia. A norte dessas elevações, a drenagem é ainda subparalela e constituída por riachos ainda mais curtos que os do trecho anterior, e que se dirigem diretamente para a costa norte, tais como o riacho Parazinho, dos Angicos e outros; segue-se uma drenagem para nordeste para a Lagoa do Boqueirão (riacho de Touros); para leste, através do rio Tatu (ou rio das Piranhas), riacho Seco e riacho da América, formadores do rio Maxaranguape que daqui já leva perenemente suas águas até a costa leste.

Algumas áreas com drenagem endorrêica podem ser encontradas tanto no Estado do Ceará, na Fazenda Lagoa do Mato, à cerca de 22 km a nordeste de Jaguaruana, como no Estado do Rio Grande do Norte, no município de Açu, à cerca de 1 km a oeste do povoado de Catingueira (16 km a sudoeste de Carnaubais), no município de Carnaubais, na própria Lagoa do Mato à cerca de 7 km a sudoeste de Porto do Mangue e no município de São Bento do Norte à cerca de 2 km a oeste do povoado de Jucuri.

No que diz respeito à relação entre as águas subterrâneas e a drenagem superficial, como se pode notar através das curvas isopiezométricas (MAPA 14) as águas do calcário da Formação Jandaíra na porção central e oeste da Bacia, têm seu fluxo em dire

ção aos vales dos principais rios: rio Apodi-Mossorô, rio Upanema-do Carmo e rio Piranhas-Açu, que embora não permitam a formação de fluxo superficial, funcionam como verdadeiros coletores, conduzindo-as, até ao oceano, provavelmente através de seus aluviões.

Maiores conhecimentos das relações entre as águas superficiais e as águas subterrâneas no âmbito da Bacia Potiguar é dificultado pela inexistência de estações fluviométricas nos vales dos rios nesse domínio, bem como a deficiência da rede hidrometeorológica instalada na área. Atualmente apenas cinco estações fluviométricas apresentam dados de interesse para estudos hidrogeológicos na Bacia Potiguar: a estação de Pedra das Abelhas (Governador Dix-Dept Rosado), Açude Santa Cruz e Pau dos Ferros no rio Apodi; a estação de Jardim das Piranhas no rio Piranhas e a estação de Upanema, no rio Upanema - do Carmo. Dentre esses, somente os registros no rio Apodi podem ser utilizados, porém, na avaliação da infiltração na área de exposição do aquífero Açu, não se encontrando assim, postos que possam fornecer dados de interesse para o estudo do aquífero Jandaíra.

4 HIDROMETEOROLOGIA

4.1 Introdução

A apreciação dos elementos de hidrometeorologia que influenciam no contexto geral dos recursos hídricos no domínio da Bacia Potiguar feita a seguir, objetiva apenas apresentar, em linhas gerais, as suas características médias.

A localização geográfica da Bacia Potiguar - proximidades do equador terrestre - lhe assegura genericamente, um clima quente. A topografia aplainada típica de chapada, a proximidade do oceano, a pluviometria irregular em intensidade, tempo e espaço, lhe dão ainda características climáticas típicas, que têm marcada influência no regime de alimentação dos aquíferos, tanto por infiltração direta das águas pluviais como por infiltração das águas escoadas pelos rios.

4.2 Pluviometria

As chuvas se constituem na única forma de precipitação de águas meteóricas na área de domínio da Bacia Potiguar. Estas se apresentam com grande variação na distribuição temporal e espacial, e variam ainda na quantidade anual em um mesmo local. O mapa de isoietas elaborado pelo IPT (1982) apresenta as médias pluviométricas anuais relativas ao período 1933-1978 (FIGURA 3). A partir da observação daquele mapa pode-se notar, que há grande distinção de valores entre as extremidades leste e oeste da área. Assim, utilizando-se o método das isoietas podemos distinguir três regiões com médias pluviométricas distintas, conforme apresentadas no QUADRO 1 a seguir.

Região	Área de Domínio	Pluviosidade (mm/a) (1933 - 1978)	
		Intervalo	Média
Oeste	Rio Jaguaribe até Hipólito	550-750	650
Central	Hipólito até Jandaíra	500-550	525
Leste	Jandaíra até Touros	550-900	725
Média Geral			633

QUADRO 1 - Pluviometria anual média na Bacia Potiguar

FIGURA 3 - Mapa de isoietas do Estado do Rio Grande do Norte

O regime pluviométrico anual evidencia a existência de uma estação chuvosa e uma estação seca, bem distintas. Na parte oeste da Bacia, o período chuvoso se inicia em fevereiro e vai até maio, ao passo que no extremo leste as chuvas costumam ter distribuição mais regular no tempo e se estendem até julho.

A estiagem mais rigorosa ocorre nos meses de outubro e novembro, podendo atingir 7 a 8 meses, na região oeste e central, e 5 a 6 meses na faixa da costa leste (REBOUÇAS et alii, 1967).

4.3 Temperatura

De uma maneira geral, durante todo o ano as temperaturas permanecem elevadas, fato característico do nordeste brasileiro. No final da estação chuvosa, ou seja, durante os meses de julho e agosto, geralmente ocorre um decréscimo da temperatura. Semelhantemente à pluviosidade, as temperaturas variam diferentemente nos extremos ocidental e oriental da bacia. O QUADRO 2 a seguir, resume os dados de temperaturas anuais médias de algumas estações instaladas no seu domínio.

ESTAÇÃO	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO	TEMPO DE OBSERVAÇÃO (anos)	TEMPERATURAS MENSAIS MÉDIAS (°C)												MÉDIA ANUAL
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Açu	1964/66 e 1967/77	12,9	29,0	28,8	28,3	27,7	27,6	26,9	26,4	27,5	27,6	28,3	28,3	28,6	27,9
Apodi	1963/77	15,0	29,1	28,8	27,9	27,4	27,3	26,8	26,5	27,4	28,4	29,2	29,3	29,2	28,1
Macau	1937/47 e 1962/63	13,0	27,4	27,7	27,6	27,5	27,5	27,0	26,7	26,8	27,0	27,0	26,8	27,2	27,2
Mossoró	1970/77	8,0	28,2	27,6	27,3	26,9	26,6	26,4	26,4	27,1	27,7	28,2	28,4	28,6	27,4
Natal	1912/67		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,0

QUADRO 2 - Temperaturas mensais médias na Bacia Potiguar (DNOS, 1969 e DNOCS, 1978).

4.4 Insolação

Na área de domínio da Bacia Potiguar não há postos com período longo de observação - a única série longa de registros de insolação é a de Natal, fora portanto da área da bacia. No QUADRO 3 a seguir são apresentados os dados de insolação de dois

postos na área de estudo. De uma maneira geral, para a maior parte da área da bacia os meses mais insolados são outubro e novembro.

ESTAÇÃO	PERÍODO OBS.	TEMPO OBS. (anos)	INSOLAÇÃO MENSAL MÉDIA (h/d)												MÉDIA ANUAL
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Apodi	1963/77	15	7,7	7,5	7,2	7,1	7,6	7,8	7,8	9,3	9,5	9,7	9,4	8,7	8,2
Mossorô	1970/77	8	7,2	6,0	6,2	6,1	7,0	7,0	7,5	8,7	9,2	9,5	9,4	8,4	7,6
Natal	1912/42	31	8,3	7,1	7,3	6,7	6,8	6,6	7,1	8,3	9,1	9,7	9,9	9,3	8,0
	1961/67	7	8,8	7,6	7,5	6,5	7,3	6,8	6,8	8,2	8,2	9,6	9,5	9,6	8,0

QUADRO 3 - Insolação mensal média na Bacia Potiguar - (DNOS, 1969 e DNOCS, 1978).

4.5 Ventos

Os ventos dominantes na área são os alísios de sudeste, que constituem a massa equatorial atlântica, ocorrendo secundariamente os ventos de nordeste e de leste. Em Natal, as velocidades variam de 3,9 a 4,9 m/s (1913/33), sendo agosto o mês ventoso e março-abril o período de maior calmaria. Em Cruzeta, no centro-sul do Estado do Rio Grande do Norte, já fora do domínio da bacia, variam de 1,2 a 3,0 m/s (1930/42) (DNOS, 1969). Nota-se assim, uma sensível redução da intensidade dos ventos, com o afastamento do litoral.

O QUADRO 4 a seguir, fornece a velocidade média dos ventos em algumas estações no interior da Bacia Potiguar.

Estação	Ventos e suas Velocidades Médias (m/s) (1963/77)		
	SE	NE	E
Mossorô	3,6	4,6	4,0
Apodi	5,6	4,8	4,1
Macau	6,9	5,6	5,4

QUADRO 4 - Velocidade média de ventos na Bacia Potiguar, (DNOCS, 1978).

4.6 Umidade Relativa do Ar

Os valores máximos de umidade relativa do ar ocorrem nos meses de abril e maio, e os valores mínimos nos meses de outu

bro e novembro. O QUADRO 5 a seguir, apresenta valores da umidade relativa em algumas estações meteorológicas na Bacia Potiguar. Pode-se observar a diminuição dos teores de umidade com a interiorização das estações.

POSTO	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO	TEMPO DE OBSERVAÇÃO (anos)	UMIDADE RELATIVA DO AR MENSAL MÉDIA (%)												MÉDIA ANUAL (%)
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Apodi	1963/77	15	67,0	71,0	78,0	80,0	76,0	73,0	68,0	63,0	59,0	59,0	59,0	62,0	68,0
Mossorô	1970/77	8	69,0	76,0	81,0	81,0	78,0	74,0	71,0	63,0	61,0	62,0	65,0	65,0	70,0
Macau	-	-	69,0	72,0	73,0	74,0	70,0	67,0	66,0	64,0	64,0	65,0	62,0	67,0	68,0
Natal	1913/67	45	79,5	76,0	76,0	80,2	80,9	81,3	80,9	78,4	76,2	74,6	74,8	79,5	77,3
Cruzeta(c)	1930/42	13	61,0	65,0	69,0	70,0	67,0	66,0	62,0	59,0	56,0	55,0	55,0	57,0	62,0

(c) Fora do domínio, porém próxima do limite da Bacia Potiguar

QUADRO 5 - Valores mensais médios de umidade relativa do ar na Bacia Potiguar (DNOS, 1969 e DNOCS, 1978).

4.7 Evaporação e Evapotranspiração

No QUADRO 6 a seguir, são apresentados os valores de evaporação potencial em algumas estações meteorológicas da Bacia Potiguar medidas através de Tanque Tipo "A" do "United States Weather Bureau" ou através de Evaporímetro Piché.

ESTACÃO	PERÍODO DE OBS.	TEMPO DE OBS. (Anos)	TIPO DE EVAPORÍMETRO	EVAPORAÇÃO POTENCIAL MENSAL MÉDIA (mm)												MÉDIA ANUAL (mm)
				J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Apodi	1965/77	13	Tanque Classe A (1)	291,2	211,8	177,8	182,8	100,5	177,0	203,5	263,1	299,6	327,0	315,6	316,3	3006,3
Mossorô	1963/77	15	Piché	203,0	135,1	98,7	90,2	108,6	116,1	149,7	215,7	241,2	260,5	259,4	244,3	2111,0
	1970/77	8	Piché	177,3	140,5	95,2	79,7	78,5	115,7	149,7	211,8	238,3	233,9	224,4	231,2	1976,2
	-	24	Piché	222,0	179,0	187,0	170,0	201,0	223,0	244,0	287,0	275,0	272,0	238,0	232,0	2730,0
Natal	DNOS (a)	55		204,0	178,0	168,0	134,0	127,0	114,0	121,0	150,0	180,0	216,0	214,0	215,0	2021,0
Apodi	SUDENE (b)	27		173,0	151,0	148,0	125,0	114,0	109,0	119,0	138,0	170,0	194,0	189,0	186,0	1816,0
			Eq. Hargreaves (2)	187,0	156,0	144,0	122,0	126,0	121,0	139,0	168,0	187,0	206,0	201,0	194,0	1951,0
			Relação (2)/(1)	0,64	0,67	0,66	0,66	0,77	0,68	0,68	0,64	0,63	0,63	0,64	0,62	0,65

(a) DNOS (1913/67)

(b) SUDENE (1912/17; 1921/22 e 1924/42)

QUADRO 6 - Evaporação potencial mensal média na Bacia Potiguar

A evapotranspiração tem sido correlacionada com a evaporação obtida em tanque classe "A" do "United States Weather Bureau" e várias equações têm sido formuladas para se efetuar o cálculo da evaporação e da evapotranspiração a partir de dados climáticos.

REBOUÇAS et alii (1967) calcularam a evapotranspiração potencial para sete estações na Bacia Potiguar (Açu, Apodi, João Câmara, Macaíba, Macau, Mossoró e Natal) pela aplicação da equação de Turc e notaram que a mesma varia pouco no domínio da bacia, sendo em média, da ordem de 1 500 mm/a, apresentando maior intensidade no período de setembro a dezembro.

O DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS-DNOCS (1978), calculou a evapotranspiração potencial para o posto de Apodi, pelo método de Hargreaves, obtendo o valor de 1951 mm/a e uma relação média de 0,65 entre os valores de evapotranspiração calculados por esse método e os valores encontrados pelas medições em tanque tipo "A".

4.8 Clima

REBOUÇAS et alii (1967), baseando-se na classificação bioclimática de Gaussen que se fundamenta na evolução das temperaturas e nas precipitações no decorrer do ano, identificaram a existência de duas áreas com climas distintos. Na primeira delas, a oeste do meridiano de 36° , predomina um clima do tipo tropical quente, com período seco acentuado. Na outra área, situada a leste do mesmo meridiano, predomina um bioclima nordestino quente, com período seco médio.

Ainda segundo esses autores, pela classificação climática de De Martonne, que se baseia no índice de aridez, na porção a oeste do meridiano de 36° , o índice de aridez é superior a 20 e na porção central da Bacia, porém o índice é inferior a 15, o que a torna integrante da região mais árida do nordeste (FIGURA 4). Para leste desse meridiano, o índice de aridez varia entre 20 e 40, refletindo um grau de umidade mais elevado. De Natal para sul, já na Bacia Pernambuco-Paraíba, os valores de umidade são ainda mais elevados, integrando-se esta área na denominada zona úmida do nordeste.

Pela classificação climática de Köppen a porção oeste e central da Bacia Potiguar (FIGURA 5) se situa na categoria de clima BSw'h'; uma estreita faixa mais oriental da porção central, na categoria BSs'h' e a porção leste, na categoria As.

As letras têm a significação conforme segue:

FIGURA 4 - Zoneamento climático do Nordeste, segundo de Martonne (Rebouças, 1967).

- B - os climas do Grupo B são secos. A evaporação anual média é maior do que a precipitação anual média. Não há excedente de água e portanto a pluviosidade não é suficiente para formar correntes perenes;
- S - clima de estepe. Clima do Grupo B, porém do tipo semi-árido, caracterizado na Bacia Potiguar pelas precipitações anuais mínimas da ordem de 600-700 mm, havendo uma época chuvosa bem distinta (período de janeiro a maio);
- A - clima tropical chuvoso. A temperatura média é superior a 18°C durante todo o ano. A precipitação anual é abundante e excede à evaporação;
- h - clima do tipo B. Clima quente e seco, onde a temperatura média anual se mantém superior a 18°C ;
- h' - clima muito quente;
- s - as chuvas ocorrem no inverno. Verão seco. A altura da chuva no mês mais úmido no inverno deve ser no mínimo o triplo da altura da chuva no mês mais seco do verão;
- s' - as chuvas de inverno são antecipadas para o outono;
- w' - as chuvas de verão são retardadas para o outono.

FIGURA 5 - Zoneamento climático do nordeste (parcial) segundo KÖPPEN (Ministério da Agricultura, 1969).

5 SÍNTESE GEOLÓGICA DA BACIA POTIGUAR

5.1 Introdução

Desde o final do século XIX diversos pesquisadores têm estudado a geologia da bacia Potiguar. Esta síntese porém teve suas bases nos trabalhos publicados por SAMPAIO & SCHALLER (1968), CYPRIANO & NUNES (1968), MANOEL FILHO (1971), ARAÚJO et alii (1978), MENOR et alii (1980) e SOUZA (1982). A geologia da área estudada é apresentada no MAPA 3.

5.2 Arcabouço Estrutural

Segundo CYPRIANO & NUNES (1968) a Bacia Potiguar é resultante de um tectonismo relativamente brando, que durante um processo contínuo de distensão crustal gerou uma calha em periclinal com eixo mergulhando suavemente para NE. Em sua parte leste, uma área mais rasa forma um homoclinal E-W com mergulhos suaves para N.

Conforme SOUZA (1982), o arcabouço estrutural da Bacia é decorrente de falhamentos normais ocorridos durante o Cretáceo inferior, quando se desenvolveu o "rift" que precedeu a abertura do Oceano Atlântico. Há dois sistemas de falhamentos principais: um de direção SW-NE e outro NW-SE (FIGURA 6).

Na porção emersa da Bacia Potiguar destacam-se duas grandes estruturas orientadas segundo a direção SW-NE, sub-paralelas, que divergem a nordeste; a localizada a norte é denominada Falha de Areia Branca, e a localizada a sul, Falha de Carnaubais (FIGURA 6).

Na porção submersa da Bacia, as falhas têm direção preferencial NW-SE e E-W, modelando o contorno da costa, entre as quais se destaca a Falha de Ubarana (ARAÚJO et alii, 1978).

No presente estudo considera-se uma compartimentação estrutural da Bacia Potiguar em três blocos, correlacionada com a compartimentação apresentada por CYPRIANO & NUNES (1968) a saber: Bloco oeste (Plataforma oeste); Bloco Central e Bloco Leste (Plataforma Leste).

A Plataforma oeste se constitui em uma monoclinal com mergulho da ordem de 2° para S-SE, em direção ao centro da Bacia. É limitada a norte pela linha de costa modelada pelos falhamen

FIGURA 6 - Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar (SOUZA, 1982).

tos NW-SE; a oeste e sudoeste pelo embasamento cristalino e a S-SE, pela Falha de Areia Branca, alinhada ao longo do Rio Apodi. Incluídos na Plataforma oeste está a estrutura denominada Alto de Mossoró, a oeste da Falha de Areia Branca.

A Plataforma leste, também monoclinal, apresenta mergulhos suaves e generalizados para N-NW, com exceção do extremo leste, que mergulha para NE (Região de Touros) e depois para E (Região de Maxaranguape). É limitada a oeste e a noroeste pela Falha de Carnaubais, que vai desde as proximidades de Upanema até a foz do rio Camurupim; a nordeste e a leste, pela linha de costa, e a sul, desde Upanema até João Câmara, pelo embasamento cristalino. Aqui destaca-se o Alto de Touros, já no extremo leste da Bacia.

O Bloco central era tido como "graben" único (CYPRIANO & NUNES 1968), porém diante de novos conhecimentos, ARAÚJO et alii (1978) o consideram como uma série de pequenos "grabens" e "horsts". Corresponde à porção mais profunda da Bacia Potiguar na sua parte emersa. A maior profundidade do embasamento foi atingida no poço da Petrobrás 1-QB-RN (Poço Quixaba nº 1, Rio Grande do Norte), com 2 171 m.

No domínio do Bloco Central são identificadas duas regiões que se constituem em altos estruturais relativos: Alto da Quixaba e Alto de Macau.

Todas as estruturas citadas estão relacionadas ao evento tectônico responsável pela gênese da bacia e admite-se que esses falhamentos foram atuantes até o início da deposição da Formação Jandaíra, quando então a Bacia adquiriu relativa estabilidade (ARAÚJO et alii, 1978).

Há ainda estruturas superimpostas à sedimentação cretácea, de orientação geral NW-SE, associadas ao novo esforço tectônico responsável pelos derrames basálticos terciários (SIAL, 1975). Esses lineamentos são mais freqüentemente observados na porção intermediária da bacia, entre Mossoró e Jandaíra, onde impõem a sua orientação a riachos e córregos (MAPAS 2 e 3).

Ainda permanece indefinido um eventual limite, na área nordeste do Estado do Rio Grande do Norte, que venha a separar a seqüência cretácea da Bacia Potiguar, dos seus possíveis correspondentes ainda pouco conhecidos na Bacia Pernambuco-Paraíba.

Admitimos no entanto, apenas para efeito desta monografia, esse limite passando entre Pureza e Ceará-Mirim, onde a continuidade dos afloramentos da Formação Jandaíra é interrompida e também porque, para leste da Lagoa do Boqueirão, os aquíferos Jandaíra e Açu cedem lugar à grande potencialidade do aquífero Barreiras (item 7.1).

5.3 Litoestratigrafia

O pacote de sedimentos da Bacia Potiguar é constituído por camadas de idade cretácea e terciária, sobrepostas às rochas metamórficas e ígneas do embasamento pré-cambriano, através de contato discordante. A FIGURA 7 apresenta esquematicamente a litoestratigrafia da Bacia Potiguar proposta por SOUZA (1982) calçada na atualização da coluna estratigráfica publicada por ARAÚJO et alii (1978) e que é sucintamente descrita nos itens que se seguem.

5.3.1 Formação Pendência

Nome e histórico: uma seção não aflorante, composta por conglomerado, arenito, siltito e folhelho que recobre o embasamento cristalino nas partes mais profundas da bacia, foi inicialmente denominada de Formação Gangorra por SAMPAIO & SCHALLER (1968) e posteriormente ARAÚJO et alii (1978) utilizaram informalmente a denominação de Formação Pendência para a mesma, nome de uma cidade situada na margem direita do Rio Açu no Rio Grande do Norte.

Litologia: é constituída predominantemente por folhelhos micáceos cinza médio a escuro, com intercalações de siltitos cinza médio a claro e arenitos cinza esbranquiçados, muito finos a médios, calcíferos, podendo ainda ocorrer conglomerados junto às falhas, como por exemplo junto à Falha de Carnaubais.

Comportamento estratigráfico: sua ocorrência se limita ao preenchimento do "graben" central, não sendo conhecidos afloramentos. Assenta-se discordantemente sobre as rochas do embasamento cristalino e o contacto superior é também discordante com a Formação Alagamar.

Segundo SOUZA (1982), na área emersa a sua maior espessura constatada é de 1 100 m e a máxima é estimada em torno de 3000 m.

Na área norte onde o mapeamento sísmico é precário e os poços não atravessam a unidade, é difícil estimar a sua espessura. Na parte submersa da bacia, no bloco baixo da Falha de Ubarana, a sua espessura é estimada em 3 000 a 3 500 m.

Ambiente deposicional: a sua deposição se deu em leques deltaico-lacustres, em pronunciada subsidência (ARAÚJO et ali 1978).

Idade: a idade da Formação Pendência é Rio da Serra e Aratu (REGALI & GONZAGA, 1982 "apud" SOUZA, 1982). Segundo SOUZA, "ibidem", na porção submersa da Bacia podem existir sedimentos de idade Buracica (?) a Jiquiã (?).

5.3.2 Formação Alagamar

Nome e Histórico: o nome desta unidade provém da Ilha de Alagamar, situada no litoral do Rio Grande do Norte. ARAÚJO et alii (1978) a incluíram na Formação Açu e SOUZA (1982) porém a destaca como unidade à parte, por apresentar características litológicas próprias. A Formação Alagamar é subdividida no Membro Upanema, Camadas Ponta do Tubarão, Membro Galinhos e Membro Aracati.

Litologia: o membro Upanema é predominantemente arenoso, com intercalações de calcário e folhelho. As Camadas Ponta do Tubarão são constituídas por calcilutito ostracoidal intercalado com folhelho cinza esverdeado. O Membro Galinhos é essencialmente argiloso e o membro Aracati constitui-se de arenito fino a médio, às vezes grosseiros, folhelho cinza médio a escuro e calcilutito.

Comportamento estratigráfico: a Formação Alagamar apresenta espessuras da ordem de 1400 m no bloco baixo da Falha de Ubarana e raramente atinge 800 m na área sul.

O membro Upanema ocorre principalmente na área submersa, estando ausente no Alto de Touros e no Alto de Caponga-Aracati. As camadas Ponta do Tubarão ocorrem em quase toda a bacia, sendo que nos altos de Touros e Caponga-Aracati elas repousam discordantemente sobre o embasamento. Os membros Galinhos e Aracati são bem definidos na área submersa ao passo que na área emergsa só é possível diferenciá-los em alguns poços.

A base da Formação Alagamar é discordante com a Formação

Pendência ou com o embasamento. O contacto superior é discordante com a Formação Açu na área emersa e concordante e transicional com a Formação Ponta do Mel e também com a Formação Ubarana, na área submersa.

Ambiente deposicional: o ambiente de deposição foi tipicamente fluvial na parte inferior da unidade, passando a deltaico-lacustre na parte superior do Membro Upanema. As camadas Ponta do Tubarão marcam o final da deposição lacustrina e os Membros Galinhos e Aracati representam um sistema deltaico com influência marinha (ambiente transicional).

Idade: segundo estudos palinológicos realizados por REGALI & GONZAGA (1982) "apud" SOUZA (1982), a idade dessa unidade é Alagoas a Albiano. Segundo SOUZA, *ibidem*, há possibilidades de que a parte basal do Membro Upanema seja de idade Jiquiã (presença de ostracodes).

5.3.3 Formação Ponta do Mel

Nome e Histórico: o nome proposto para esta unidade, TIBANA & TERRA (1981) "apud" SOUZA (1982), é o de uma cidade situada no litoral do Rio Grande do Norte. Era anteriormente incluída na Formação Jandaíra e na parte superior da Formação Açu (ARAÚJO et alii, 1978).

Litologia: na Formação Ponta do Mel destacam-se duas seções bem distintas. A inferior possui na base, camadas de calca renito oncolítico e doloespatito, sobrepostos por arenito fino a médio. A seguir, há uma seção de calcilutito intercalado com folhelho. A seção superior é composta principalmente por calca renito bioclástico a algas vermelhas e verdes, crustosas, parcialmente recristalizado e dolomitizado, além de camadas de do loespatito.

Comportamento estratigráfico: a Formação Ponta do Mel ocorre somente na porção submersa da Bacia. A maior espessura encontrada foi de 647 m. O contacto superior com a Formação Ubarana é brusco, podendo ser discordante (erosivo) ou concordante (com a presença de hiato deposicional). O contacto inferior com a Formação Alagamar é concordante e transicional.

Lateralmente, para sudoeste, esta unidade grada para a Foror

mação Açu. Esta gradação que se constitui numa litozona com características próprias e diferentes de ambas as formações é in formalmente designada de formação Açu-Ponta do Mel (SOUZA, 1982).

Ambiente deposicional: quanto ao ambiente deposicional se gundo TIBANA & TERRA (1981) "apud" SOUZA (1982, a fácies predo minante é a de plataforma rasa (calcarenitos) associada a pla nície de maré pouco desenvolvida e mar aberto (calcilutito e plantônicos).

Idade: segundo aqueles mesmos autores a deposição dessa uni dade teria ocorrido no Albiano e Cenomaniano.

5.3.4 Formações Ubarana, Guamaré e Tibau

As Formações Ubarana, Guamaré e Tibau originadas através da deposição de clásticos e carbonatos durante sucessivas pro gradações, estão restritas à plataforma continental e proximida des da costa e que, devido ao caráter deste estudo, não apresen tam maior importância, razão pela qual serão apenas sucintamen te descritas.

Formação Ubarana

Nome, histórico e litologia: esta unidade foi definida por MAYER, 1974 "apud" SOUZA (1982) e representa a base da seqüên cia regressiva. Caracteriza-se por apresentar uma seção pelíti ca onde estão presentes folhelho, siltito, calcilutito, arenito, diamictito, conglomerado e as vezes, olistolitos.

O contacto inferior da Formação Ubarana com a Formação Pon ta do Mel pode ser tanto concordante como discordante (erosivo) e com a Formação Alagamar é discordante. O seu contacto supe rior com a Formação Guamaré pode ser também concordante ou dis cordante.

Ambiente deposicional e idade: o ambiente deposicional é tipicamente de talude continental e planície bacial, com a pre sença de turbiditos. A sua idade abrange o Cenomaniano (supe rior?) a Turoniano e Campaniano a Oligoceno (seção regressiva) (SOUZA, 1982).

Formação Guamarê

Nome, histórico e litologia: esta unidade foi reconhecida na Bacia desde o início de sua exploração. SOUZA (1982) propôs o nome de Formação Guamarê, nome de uma cidade do litoral norte do Rio Grande do Norte, para designar uma seqüência carbonática que ocorre na plataforma continental do Rio Grande do Norte e Ceará, sobreposta principalmente à Formação Ubarana e sotoposta à Formação Tibau. É constituída de calcarenito creme acastanhado, bioclástico, em parte recristalizado e dolomitizado, com intercalações de calcilutito, folhelho e arenito.

Comportamento estratigráfico e idade: os seus contactos com as unidades sobre e subjacentes são gradacionais ou discordantes. Ocorre intercalada com a Formação Tibau e também como intercalação dentro das Formações Macau e Ubarana. O ambiente de posicional é de plataforma carbonática e talude carbonático (FISCHER et alii, 1975 "apud" SOUZA, 1982). A sua deposição se deu do Campaniano ao Mioceno (REGALI & GONZAGA, 1982, "apud" SOUZA, 1982).

Formação Tibau

Nome, histórico e litologia: unidade descrita por Kegel (1957), que a denominou de Infra-Barreiras, foi definida por CYPRIANO & NUNES (1968) na área emersa, e por MAYER (1974) "apud" SOUZA (1982) na porção submersa. Sobreposta à Formação Guamarê, é constituída por arenitos quartzosos e arcossianos, médios a conglomeráticos, verde amarelado a amarelo claro, duros a friáveis, acamamento irregular localmente com deformações convolutas, correspondente a leques deltaicos (FISCHER et alii, 1975 "apud" SOUZA, 1982). As suas exposições estão restritas a falésias ao longo da costa norte e ao longo das margens dos rios Apodi, Açu e Mulungu, nos seus baixos cursos.

Comportamento estratigráfico: o seu contacto inferior na parte emersa é discordante com a Formação Jandaíra e na parte submersa é concordante com a Formação Guamarê. O contacto superior com a Formação Barreiras, bem como junto aos sedimentos recentes é de difícil definição (MAYER, 1974 "apud" SOUZA, 1982).

5.3.5 Formação Açu

Nome e histórico: essa unidade foi inicialmente denominada "Arenito Vermelho por OLIVEIRA & LEONARDOS (1943) e de Basal Sandstone, por KREIDLER (1949) que em seus mapas a chamou de Arenito Açu, "apud" CYPRIANO & NUNES (1968)". KEGEL (1957) propôs a divisão dessa unidade estratigráfica em três membros com transição gradacional entre eles, denominados Arenito Açu inferior, médio e superior. SAMPAIO & SCHALLER adotaram a divisão em apenas dois membros, conforme anteriormente apresentada pela SUDENE (1966), "apud" SAMPAIO & SCHALLER (1968), que ainda informalmente adotaram, sob a designação de Formação Açu, uma unidade constituída por um membro inferior e um superior. A seguir, CYPRIANO & NUNES (1968) propõem formalmente a denominação de Formação Açu, constituída pelos membros A (superior), B (médio) e C (inferior).

ARAÚJO et alii (1978) apresentam ainda informalmente a Formação Açu subdividida em três membros: Membro Aracati (superior) Membro Galinhos (médio) e Membro Upanema (inferior). Esta subdivisão foi porém baseada principalmente em dados de perfuração na plataforma continental, restando ainda dúvidas quanto à possibilidade de se estender essa subdivisão à porção emersa da bacia.

Litologia: segundo ARAÚJO et alii (1978) a seqüência Açu se inicia, em geral, por clásticos grosseiros, representados por arenitos quartzosos grosseiros, mal selecionados, em grãos subangulosos, por vezes conglomeráticos, ocasionalmente contendo feldspatos intemperizados (Membro inferior) aumentando gradativamente a porcentagem de finos em direção ao topo. A porção superior (Membro médio e superior) é em geral constituída por arenitos finos muito argilosos, siltitos argilosos, argilas vermelhas (também acinzentadas na área leste da bacia), com intercalações de margas e calcarenitos.

SOUZA (1982) define a Formação Açu, como SAMPAIO & SCHALLER (1968) em duas seções: uma inferior mais espessa, avermelhada, composta por conglomerados e arenitos com delgadas intercalações de folhelhos e siltitos, e uma superior, menos espessa constituída por arenitos finos, intercalados com folhelhos esverdeados.

Comportamento estratigráfico: a Formação Açu é aflorante numa faixa que circunda a bacia, em sua porção emersa entre as rochas do embasamento cristalino e os calcários da Formação Jandaíra. É recoberta em pequenas áreas isoladas, pelos aluviões dos rios Jaguaribe, Apodi-Mossoró, Upanema-do Carmo, Piranhas-Açu e Cabugi-Mulungu-Amargoso (MAPA 3). Assenta-se discordantemente sobre as rochas metamórficas e ígneas do embasamento cristalino nas porções marginais da Bacia, bem como sobre os sedimentos da Formação Pendência, na sua porção central. Em direção ao mar esta unidade grada lateralmente para a Formação Ponta do Mel e Formação Ubarana.

Na porção oeste da faixa de afloramento, a Formação Açu apresenta uma espessura média de cerca de 100 m e nas porções média e leste, uma espessura média igual ou inferior a 50 m. As espessuras máximas são atingidas no centro da Bacia entre as localidades de Areia Branca e Porto do Mangue, onde são observadas espessuras da ordem de 800 m. (IPT, 1982)

Idade: a Formação Açu abrange idades Albiano(?), Cenomaniano e Turoniano (REGALI & GONZAGA, 1982 "apud" SOUZA, 1982).

5.3.6 Formação Jandaíra

Nome, histórico: a Formação Jandaíra é constituída pela sequência carbonática da porção emersa da Bacia Potiguar, englobando calcários bioclásticos, calcários gredosos, dolomitos, habitualmente com fase terrígena pouco expressiva, tendo recebido, segundo CYPRIANO & NUNES (1968) diversas denominações, a saber:

- Calcário Apodi (JENKIS, 1913; PASHAK, 1956 e COOK, 1956);
- Apodi Group (KREIDLER, 1949), que o divide em três unidades e apresenta a denominação de Calcário Jandaíra em seus mapas;
- Calcário Jandaíra (KEGEL, 1957).

BEURLIN (1961, 1967) divide os calcários em dois complexos: o inferior (turoniano) e o superior (campaniano-maestrichtiano); ao inferior dá a denominação de Formação Sebastianópolis e ao superior, de Formação Jandaíra.

Finalmente essa sequência carbonática foi definida por SAMPAIO & SCHALLER (1968), informalmente como Formação Jandaí

ra e, formalmente, por CYPRIANO & NUNES (1968).

Litologia: a Formação Jandaíra apresenta ampla variação litológica, tanto vertical como horizontal, tendo sido já descritos calcários cinzas, calcários cremes, margas, siltitos, folhelhos, argilitos e dolomitos cremes.

Segundo CYPRIANO & NUNES (1968) perfurações realizadas na porção ocidental da Bacia, revelam que na base da Formação Jandaíra predominam *calcários* cinza esbranquiçados, duros, densos, recristalizados, coquinóides, muitas vezes oolíticos, pisolíticos, muito fossilíferos, de um modo geral nodulosos e argilosos. Intercaladamente ocorrem *margas* branco-amareladas finas, friáveis, localmente bastante fossilíferas e ainda *calcarenitos* e *siltitos* cinzas, duros e friáveis, estratificados, com grãos subangulares a arredondados. Junto ao contato com a Formação Açú ocorrem ainda camadas de *folhelho* verde a cinza escuro, calcífero, carbonoso e irregularmente estratificado.

Na porção superior da Formação Jandaíra, porém, predominam *calcários* de cor creme-cinza, microcristalinos, duros, a muito duros, maciços, acamamento médio, pouco fossilíferos, com intensa recristalização e muitas vezes com geodos preenchidos por drusas de calcita.

Adotando a conceituação litológica proposta por KEGEL (1957) MENOR et alii (1980) definiram as rochas aflorantes em quatro grupos, a saber:

Calcários conchíferos: calcários biodetríticos beges e compactos de textura média a grosseira, fratura irregular, incluindo fragmentos de conchas e foraminíferos perceptíveis a olho nu ou com o auxílio de lupa;

Calcários lajeados: calcários esbranquiçados a bege claros, compactos, de textura fina até média, com fratura subconchoidal a irregular, macroscopicamente afossilíferos a pouco fossilíferos, exibindo freqüentemente recristalização pontual e "bird-eyes". Em afloramentos exibem comumente uma erosão alveolar ou em lapiaz.

Calcários compactos: calcários cremes a cinzentos, muito compactos, de textura fina a média, fratura irregular, macroscópica

mente afossilíferos no setor oriental da Bacia (geralmente fossilíferos no setor ocidental), caracterizando-se por uma recristalização generalizada, difusa, e às vezes pela presença de cavidades alveolares submilimétricas.

Calcários gredosos: calcários brancos a esbranquiçados, friáveis, macroscopicamente afossilíferos a pouco fossilíferos (presença de equinóides).

MENOR, "ibidem", através de parâmetros estatísticos de componentes químicos, conclui sobre a composição mineralógica desses grupos litológicos, conforme segue:

- a) os calcários conchíferos são cálcicos, podendo admitir uma certa contaminação terrígena, porém pouco freqüentemente dolomíticos;
- b) os calcários lajeados, podem admitir teores elevados de MgO, porém raramente uma fração terrígena considerável;
- c) os calcários gredosos, podem ser tanto cálcicos como magnesianos, comportando freqüentemente uma fração terrígena não negligenciável; e
- d) os calcários compactos apresentam dominância das rochas dolomíticas, às vezes um pouco arenosas. Apresentam, porém, uma dominância de representantes cálcicos na zona ocidental da Bacia, geralmente fossilíferos.

A distribuição espacial das litologias aflorantes é apresentada na FIGURA 8. A análise dessa distribuição permitiu àqueles autores diferenciar três zonas na bacia; a saber:

- a) zona ocidental, onde dominam os calcários lajeados;
- b) zona mediana, onde dominam os calcários conchíferos; e
- c) zona oriental, onde dominam os calcários compactos.

Algumas feições particulares porém se destacam desse comportamento geral, tais como:

- uma área transversal de calcários conchíferos inserida na zona ocidental onde predominam os calcários lajeados;

FIGURA 8 - Mapa de dominância litológica aflorante em carbonatos da Formação Jandaíra (MENOR, et alii, 1980).

- a incidência de horizontes de arenitos carbonáticos caracterizando a zona mediana;
- a presença de calcários conchíferos na região de Parazinho/Pedra Grande, quebrando a hegemonia dos calcários compactos da zona oriental.

Segundo MENOR et alii "ibidem", a base da Formação Jandaíra é constituída por calcários lajeados, superpostos por calcários conchíferos, com intercalações de calcários compactos, fenômeno que pode ser acompanhado até a zona oriental, onde, nas proximidades da cidade de Jandaíra é constatada uma transição para o domínio quase exclusivo dos calcários compactos.

O mapa de variação de CaO e MgO é apresentado na FIGURA 9.

A distribuição desses constituintes permitiu também àqueles autores caracterizar repartições na bacia, tais como:

- zona ocidental: domínio das rochas cálcicas;
- zona mediana: aproximadamente ao longo de uma linha que une

FIGURA 9 - Distribuição de CaO-MgO nas rochas carbonáticas do topo da Formação Açú e da Formação Jandaíra (MENOR et alii, 1980).

Guamaré a Pedro Avelino situa-se uma faixa de brusca transição entre o domínio das rochas cálcicas e das rochas dolomíticas;

c) zona oriental: domínio das rochas magnesianas.

Fazem exceção a esse comportamento geral as seguintes feições:

- as rochas dolomíticas que se intercalam no topo da Formação Açú, dispostas, por isso, ao longo do contacto desta com a Formação Jandaíra;
- as faixas dolomíticas descontínuas que se situam na zona ocidental e mediana; e
- os calcários conchíferos (encravamento cálcico) situado na região de Parazinho/Pedra Grande no domínio dolomítico característico da zona oriental da bacia.

A fase terrígena, essencialmente quartzo-feldspática, tem sua maior participação no topo da Formação Açu e na sequência basal da Formação Jandaíra, cujas ocorrências estão vinculadas às menores distâncias do contacto entre estas duas formações. Uma incidência marcante de aportes terrígenos afeta a zona mediana da Bacia, chegando a constituir horizontes de calcários arenosos e arenitos carbonáticos incluídos na sequência sedimentar da Formação Jandaíra. Na zona ocidental porém esses aportes são limitados, enquanto na zona oriental há uma presença conspícua desses aportes, nas proximidades de Parazinho e Pedra Grande.

Na FIGURA 10 são apresentadas as áreas correspondentes a litologias do pólo cálcico, que contêm um mínimo de 90% de calcita. Como se pode notar, estas litologias ocupam preferencialmente as zonas ocidental e mediana da bacia.

FIGURA 10 - Mapa com as áreas de dominância dos calcários aflorentes de alta pureza (MENOR et alii, 1980).

Na FIGURA 11 são apresentadas as litologias do pólo magnésiano, constituídas por dolomitos cálcicos contendo um mínimo de 75% de dolomita e menos de 20% de fase terrígena (Resíduo insolúvel: RI). Observa-se que essas litologias ocupam preferencialmente a zona oriental da bacia.

De uma maneira geral, como se pode notar, as áreas correspondentes às litologias do pólo cálcico e do pólo magnésiano se

ajustam aos limites das dominâncias litológicas apresentadas na FIGURA 8.

FIGURA 11 - Mapa com as áreas de dominância das rochas dolomíticas aflorantes de alta pureza (MENOR et alii, 1980).

Ocorrências de gipsita, depósitos evaporíticos e rochas fosfatadas têm sido assinaladas em pontos distintos da bacia. A ocorrência de gipsita na sua porção sudoeste, nas proximidades da cidade de Governador Dix-Sept Rosado foi inicialmente considerada por BEURLIN (1964) como incluída na parte média da Formação Jandaíra, que a relaciona com um hiato deposicional entre o que denominou de Formação Sebastianópolis e Formação Jandaíra. SAMPAIO & SCHALLER (1968) consideram que a mesma ocorrência se situa no limite superior da Formação Açú e CYPRIANO & NUNES (1968) a consideram próxima do topo da Formação Jandaíra. MENOR et alii (1980) sugerem por sua vez, que todas as ocorrências de gipsita, evaporitos, rochas fosfáticas e argilitos, correspondem aos limites de distintos ciclos deposicionais da Formação Jandaíra.

Comportamento estratigráfico: a Formação Jandaíra ocorre em todo o domínio da Bacia Potiguar, se expondo na maior parte da área em uma ampla superfície erosional (chapadas), sendo reco-

berta nas proximidades da costa, de uma maneira contínua, por unidades terciárias (Grupo Barreiras) e quaternárias (aluviões, dunas e praias) item 5.3.9. "Cuestas" calcárias evidenciam o seu limite a oeste e a sul, junto à Formação Açu.

Em superfície o contacto da Formação Jandaíra com a Formação Açu é bastante evidente, onde aquela se assenta em contacto concordante sobre os sedimentos da Formação Açu, bem conspícuo pela linha de crista da escarpa de "cuesta". Em sub-superfície esse contacto se mostra também bastante característico nos perfis litológicos e elétricos. O contorno estrutural da base da Formação Jandaíra é apresentado no MAPA 4.

O contacto superior representa uma grande superfície erosional achando-se exposta em sua maior parte.

Em sua porção recoberta a Formação Jandaíra se encontra ora sob os sedimentos terciários da Formação Tibau ou do Grupo Barreiras, ora sob os derrames basálticos da Formação Macau ou ainda sob sedimentos aluvionares, praias e dunas.

A Formação Jandaíra apresenta um padrão de espessamento bastante irregular na porção oeste, crescente de noroeste em direção a Mossoró e de oeste, sudoeste e sul, em direção ao rio Bonsucesso (MAPA 5). A partir daí o maior eixo de deposição se direciona para a Serra do Mel onde a espessura da Formação atinge o seu valor máximo com 580 m junto à linha de costa, entre as localidades de Areia Branca e Porto do Mangue. Nas porções central e leste da Bacia o padrão de espessamento já se torna mais regular e crescente em direção ao oceano.

Ambiente deposicional: a deposição da Formação Jandaíra se deu em ambiente de plataforma interna, sob condições de super-maré, acompanhada de subsidência gradual, em período de relativa quietude tectônica (ARAÚJO et alii, 1978).

Idade: SAMPAIO & SCHALLER (1968) admitem que os sedimentos da Formação Jandaíra foram depositados no intervalo de tempo compreendido entre os andares Turoniano e Santoniano. CYPRIANO & NUNES (1968), concordam com BEURLIN (1961) em idade Turoniana para o pacote inferior (Formação Sebastianópolis). Por não haver indícios de fauna do Coniaciano, BEURLIN "ibidem" admitiu um hiato entre a unidade inferior (Formação Sebastianópolis) e

a superior (Formação Jandaíra) para a qual determinou idade Santoniana-Maestrichtiana.

TIBANA & TERRA (1981) "apud" SOUZA (1982) a consideram do Turoniano ao Maestrichtiano e SOUZA, "ibidem", a considera Turoniano a Campaniano inferior, em virtude do Maestrichtiano pertencer a uma seqüência sismoestratigráfica superior em relação à Formação Jandaíra.

Descontinuidades: devido a interesses para esta monografia as descontinuidades mapeadas por CYPRIANO & NUNES (1968) tais como falhas normais traçadas em aerofotos, falhas normais inferidas, diaclases, fraturas e lineações retilíneas identificadas na superfície aflorante da Formação Jandaíra bem como em sua porção recoberta pelos sedimentos terciários foram submetidas a tratamento estatístico. Deve-se ressaltar que a área de mapemento das descontinuidades corresponde à porção da bacia desde o seu extremo oeste até o meridiano 36°W, representando porém a maior parte do domínio da Formação Jandaíra.

O processamento dos dados foi feito através da aplicação do programa GEOVET (GAMA, 1982), cujos parâmetros estatísticos obtidos foram registrados sobre o mapa geológico (MAPA 3) devendo-se ressaltar porém que nesse mapa estão representadas somente as descontinuidades mais expressivas mapeadas por aqueles autores. Dessa maneira foram elaborados os seguintes mapas:

- freqüência de direções das continuidades nas células em relação ao domínio, por intervalos de direções - histogramas circulares ou rosáceos - (MAPA 6);
- direções médias das descontinuidades por célula (MAPA 7);
- relação entre o comprimento das descontinuidades e o comprimento total das descontinuidades no domínio, por intervalo de direções - histogramas circulares ou rosáceos (MAPA 8);
- freqüência de descontinuidades (n° de desc./km²) - curvas de isofreqüência - (MAPA 9); e
- densidade de descontinuidades (km de desc./km²) - curvas de isodensidade - (MAPA 10).

Observando-se o mapa de freqüência de direções das desconti

tinuidades (MAPA 6) pode-se verificar que há notório aumento relativo da freqüência na porção ocidental da bacia, na Chapada do Apodi, embora haja fraturamentos de grande expressão nas outras porções da mesma. Nota-se também que há genericamente maior freqüência de descontinuidades no quadrante NO. Dentro dessa tendência geral porém se destacam três áreas que apresentam maior freqüência em outras direções. Assim temos o núcleo de células na porção central da Chapada do Apodi, onde as maiores freqüências de direção estão nos intervalos praticamente NS e duas áreas bastante distantes entre si, com direções mais freqüentes no quadrante NE, parecendo seguir o mesmo padrão de direção das descontinuidades existentes no embasamento cristalino. A primeira dessas áreas está situada entre uma linha que une a Serra Dantas (quartzítica) à Ponta Grossa (no litoral) e o baixo vale do rio Mossoró; a segunda, localizada na porção oriental da bacia, para leste do baixo vale do rio Mulungu, e que provavelmente se continue até o seu extremo leste.

O mapa de direções médias (MAPA 7) é parcialmente concorde com essas evidências, porém deixa transparecer que em algumas células, embora haja domínio de freqüência em um determinado setor angular (MAPA 6), a direção média (composição vetorial) das descontinuidades porém recai sobre outro setor. Tal situação ocorre na borda do domínio dos calcários na porção ocidental da bacia, desde sul de Dix-Sept Rosado até o limite sudoeste da Chapada do Apodi. No restante do domínio praticamente ocorre coincidências de intervalos angulares de maior freqüência e direções médias.

No MAPA 8 estão representados os comprimentos relativos das descontinuidades em cada intervalo angular, comparativamente ao comprimento total no domínio, no mesmo intervalo. As rosáceas representativas nas células apresentam praticamente o mesmo comportamento das freqüências de direções (MAPA 6) sendo notória a dominância de maiores comprimentos totais das descontinuidades na porção ocidental da bacia e na região das serras do Carmo e do Mel. Nota-se ainda que os comprimentos são em geral crescentes em direção à orla marítima.

No MAPA 9 estão traçadas as linhas de isovalores das freqüências das descontinuidades por célula, onde se destacam alguns núcleos de elevada freqüência, tais como: região da Serra de

Mossoró, sudoeste de Maxixe, nordeste de Felipe Guerra, norte de Upanema, oeste da Serra do Carro, a leste da Serra do Mel, região entre os rios Açu e Mulungu e a sudoeste de Jandaíra. Nota-se também aqui maiores valores na porção ocidental da bacia.

As curvas de isovalores de densidade das discontinuidades (MAPA 10) denotam praticamente os mesmos núcleos encontrados no mapa de freqüência, revelando assim que o padrão geral é portanto de aglomerados de discontinuidades.

5.3.7 Formação Macau

Nome e histórico: desde KEGEL (1957) existem citações de ocorrências de derrames basálticos na Bacia Potiguar, definidas por MAYER (1974) "apud" SOUZA (1982) como Formação Macau.

Litologia: SIAL (1975) apresenta duas seqüências magmáticas pós-paleozóicas no nordeste brasileiro:

- a primeira, constituída predominantemente por diabásios toleíticos que ocorrem sob a forma de diques com orientação geral E-W cortando rochas do embasamento cristalino, para os quais tem sido determinadas idades compreendidas entre 125 a 130 milhões de anos (Cretáceo);
- a segunda, álcali-basáltica, e que constitui a Formação Macau, é representada por "plugs", pequenos derrames e mais raramente por diques, e ocorre na margem da bacia também cortando rochas cristalinas (exemplo: Pico do Cabugi, nas proximidades de Lajes) e no interior da Bacia, onde corta os sedimentos cretáceos desde leste do rio Açu até proximidades da cidade de Jandaíra. As ocorrências em superfície apresentam, nesse domínio, um padrão geral com orientação SE-NW. Datações realizadas em olivina-basaltos revelam idades entre 18 e 42 milhões de anos (Terciário) para esta seqüência (SIAL, 1975). Os seus derrames estão presentes nas formações Tibau, Guamaré e Ubarana, e de acordo com datações baseadas em microfósseis esta unidade abrange as épocas Oligoceno e Mioceno (SOUZA, 1982).

5.3.8 Grupo Barreiras (Terciário)

5.3.8.1 Introdução

O Grupo Barreiras corresponde a uma seqüência de sedimentos pouco ou não consolidados, de cores variegadas, variando desde argilas até conglomerados, com estratificação irregular e indistinta. Assenta-se ora sobre o embasamento cristalino, ora sobre as formações cretáceas, destacando-se na lapa por uma discordância de erosão bastante pronunciada.

Os sedimentos do Grupo Barreiras ocorrem continuamente na faixa litorânea desde o Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Pará, entrando mesmo nas baixadas amazônicas. Nos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte essa faixa atinge até 50 km de largura, persistindo ainda, de maneira descontínua, em algumas áreas no interior.

MABESOONE et alii (1972) fizeram uma correlação entre as áreas estudadas em superfície, por MORAES (1924), KEGEL (1957), LINS & ANDRADE (1960), BIGARELLA & ANDRADE (1964) e SUDENE-ASMIC (1967) e em subsuperfície, por CAMPOS & SILVA (1969), com novos dados obtidos no campo, pelo reexame da maior parte dos afloramentos anteriores descritos e exame de novos afloramentos. A partir dos estudos de campo, estudos sedimentológicos de laboratório e da história geológica da região, esses autores apresentaram uma subdivisão do Grupo Barreiras em três unidades: inferior, média e superior, cada uma delas com uma capa de intemperismo típica e que são apresentadas nos itens que se seguem.

5.3.8.2 Unidade inferior (Formação Serra do Martins)

Nesta formação estão incluídas a Série Serra do Martins de MORAES (1924), Formação infra-Barreiras de KEGEL (1957), Formação Mossoró de LINS & ANDRADE (1960), e Formação Tibau, de CAMPOS & SILVA (1969), "apud" MABESOONE et alii (1972).

Tanto em superfície como em subsuperfície, a Formação Serra do Martins é constituída por uma seqüência arenosa até arenítica. Sua espessura pode atingir 30 m.

Nas suas ocorrências nas chapadas do interior do Estado do Rio Grande do Norte e da Paraíba, possui a seguinte litologia: na base, a seqüência é arenosa, friável, caulínica, de coração branca, com algumas camadas mais escuras, geralmente de cores roxa e amarela; para cima, essas areias caulínicas cedem lugar aos arenitos, localmente silicificados, até quartzitos sedimentares; na parte superior, há seqüência arenosa até conglomerática, com cimento ferruginoso e bastante dura. Encerrando a seqüência surge uma capa laterítica de arenitos ferruginosos, seja em blocos soltos, seja em forma de crosta. Geralmente, esta seqüência superior ferruginosa está ausente nas regiões costeiras, talvez devido à erosão. Em resumo, esta unidade se apresenta com dois pacotes bastante distintos em cores: um inferior, branco e outro superior, avermelhado.

5.3.8.3 Unidade média (Formação Guararapes)

Com esta denominação foram incluídas a Formação Guararapes e a Formação Riacho Morno de BIGARELLA & ANDRADE (1964) e a Formação Barreiras, do Vale do Jaguaribe, da SUDENE-ASMIC (1967).

A unidade média se compõe de seqüência variegada, com sedimentos arenosos até argilosos, em camadas horizontais ou em lentes, com pequenas discordâncias erosionais locais, marcadas por leitos de seixos. No campo esses depósitos se destacam pelas cores vivas e pela estratificação irregular, às vezes se transformando em laminação perturbada. Sua espessura pode atingir 40 m.

No topo desta unidade existe uma capa de intemperismo que destruiu a estratificação original pela infiltração de óxidos de ferro. Estes se apresentam em forma de manchas ou colunas verticais, às vezes cimentados até arenitos ferruginosos: é o denominado *Intemperismo Riacho Morno*. Essa capa de intemperismo segue mais ou menos a superfície atual sendo porém truncada nos vales mais profundos.

A Formação Guararapes se encontra ao longo da costa, constituindo as "barreiras" dos rios, inclusive do baixo Jaguaribe e as falésias das praias, desde Recife (PE) até Aracati (CE).

5.3.8.4 Unidade Superior (Formação Macaíba)

Com esta denominação foram incluídas por MABESOONE et alii (1972) a Formação Macaíba e Formação Potengi de CAMPOS & SILVA, (1969) e a Formação Faceira da SUDENE-ASMIC (1967).

É constituída de uma seqüência essencialmente arenosa até argilosa, de coloração clara, com bastante caulim, tendo na base um horizonte de espessura variável de seixos de quartzo e de rochas cristalinas. A granulometria é bastante irregular e a estratificação muito indistinta. Raramente ocorrem concentrações de óxido de ferro, e quando existem, se apresentam em forma de pequenas manchas alaranjadas até avermelhadas. Sua espessura pode atingir 20 m.

MABESOONE et alii "ibidem", consideram que a Formação Macaíba está separada da Formação Guararapes por uma evidente discordância de erosão.

Capeando esta unidade há uma série de intemperismo pouco espessa de areias até siltes avermelhados, com concentrações de óxido de ferro na superfície, sem constituir contudo crostas inteiras. Esse capeamento foi chamado de *Intemperismo Potengi*.

5.3.8.5 Ambiente deposicional e idade do Grupo Barreiras

Estudos da composição granulométrica, do caráter morfoscópico e morfométrico dos grãos de areia e ainda de lâminas petrográficas de amostras cimentadas permitiram a MABESOONE (1968) "apud" MABESOONE et alii (1972) estabelecer os seguintes ambientes de deposição:

FORMAÇÃO	AMBIENTE DEPOSICIONAL
Macaíba	Fluvial
Guararapes	Combinação de corridas de lama e rios , indicando clima bastante rigoroso, semi- árido.
Serra do Martins	Fluvial, distante das fontes de sedimen- tos; influência de processos litorâneos.

Segundo MABESOONE et alii, "ibidem", a datação das diversas formações estratigráficas afossilíferas do Grupo Barreiras é muito problemática.

Tanto BIGARELLA & ANDRADE (1964) como MABESOONE (1966), dataram-na a partir de bases paleoclimáticas e portanto através de um critério bastante inseguro. Segundo esse critério, tem-se:

FORMAÇÃO	IDADE
Macaíba	Pós-pliocênica (quaternária inferior)
Intemperismo Riacho Mormo ..	Pliocênica Superior
Guararapes	Miocénica superior a pliocénica
Serra do Martins	Oligocénica (?) (ou mais antiga)

5.3.9 Aluviões, Praias e Dunas (Quaternário)

5.3.9.1 Aluviões

No domínio da Bacia Potiguar, os aluviões que merecem destaque são os relacionados aos rios Jaguaribe, Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu. Secundariamente, os aluviões dos rios Upanema - do Carmo e Cabugi-Mulungu-Amargoso.

A litologia desses aluviões é bastante variável mas de uma maneira geral são constituídos por clásticos ocasionalmente grossos com matriz argilosa, por vezes rica em matéria orgânica.

No baixo curso dos principais rios, os aluviões ocorrem em forma de tabuleiros escalonados por desníveis de poucos metros e também na forma de planícies de inundação. Na borda desses tabuleiros, em contacto com os calcários da Formação Jandaíra, podem ser encontradas cascalheiras contendo blocos de sílex, de quartzo e de diversas rochas do embasamento cristalino jacente a montante desses grandes rios.

Fato notório é o desenvolvimento de intensas planícies aluvionares sobre os afloramentos da Formação Açu nas áreas onde o rio Apodi e o rio Piranhas passam de sobre os sedimentos da Formação Açu para os calcários da Formação Jandaíra, criando a montante dessas penetrações, extensa área aluvionar devida à barreira litológica-geomorfológica das "cuestas" calcárias.

Na planície aluvial do rio Apodi, próxima à cidade do mesmo nome, com base em dados de perfurações e de sondagens geofísicas MANOEL FILHO (1971), estimou espessuras de até 40 m para esses aluviões.

A planície aluvial do rio Açu, localizada entre as cidades de Açu e Alto do Rodrigues, apresenta comprimento de cerca de 36 km e largura variando de 2,5 até 15 km. O DNOCS (1976), analisando os perfis de diversas sondagens executadas na área, conclui que os sedimentos perfurados equivaleriam aos aluviões e sedimentos de Formação Açu, que foram subdivididos em "aluvião superior" e "aluvião inferior". O IPT (1982) reinterpretando os dados disponíveis, sugere que os sedimentos que foram denominados "aluvião inferior" sejam, pelo menos em parte, correspondentes a uma variação faciológica da Formação Jandaíra e ao topo da Formação Açu, considerando que os aluviões do rio Açu, nessa região, equivalem apenas ao "aluvião superior", definido naquele estudo e cujas espessuras máximas variam de 20 a 50 metros.

5.3.9.2 Praias e dunas

A costa norte da Bacia Potiguar apresenta uma faixa de até cerca de 10 km de largura que se estreita por vezes até 2 km e se interrompe na foz dos grandes rios, na qual ocorrem sedimentos de dunas e de praias, intimamente relacionados.

As dunas, que nessa região atingem a cota máxima de 20 m, são de pelo menos duas gerações. As mais antigas (pleistocênicas?) encontradas mais para o interior, recobertas por vegetação pouco densa, formam uma seqüência de cordões paralelos à linha de costa; as mais recentes e atuais, móveis, modeladas pelo vento nordeste, originam relevo característico de cristas em semicírculo.

Deve-se notar ainda a presença de dunas sobre superfícies de grande altitude, como são as encontradas no topo da Serra do Mel, a uma altitude de mais de 150 m.

Os sedimentos dunares são essencialmente constituídos por areias finas a médias, quartzosas, de coloração esbranquiçada nas dunas atuais e avermelhada nas dunas antigas.

Os sedimentos de praias são representados por areias de granulação fina a grossa, quartzosas, micáceas com fragmentos de conchas, por vezes contendo argila, regularmente selecionados e em geral de coloração amarelada ou acinzentada.

6 EXPLORAÇÃO DO AQUÍFERO JANDAÍRA

6.1 Introdução

As crescentes demandas de água fazem com que no mundo inteiro atualmente se invistam capital em quantidades consideráveis em estudos hidrogeológicos e em construção de obras de captação. Apesar disso porém, no panorama mundial a utilização racional dos recursos hídricos subterrâneos é uma tecnologia pouco desenvolvida, tanto no que diz respeito às técnicas de levantamentos exploratórios de aquíferos como em técnicas de captação dos seus recursos.

Entende-se por exploração de águas subterrâneas, o conjunto de atividades que permitem a localização e o reconhecimento de aquíferos a partir dos quais se pode obter água em quantidade e qualidade adequadas aos diferentes fins. Não existe porém uma fronteira definida entre os trabalhos de exploração (prospecção e avaliação) das reservas aquíferas e os de exploração (lavra) do recurso. A ênfase da primeira etapa estaria mais voltada aos aspectos de reconhecimento e a da segunda, mais aos aspectos técnicos de captação e a aspectos organizacionais. O caráter multidisciplinar de ambos os níveis de atividades para o aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos conduz portanto à cooperação de técnicos das mais diversas áreas das ciências para o equacionamento dos problemas relacionados ao suprimento de água.

No que se refere ao aquífero Jandaíra, as pesquisas a nível exploratório nas áreas de conhecimento específico básico, tais como a Geologia, Geofísica, Hidrometeorologia e Hidrogequímica, embora na maioria das vezes não tenham tido suas atividades programadas com o objetivo de reconhecimento e avaliação hidrogeológica, muito têm contribuído para o aprofundamento do conhecimento desse aquífero.

Resultados parciais das investigações no campo da Hidrometeorologia foram apresentados no item 4; os resultados das investigações Hidrogequímicas ora realizadas serão apresentadas no item 8. São apresentadas a seguir, algumas considerações das investigações na área de Geologia e Geofísica.

6.2 Investigações Geológicas

São básicas para os estudos hidrogeológicos, uma vez responsáveis pela correta caracterização da geometria dos aquíferos, da sua composição mineralógica e portanto com consequências na composição química das águas e ainda pelo fornecimento de dados que permitem a estimativa das suas reservas e o conhecimento dos seus mecanismos de fluxo.

Os estudos exploratórios da Formação Jandaíra a nível regional geralmente têm sido o produto secundário de estudos exploratórios com o objetivo de pesquisas de hidrocarbonetos (petróleo) programadas pela PETROBRÁS na Bacia Potiguar, tanto através dos mapeamentos geológicos como através das sondagens mecânicas e geofísicas (métodos sísmicos e elétricos) por ela executadas.

O reconhecimento litológico e estrutural sobre a Formação Jandaíra têm advindo ainda secundariamente de mapeamentos destinados à prospecção mineral, tais como os mapeamentos executados pela CPRM (1978), MENOR et alii (1980) e MME (1981).

A maioria das sondagens mecânicas de reconhecimento que forneceram informações sobre a estratigrafia desde o topo até à base da Formação Jandaíra refere-se às sondagens a cargo da PETROBRÁS, tendo sido executadas por várias entidades estatais, entre as quais o DNPM, a CPRM, e a própria PETROBRÁS. Os poços delas resultantes construídos até 1979, tendo sido inventariados pelo IPT tiveram também seus parâmetros utilizados nesta monografia.

Poços tubulares para abastecimento em água, conquanto tenham caráter restrito e parcial em termos de penetração na Formação Jandaíra, têm se constituído em uma excelente fonte de informações e dados sobre o comportamento litológico, estrutural e hidráulico da Formação Jandaíra. A sua distribuição quase homogênea na área de domínio do aquífero Jandaíra facilita os estudos de reconhecimento desse aquífero a nível regional.

6.3 Investigações Geofísicas

6.3.1 Sondagens Geofísicas

As sondagens geofísicas na Bacia Potiguar têm se processa

do tanto através de campanhas que objetivam a prospecção de petróleo como as que objetivam a prospecção de água subterrânea, sendo as primeiras, até agora executadas pela PETROBRÁS e as últimas, pela SUDENE, pela Secretaria de Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Norte-SIC/RN e Companhia de águas e esgotos do Rio Grande do Norte - CAERN.

A seleção do método de prospecção geofísica a ser empregado em uma determinada área bem como a qualidade da "resposta" que esse método poderá fornecer estão condicionadas principalmente ao contraste, em termos de propriedades físicas, existentes entre as formações geológicas que compõem a estratigrafia dessa área.

São apresentadas a seguir algumas considerações concernentes a prospecções geofísicas feitas através de sondagens elétricas verticais (SEVs) uma vez que os métodos sísmicos têm sido utilizados apenas pela PETROBRÁS, e cujos dados usualmente não se encontram disponíveis.

O QUADRO 7 apresenta os dados gerais sobre as medições geolétricas de longo alcance efetuadas na Bacia Potiguar pela SUDENE, CAERN e Secretaria de Indústria e Comércio do Rio Grande do Norte-SIC-RN, em convênio com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT.

Para facilidade de referência as SEVs foram agrupadas em dois conjuntos:

- a) SEVs executadas nas porções ocidental e central da Bacia Potiguar, abrangendo os quatro primeiros projetos referidos no QUADRO 7;
- b) SEVs executadas no extremo oriente da Bacia. Correspondentes às sondagens executadas pelo IPT

As condições gerais de execução e os resultados das interpretações dessas sondagens são apresentados nos itens que se seguem.

- a) *Sondagens elétricas verticais na porção ocidental e central da Bacia Potiguar*

Para as medições geolétricas foi utilizado como arranjo, o quadripolo linear simétrico AMNB, de Schlumberger.

A análise das medições geolétricas permitiu constatar uma

Projetos	SEVs Na área de interesse	Época das Medições	AB (metros)
1) Bacia Escola de Hidrogeologia (SUDENE) (123 SEVs)	42 BP 45 BP - 49 BP 90 BP - 92 BP 95 BP - 99 BP 101 BP - 103 BP 105 BP - 114 BP 122 BP - 123 BP	06/66 a 08/67 (não contínuo)	1000 a 6000
2) Abastecimento d'água de Macau e Pendências (Estudo reali- zado pela CAERN (21 SEVs)	1 C - 21 C	10/09 a 05/10/72 (contínuo)	4000 a 14000
3) Estudo hidrogeo- lógico da Planí- cie Aluvial do Apodi/RN (SUDENE) (70 SEVs)	47 AA	02/74	1000
4) Projeto Apodi Estudo Estrutural da parte W da Bacia Potiguar	1A - 52 A	27/01 a 06/09/74 (não contínuo)	2000 a 14000
5) Estudo hidrogeo- lógico detalha- do do Estado do Rio Grande do Norte SIC-RN/ IPT-SP (24 SEVs)	001 - 011	06/04 a 01/05/81	800 a 1000

QUADRO 7 - Campanha de medições geolétricas de longo alcance na Bacia Potiguar (FEITOSA, 1978, modificado).

boa diferenciação elétrica das principais unidades litológicas. O QUADRO 8 a seguir sumariza as características da sequência geoeleétrica genérica e a sua correspondência com a sequência geológico-estratigráfica da Bacia Potiguar.

Horizonte Geoeletrico	Resistividade Elétrica verdadeira (ohm.m)	Seqüência Estratigráfica
1	40 - 80	Formação Jandaíra
2	10 - 30	
3	50 -150	
4	3 - 8	Conjunto Formação Açu/Formação Gangorra
5	∞	Embasamento Cristalino

QUADRO 8 - Características geoeletricas das principais formações geológicas da Bacia Potiguar (FEITOSA, 1978)

A FIGURA 12 a seguir mostra três exemplos de sondagens elétricas verticais onde é possível distinguir bem a sequência geoeleétrica apresentada no QUADRO 8.

Segundo FEITOSA, "ibidem" a metodologia de interpretação das medidas geoeletricas foi fundamentada em sondagens elétricas de aferição, (parametrização) cujo referencial foram 16 poços tubulares profundos que atingiram o embasamento cristalino, tendo sido utilizados diversos artifícios de interpretação além do conhecimento anterior sobre os sedimentos da Bacia. Foi utilizada também a metodologia clássica de interpretação conhecida na literatura como *método dos pontos auxiliares* segundo a variante de EBERT (1945) "apud" FEITOSA (1978).

O controle de que dispunha com os poços-referência, entre os quais muitos possuíam perfilagem elétrica, permitiu àquele autor, prever um erro máximo da ordem de 20% na estimativa das medidas de profundidade do embasamento e das espessuras do conjunto Açu/Gangorra, admitindo porém a possibilidade de erros maiores, em função de condições locais das SEVs, tais como zonas estruturalmente baixas (fossas e depressões) que poderiam conter aí águas salgadas onde os erros tenderiam a provocar a superestimação daquelas medidas.

FIGURA 12 - Exemplos de sondagens elétricas na porção ocidental da Bacia Potiguar (FEITOSA, 1978)

A localização bem como alguns parâmetros de interesse obtidos na interpretação das medições geoelétricas efetuadas são apresentados na TABELA 1 (ANEXO B).

Quanto às espessuras máximas da Formação Jandaíra, a linha de interpretação adotada conduziu a uma tendência em superestimação sistemática das mesmas, da ordem de 10 a 40%.

A metodologia utilizada não permitiu também àquele autor, detectar eventuais reduções de espessura dessa formação devidas a movimentos tectônicos positivos seguidos de erosão, ou seja, como o limite superior atual dos calcários constitui uma ampla superfície de erosão, é possível que existam locais associados a altos estruturais, mesmo relativos, onde a espessura tenha sido consideravelmente reduzida por erosão.

Em termos de resultados obtidos no âmbito de toda a Bacia

Potiguar, segundo FEITOSA (1978), pode-se dizer que a interpretação das medições geoeletricas das sondagens BP permitiu o esboço geral da Bacia Potiguar, e a das medições geoeletricas efetuadas para o abastecimento de Macau e Pendências permitiu o mapeamento do "graben" de Pendências.

No mapa de isópacas da Formação Jandaíra (MAPA 5) são apresentadas as SEVs que se encontram dentro da área de estudo, algumas das quais utilizadas para o seu traçado.

b) *Sondagens elétricas verticais no extremo leste da Bacia Potiguar*

As sondagens elétricas verticais executadas nessa área são as relativas ao "Estudo Hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte", a cargo do IPT (1982). Nesta área os objetivos das SEVs estavam voltados para a determinação da profundidade do embasamento cristalino e para a possibilidade de caracterização de zonas condutoras em subsuperfície, que pudessem indicar zonas mais promissoras para a captação de água subterrânea.

As curvas de resistividades aparentes resultantes das sondagens elétricas foram interpretadas utilizando-se também o método de *pontos auxiliares*, e os modelos matemáticos obtidos foram comparados com os resultados de campanha anteriormente realizada pelo IPT em áreas de geologia semelhante. Para a interpretação final o modelo definitivo foi selecionado com base na análise conjunta das curvas de resistividades aparentes com a utilização do método das *aproximações sucessivas* através de seu programa de cálculos por computador. Foram considerados ainda os dados litológico-estratigráficos obtidos a partir de alguns poços tubulares utilizados para captação de água, existentes na área.

Na FIGURA 13 estão representadas as curvas de *resistividades aparentes* e as *colunas geoeletricas* obtidas a partir da interpretação dos diagramas elétricos, relativos à SEV-005 executada nas proximidades dos poços nº 901-18 e 19 e à SEV-016, executada nas proximidades dos poços 1055-29 e 30.

A metodologia adotada permitiu estabelecer os seguintes estratos geoeletricos na área das sondagens:

FIGURA 13 - Exemplos de sondagens elétricas verticais na porção oriental da Bacia Potiguar

- sedimentos superficiais;
- sedimentos cenozóicos e/ou mesozóicos, e
- rocha sã (embasamento cristalino)

Os resultados gerais, em termos de resistividade são sintetizados no QUADRO 9 a seguir.

Horizonte Geoeletrico	Resistividade elétrica verdadeira (ohm.m)	Seqüência estratigráfica	Espessura (m)
1	2 a 10 000	Sedimentos superficiais	2 a 56
2	105 a 930 (valores pouco frequentes: 1200 e 2800)	Sedimentos Cenozóicos e/ou Mesozóicos	
	11 a 91	a) nível resistente	8 a 127
		b) nível condutor	9 a 441
3	∞	Rocha sã (embasamento cristalino)	

QUADRO 9 - Características geoeletricas da seqüência estratigráfica do extremo oriente na Bacia Potiguar (IPT, 1981)

A ausência de sondagens mecânicas com descrição detalhada dos termos litológicos, aliada à pequena profundidade dos poucos poços existentes na área impediu uma classificação geológica mais precisa dos estratos geoeletricos, quer seja ao nível dos sedimentos superficiais, quer seja também dos sedimentos cenozóicos e/ou mesozóicos. Além desse fato, os denominados "sedimentos superficiais" quando secos possuem resistividades que variam em uma ampla faixa em função da sua posição topográfica. Esse estrato geoeletrico poderia estar englobando uma variada série de estratos geológicos distintos ou seja, coluviões, eluviões, solo de alteração, dunas, etc. Notou-se que os valores mais altos de resistividade nos sedimentos superficiais eram correspondentes às areias quartzosas das dunas que ocorrem logo após a linha de praia.

O estrato "sedimentos cenozóicos e/ou mesozóicos" foi genericamente assim designado apenas em função da correlação entre a resistividade e o suposto modelo estratigráfico da área conhecida até então. Os níveis resistentes deste estrato em geral apresentam resistividades consideradas extremamente altas para sedimentos saturados e possivelmente estejam refletindo variações litológicas.

Os níveis elétricos 115 ohm.m (SEV-005) e 860 ohm.m (SEV-016) foram definidos como calcários, com base nos valores de resistividade e principalmente pela correlação com dados litológicos de poços construídos nas proximidades (poço 901-18 e poços 1055-29 e 30, respectivamente); já os níveis de 1200 ohm.m (SEV-009) e 2800 ohm.m (SEV-017), foram definidos também como rochas calcárias, porém em função apenas dos valores de resistividades obtidos, uma vez que estão distantes de poços-referência, não se descartando, portanto a hipótese de serem correspondentes a pacotes de sedimentos arenosos com grande variação litológica.

De uma maneira geral os níveis condutores na coluna geoeletrica se localizam entre os níveis resistentes e a rocha sã (embasamento cristalino), tendo sido interpretados como correspondentes a sedimentos saturados com água doce, possivelmente sedimentos calcíferos apresentando uma pequena variação granulométrica. Porém, quando esses níveis estão localizados diretamente sobre o embasamento cristalino (SEV-005, cuja espessura de sedimentos atingiu até 411 m), deve-se considerar o fato de que à medida que se aumenta a profundidade de investigação, pequenas variações nas relações entre espessuras e resistividades (principalmente quando se tem uma faixa de variações relativamente pequena de resistividades), podem provocar a integração de uma ou mais camadas litológicas em um único estrato geoeletrico - *efeito de supressão de camadas*. Assim sendo, para esses níveis condutores, imediatamente superiores ao embasamento não se descarta a possibilidade de ocorrência de variações litológicas não detectadas pelas sondagens geofísicas.

O valor da resistividade (infinito) para o embasamento cristalino indica o alto contraste, em termos de resistividade, existente entre este estrato e os sedimentos que se sobrepõem a ele, isto é, os sedimentos, por apresentarem valores de re-

sistividade extremamente baixos, fazem com que o valor de resistividade do embasamento cristalino tenda para o infinito.

Ainda, como pode ser observado na SEV-005, no que diz respeito à profundidade do embasamento cristalino, a interpretação admite uma segunda hipótese, ou seja, um segundo modelo geoeletrico para o local estudado, devendo-se tal fato ao chamado *efeito de equivalência* em que muitas vezes, mesmo com a existência de um forte contraste de resistividade entre as camadas, a interpretação dos dados geofísicos pode apresentar duas ou mais soluções, isto é, os mesmos dados geofísicos podem admitir dois ou mais modelos geoeletricos de interpretação refletindo assim diferentes modelos geológicos para uma única situação geológica real.

As prospecções geofísicas de longo alcance, conquanto auxiliem na identificação dos estratos geológicos, podem apresentar resultados quantitativos portadores de erros, em áreas carentes de sondagens mecânicas de aferição, em que pese a utilização das mais poderosas técnicas de interpretação das medições geoeletricas. O traçado das isópacas do aquífero Jandaíra (MAPA 5) apresenta alguns locais onde na ocasião da execução das sondagens elétricas não havia poços tubulares e as espessuras se revelaram divergentes com as encontradas em perfurações executadas posteriormente naquelas áreas, como por exemplo a SEV nº 52.

6.3.2 Perfilagens Geofísicas

Prospecções Geofísicas em furos de sondagem no domínio da Formação Jandaíra têm sido freqüentemente utilizadas pela PETROBRÁS com o objetivo de identificar os limites dos estratos geológicos atravessados pelos furos. São comuns as diagrfias obtidas através da perfilagem térmica, perfilagem elétrica (polarização espontânea, métodos resistivos, etc), perfilagens radioisotópicas (gama natural, gama-gama e neutrônica) e perfilagem sônica. Nessas perfilagens as propriedades físicas dos calcários permitem facilmente a sua identificação; constituem-se dessa maneira em excelentes técnicas para o estabelecimento do topo e da base da Formação Jandaíra.

SANTOS et alii, (1981) efetuaram perfilagens térmicas em poços tubulares com o objetivo de utilizar as técnicas geotérmicas

cas na interação do regime geotermal com o regime hidrológico subterrâneo no Estado do Rio Grande do Norte. Tais técnicas permitiram a identificação de níveis de circulação de água e, no caso do aquífero Barreiras, a definição de zonas de recarga e dos intervalos convenientes à instalação dos filtros no interior dos furos para poços produtores de água da região de Natal.

A FIGURA 14 ilustra a identificação de anomalias térmicas positivas no aquífero Jandaíra, revelando a existência de movimentos de ascensão da água no interior do furo.

FIGURA 14 - Exemplo de perfilagem térmica em poços do aquífero Jandaíra (SANTOS et alii, 1983).

Esses autores, utilizando os dados de gradientes geotérmicos obtidos a partir dessas perfilagens e ainda de dados calculados a partir de medidas de fundo de poço (BHT) feitas pela PETROBRÁS, elaboraram o mapa de gradientes geotérmicos e o mapa

de tendência dos gradientes geotérmicos da Bacia Potiguar, que permitiram entre outras conclusões, reafirmar que o sentido do fluxo de águas subterrâneas se faz genericamente em direção ao mar.

6.3.3 Isótopos ambientais

Técnicas mais modernas de exploração como as isotópicas, também têm sido aplicadas em estudos visando à um melhor conhecimento dos recursos hídricos da Bacia Potiguar. Neste campo também os conhecimentos sobre o aquífero Jandaíra advêm, primeiramente de estudos regionais no nordeste e posteriormente de estudos mais restritos, no âmbito da Bacia Potiguar geralmente pelo interesse no aquífero Açu.

Entre as diversas aplicações das técnicas isotópicas úteis na exploração de aquíferos destaca-se a determinação dos isótopos ambientais: Deutério, Oxigênio-18 e Carbono-14 das suas águas, úteis na elucidação de processos de recarga e, de uma maneira geral, dos diversos aspectos do funcionamento hidráulico dos sistemas aquíferos.

A bibliografia técnica da Bacia Potiguar conta com alguns estudos de isótopos ambientais em águas subterrâneas os quais, devido principalmente ao pequeno número de determinações disponíveis, ainda não trazem resultados conclusivos sobre os diversos aspectos investigados.

O início das investigações hidrogeológicas utilizando práticas isotópicas no nordeste do Brasil foi marcado com os estudos realizados por uma missão de técnicos de Israel tendo sido estabelecido um programa de colaboração, sob a coordenação da Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN, através de seu Departamento de Pesquisas Científicas e Tecnológicas-DPCT, reunindo a SUDENE (PE), o Centro de Energia Nuclear na Agricultura -CENA (SP) e o Instituto de Pesquisas Radioativas-IPR (MG), visando à realização de estudos de viabilidade de utilização e de contribuição das técnicas de emprego dos isótopos naturais na busca de soluções de problemas hídricos típicos daquela região.

Em 1968, GAT et alii "apud" LEAL et alii (1974) apresentaram os primeiros resultados dos levantamentos básicos executados através daquele programa, em relatório (inédito) enviado à CNEN e à SUDENE.

Em 1969, MELO et alii "apud" SALATI et alii (1976) apresentaram os primeiros dados sobre composição isotópica de águas subterrâneas daquela região (também inédito), referentes aos estudos realizados pela mesma missão técnica.

Posteriormente, durante o Decênio Hidrológico Internacional foram obtidos, para a "International Atomic Energy Agency" IAEA, dados sobre a composição isotópica de águas pluviais de algumas localidades do Brasil.

Com base nesses estudos, SALATI et alii (1970) "apud" SALATI et alii (1976) apresentaram dados de concentração isotópica de O^{18} em águas subterrâneas do nordeste brasileiro, ressaltando o emprego das técnicas de isótopos ambientais como forma de auxiliar na solução de alguns problemas hídricos daquela região.

LEAL et alii (1974) apresentaram os resultados das análises de Trítio, Oxigênio-18 e Deutério em amostras de água coletadas pela SUDENE no que concerne a águas pluviais, superficiais e subterrâneas, de locais representativos da região nordestina.

SALATI et alii (1976), com o objetivo precípuo de correlacionar a taxa de evaporação com a salinidade das águas subterrâneas, analisaram as concentrações de D e O^{18} em águas de aquíferos do nordeste, concluindo que as variações encontradas indicam que tanto o D como o O^{18} poderiam ser utilizados, em alguns casos, como traçadores de águas subterrâneas. Apresentam ainda composições isotópicas de águas pluviais com o objetivo de obter informações sobre o mecanismo de recarga de aquíferos daquela região e correlacionar a taxa de evaporação com a salinidade das águas subterrâneas.

Dados isotópicos sobre Carbono 14, somente começaram a ser publicados em 1974, (SALATI et alii, 1974), para águas subterrâneas do aquífero Açú e águas do aquífero cristalino nas circunvizinhanças da Bacia Potiguar.

Estudos restritos à Bacia Potiguar porém somente foram realizados por MERCADO et alii (1976), objetivando avaliar o balanço hídrico das águas subterrâneas na bacia através da utilização conjunta de dados hidrológicos, hidroquímicos e isotópicos.

Mais recentemente foram feitos, através de um Programa de

Cooperação Técnica entre SIC/RN - IPT - IPEN - CENA (IPT, 1982) estudos isotópicos com determinações de D, O^{18} e C^{14} em águas subterrâneas, também com o objetivo de melhor conhecimento hidrogeológico da Bacia Potiguar e do aquífero Barreiras na região leste do Estado do Rio Grande do Norte. Os resultados dessas determinações foram apresentadas em cinco relatórios técnicos (inéditos) do Instituto de Pesquisas Energéticas-IPEN (1981).

Os dados levantados a partir dos documentos citados e que foram utilizados nesta monografia constam das TABELAS 2 e 3 (ANEXO B).

A análise de algumas relações entre isótopos são apresentadas nos itens que se seguem:

A) *Relação entre Deutério e Oxigênio-18*

a) *Águas pluviais*

A composição isotópica das águas de precipitação depende de muitos fatores, porém tendo em vista que o regime de precipitação em uma determinada região é determinado por uma série de fatores que conduzem, até certo ponto, a uma periodicidade, é lícito supor que dentro das oscilações estatísticas peculiares aos fenômenos meteorológicos, a água de precipitação de cada região possua uma concentração isotópica média característica de D e O^{18} .

A FIGURA 15 representa graficamente a correlação de δD e δO^{18} em águas de chuva no nordeste brasileiro.

Para as águas meteóricas do nordeste, os valores de δD e δO^{18} se encontram bem distribuídos ao longo de uma linha equacionada por SALATI et alii (1976) nos seguintes contextos:

- Águas meteóricas de todo o nordeste:

$$\delta D = 9,7 + 7,6 \delta O^{18} \text{ (coef. correl. de 91\%)}$$

Essa equação de regressão foi obtida em uma análise, em conjunto, das precipitações em diversas cidades do nordeste, às vezes localizadas nos mais distintos contextos climáticos. Como pode ser visto na FIGURA 15 existe uma grande dispersão dos pontos representativos das amostras. Segundo LEAL et alii (1974), aparentemente essa variação está associada às chuvas pouco in

FIGURA 15 - Relação entre δD e δO^{18} em águas meteóricas do nordeste brasileiro (SALATI et alii, 1976)

tensas que permitem uma evaporação apreciável da água durante a sua queda e também uma troca isotópica entre a água de chuva e o vapor d'água da atmosfera. Ainda segundo esse autor, outras causas podem levar a essa dispersão, tais como chuvas de precipitação local ou de nuvens provenientes de águas que tenham sofrido evaporação intensa e mesmo dificuldades na coleta de amostras que, no caso de chuvas pouco intensas, haveria possibilidade de evaporação parcial da amostra.

Para as chuvas mais intensas esses efeitos parecem atenuados sendo bem menor a dispersão e, como essas chuvas são responsáveis pela parte mais significativa da recarga dos aquíferos, se constituem as mais importantes para os estudos hidrogeológicos.

- Águas meteóricas apenas das regiões sedimentares.

Para estas águas que reúnem portanto, amostras mais próximas do litoral, SALATI et alii, "ibidem", apresentam a seguinte relação.

$$\delta D = 10 + 7,7 \delta O^{18} \text{ (coef. de correlação de 96\%).}$$

Essas equações são semelhantes, podendo-se agrupar as águas meteóricas dessa região em um só conjunto; porém segundo aqueles autores, é provável que uma amostragem sistemática leve a uma variação entre a representação das chuvas litorâneas onde geralmente a precipitação é da ordem de 1700 mm/a, e a região do interior, onde a precipitação pode ser menor do que 400 mm/a e que apresentam maior variabilidade de concentrações.

Determinando a correlação entre as concentrações de D e O^{18} de um grande número de amostras, CRAIG (1961) "apud" SALATI et alii (1976) obteve a seguinte relação para as águas meteóricas:

$$\delta D = 10 + 8,0 \delta O^{18}$$

Ainda, segundo DANSGAARD (1964) "apud" SALATI et alii (1976) os coeficientes linear e angular dessa equação variam com as condições de clima da região.

Pode-se notar então que as equações encontradas para as águas pluviais do nordeste estão bastante próximas da equação de CRAIG.

Se nenhum fator provocar modificações na composição isotópica da água pluvial durante o processo de infiltração no solo, a composição isotópica da água subterrânea deverá ser a mesma da água de precipitação que a originou e que, nestas condições, deveria apresentar uma composição isotópica correspondente à média ponderada das concentrações isotópicas da precipitação, em função dos volumes precipitados. Diversos fatores porém podem determinar modificações na composição isotópica das águas subterrâneas, entre os quais a evaporação se destaca como o mais importante, e que está presente desde o instante da precipitação e durante a infiltração, até que o deslocamento se dê a profundidades nas quais o seu efeito seja desprezível.

Durante os processos de evaporação subseqüentes às precipitações haverá um enriquecimento diferencial entre D e O^{18} , o que pode ser verificado pelo coeficiente angular das equações representativas das amostras de corpos de água submetidos à evaporação que deverão portanto apresentar valores menores do que da equação de CRAIG ($\approx 8,0$).

b) Águas superficiais

Segundo LEAL et alii (1974), as águas superficiais, do nordeste, tanto as de rios após o período de cheias, como as de reservatórios artificiais (açudes), se apresentam muito enriquecidas em D e O^{18} , devido à evaporação intensa naquela região.

A FIGURA 16 a seguir representa a correlação de alguns da dos de δD e δO^{18} de rios do nordeste brasileiro, contidos na TABELA 2b (ANEXO B).

FIGURA 16 - Relação entre δD e δO^{18} em águas fluviais do Nordeste.

SANTIAGO (1972) "apud" LEAL et alii (1974) através de estudo sistemático em um açude do Estado do Ceará demonstrou que a relação entre δD e δO^{18} para as suas águas submetidas à evaporação é a seguinte:

$$\delta D = 0,4 + 4,9 \quad \delta O^{18}$$

c) Águas de aquíferos da Bacia Potiguar

A FIGURA 17 apresenta graficamente a correlação das concentrações de δD e δO^{18} nas águas subterrâneas dos aquíferos Barreiras, Jandaíra e Açu e também nas águas de chuvas na Bacia Potiguar ou em áreas litorâneas próximas à mesma (TABELAS 2a e 3a, b e c, ANEXO B).

As águas de chuva na área litorânea parecem ser relativamente mais ricas em isótopos estáveis, comparativamente às águas

FIGURA 17 - Relação entre δD e δO^{18} em águas subterrâneas dos aquífe_ ros Jandaíra e Açu.

subterrâneas dos aquíferos Jandaíra e Açu. Esse fato, segundo MERCADO et alii (1976) leva a supor que as chuvas do litoral são distintas das chuvas das áreas de recarga desses aquíferos no que diz respeito à sua composição isotópica, cujas causas prováveis seriam as diferenças existentes entre as características das chuvas no que diz respeito à intensidade e distribuição espacial e temporal.

Embora na FIGURA 17 estejam plotados os pontos relativos ao aquífero Barreiras, este não foi considerado nos cálculos de regressão por estar representado por amostras coletadas em uma faixa litorânea bastante abrangente desse aquífero e sem amostragem dentro da área da Bacia Potiguar. Assim, a equação representativa da relação entre δD e δO^{18} , para as águas subterrâneas dos aquíferos Jandaíra e Açu pode ser expressa:

$$\delta D = 0,55 + 5,6 \delta O^{18}$$

Como pode ser observado na FIGURA 17, existe um zoneamento nítido das águas dos diferentes aquíferos havendo um afastamento gradativo em relação às águas meteóricas, onde as águas do aquífero Barreiras apresentam as maiores concentrações de D e O^{18} , seguindo-se as do aquífero Jandaíra e do Açu.

Pode-se notar também o agrupamento distal ($-5\text{‰} < \delta O^{18} < -4\text{‰}$ e $25\text{‰} < \delta D < 30\text{‰}$) do conjunto de poços do aquífero Açu confinado e que reúne as águas mais antigas ou seja teor de $C^{14} < 13\text{‰}$ mod.

Os poços 896-122, 899-56 e 974-41, aparentemente deslocados para o interior da área de domínio do aquífero Açu, são ambos representantes de captação mista, nos aquíferos Jandaíra/Açu.

Entre os poços tidos como do aquífero Jandaíra e representados nas proximidades dos poços do aquífero Açu, deve-se observar que os de número 896-4 e 897-44, embora estejam em área onde as cargas hidráulicas do aquífero Açu são superiores às do aquífero Jandaíra, podendo-se portanto prever mistura por aporte de águas do aquífero Açu por drenança vertical ascendente, são, no entanto, de pequena profundidade (80 e 92 m, respectivamente) e se localizam em áreas de aluviões do rio Apodi-Mos

sorô. Assim sendo, é lícito supor também a influência das águas contidas nesses aluviões, à semelhança dos poços de Upanema que estão no mesmo contexto, uma vez que se distribuem na mesma área destes.

É interessante notar que alguns poços, tais como 974-7 e 974-34 em Upanema, mesmo pertencendo ao aquífero Açu livre, não apresentam semelhança com as águas do aquífero Jandaíra na sua composição isotópica, como se poderia esperar por estarem contidos no mesmo contexto climático, ao passo que os poços da cidade de Açu (poço 975-26, s/nº e 46) apresentam composição isotópica próxima das águas meteóricas relativas aos meses de março e abril/70 na mesma cidade de Açu. Esse fato, aliado ao paralelismo das curvas pluviométricas em estações da Bacia, representados parcialmente na FIGURA 43 (item 8.2-d), leva a supor que embora possa haver diferença nas concentrações isotópicas das chuvas, deve haver diferença nas águas de realimentação do aquífero Açu nas suas diferentes áreas de recarga, onde ora esta seria feita diretamente por águas meteóricas, ora por águas fluviais vindas de sobre as rochas cristalinas situadas a sul, portanto com uma composição isotópica atípica para aquela região.

Na FIGURA 18 estão representados esquematicamente a equação da relação δD e δO^{18} para as águas meteóricas, segundo CRAIG, águas meteóricas do nordeste, águas subterrâneas da Bacia Potiguar (aquíferos Jandaíra e Açu) e das águas subterrâneas do cristalino do nordeste.

Comparando-se as equações representativas das águas do cristalino com a das águas da Bacia Potiguar, observa-se através do coeficiente angular da reta (Equações 2 e 4, FIGURA 18) que as mesmas sofreram evaporação antes de aportar no aquífero. O processo de evaporação teria sido porém mais intenso nas águas dos sedimentos comparativamente às águas do cristalino evidenciando portanto uma dinâmica diferente no processo de recarga.

SALATI et alii (1976) tendo encontrado a equação $\delta D = 10 + 7,7\delta O^{18}$ para as Bacias sedimentares do nordeste, concluíram que as águas pareciam não ter sofrido processo de evaporação antes da recarga e nem após a mesma, observando porém que tal conclusão era contraditória com o valor estimado, em mais de 90%, para os volumes evaporados após a precipitação. A equação ora encontrada

FIGURA 18 - Representação da relação δD e δO^{18} em águas meteóricas, superficiais e subterrâneas do nordeste brasileiro e meteóricas segundo CRAIG.

(Equação 2 FIGURA 18) demonstra realmente não haver a contradição suspeitada pois evidencia uma forte evaporação das águas antes de participarem das reservas desses aquíferos. A discrepância dos coeficientes encontrados talvez seja devida ao reduzido número de dados utilizados naquela ocasião.

B) Idade das águas do aquífero Jandaíra

A determinação da idade das águas subterrâneas representa também um importante aspecto para a elaboração de planos de aproveitamento desses recursos, uma vez que as datações permitem a avaliação da velocidade de circulação das águas no aquífero e do coeficiente de realimentação dos mesmos.

Até o presente momento não se dispõe de dados de Carbono-14 de águas do aquífero Jandaíra. Segundo MERCADO et alii (1976) as águas do aquífero Jandaíra parecem ser modernas, de acordo com seus teores de Trítio significativos.

7 O AQUÍFERO JANDAÍRA

7.1 Características Dimensionais

Espessura: o aquífero Jandaíra se instala na porção superior da seqüência carbonática da Formação Jandaíra que apresenta grande variação litológica, tanto vertical como horizontal. O aquífero se apresenta, de uma maneira geral, como uma camada sub-horizontal com espessuras variando de 50 a 250 m. A espessura máxima de 250 m aqui admitida, se refere à camada aquífera e não à espessura da unidade litoestratigráfica de mesmo nome. Admitiu-se a espessura de 250 m pelo fato de que as fraturas, cavernas e mesmo perdas de circulação descritas em relatórios de perfurações efetuadas na porção continental da bacia, são in-existent a profundidades superiores a 300 m, ou seja, na porção inferior da Formação Jandaíra que, em sua parte ocidental e central é constituída por calcários lajeados, superpostos por calcários conchíferos com intercalações de calcários compactos e na porção oriental, pela presença exclusiva dos calcários compactos.

Extensão: as rochas carbonáticas que constituem o aquífero Jandaíra abrangem uma superfície de $17\,756\text{ km}^2$, dos quais cerca de $15\,598\text{ km}^2$ estão no Estado do Rio Grande do Norte e apenas $2\,158\text{ km}^2$ no Estado do Ceará. Nesse domínio estão incluídas as áreas de cobertura dos sedimentos terciários do Grupo Barreiras, e quaternários dos aluviões e dunas, que abrangem cerca de $5\,980\text{ km}^2$.

O limite leste de ocorrência da Formação Jandaíra como aquífero é desconhecido e, de uma maneira aproximativa, a leste de uma linha que une as cidades de Pureza e Touros, se observa um aumento significativo da espessura do aquífero Barreiras a ele sobreposto, que permite antever supremacia quase absoluta desse aquífero, relativamente ao aquífero Jandaíra. Tais fatos, aliados ao desconhecimento geológico-estrutural da área a leste dessa linha até o presente momento, levou à desconsideração da Formação Jandaíra como aquífero nessa área. Desse modo, para efeito de cálculos futuros, a superfície de domínio do aquífero Jandaíra aqui considerada é de $16\,278\text{ km}^2$, correspondentes à área da Formação Jandaíra a oeste dessa linha, inclusive as por

ções recobertas pelos sedimentos terciários e quaternários.

Limites: o aquífero Jandaíra é limitado na base por uma camada pouco permeável constituída por arenitos e siltitos argilosos, argilitos, folhelhos, margas, calcarenitos e calcários compactos, pertencentes à porção superior da Formação Açu e à porção inferior da Formação Jandaíra. O comportamento hidráulico dessa camada, é responsável pela interconexão entre esses aquíferos (FIGURA 30, item 7.5.2).

As seções hidrogeológicas apresentadas no ANEXO D evidenciam as relações de fronteira do aquífero Jandaíra.

Com um páleo-relevo bastante irregular, evidenciado através de perfis litológicos de poços, a Formação Jandaíra, junto à costa norte, é recoberta por uma faixa de sedimentos terciários, associados a sedimentos quaternários, que se apresenta com largura e espessura bastante variáveis (MAPA 11). A maior largura dessa faixa é encontrada na área da Serra do Carmo e do Mel, com cerca de 45 km, e a menor, a norte da cidade de Pedra Grande, com 4 km.

Há evidências de que em algumas áreas existem sedimentos de mais de uma formação do terciário e não somente do Grupo Barreiras, porém, na ausência, até o momento, de separação entre as mesmas, no mapa de contorno estrutural desses sedimentos (MAPA 11) e no de isópacas (MAPA 12), estes foram referidos simplesmente como *sedimentos de cobertura* da Formação Jandaíra.

Embora esses sedimentos apresentem espessuras pouco expressivas na porção oeste e central da bacia (as maiores espessuras do grupo Barreiras estão na porção leste, portanto fora do domínio, considerado), podem no entanto, em algumas áreas, associados aos sedimentos aluvionares e dunares, se constituir em pacotes mais espessos onde se instala secundariamente o sistema aquífero denominado Dunas-Barreiras (MANOEL FILHO, 1971).

O sistema aquífero Dunas-Barreiras é limitado na base por uma camada pouco permeável que o separa do aquífero Jandaíra, conferindo a este, caráter de semiconfinamento nessas áreas (item 7.2). Tal sistema também se constitui em discreta fonte de recarga do aquífero Jandaíra, influenciando ainda na caracterização e distribuição espacial dos componentes químicos e parâmetros físico-químicos das suas águas (item 8.4).

Apesar da área dos sedimentos de cobertura ser de 5 980 km² a superfície do sistema aquífero Dunas-Barreiras com cargas superiores às do aquífero Jandaíra é de aproximadamente 2 033 km². Assim dimensionado, em 14 245 km² o aquífero Jandaíra foi considerado hidráulicamente livre.

7.2 Características das camadas semi-confinantes

a) Camada Semi-confinante da Base do Aquífero Jandaíra

O aquitardo da base do aquífero Jandaíra é constituído por diferentes litologias, correspondentes à base da Formação Jandaíra e ao topo da Formação Açu e que, em geral, da base para o topo são representadas por argilas arenosas, argilas silteosas, argilitos, folhelhos, margas, calcarenitos e calcários compactos, com eventuais intercalações de lentes arenosas a diferentes níveis.

Esse aquitardo funciona hidráulicamente como camada semi-confinante do topo do aquífero Açu, e dependentemente das diferenças de cargas hidráulicas entre este e o Jandaíra, é responsável pela entrada, por drenança vertical ascendente, ou saída por drenança vertical descendente de água deste último (item 7.7). Sua espessura máxima é da ordem de 800 m, na parte central da Bacia (IPT, 1982).

Pela inexistência de valores calculados de permeabilidade, com base na sua composição litológica e por comparação com litologias semelhantes, o IPT, "ibidem", admitiu para este aquitardo, uma permeabilidade da ordem de $4,2 \times 10^{-7}$ m/h. Esse valor de permeabilidade, que representa também a que melhor ajuste proporcionou quando da simulação do modelo hidráulico do aquífero Açu efetuado por aquele Instituto, foi aqui utilizada para os cálculos do balanço hídrico do aquífero (item 7.7).

b) Camada Semi-confinante do topo do Aquífero Jandaíra

Como exposto anteriormente, (item 7.1) apenas uma pequena porção da Formação Jandaíra na sua faixa litorânea, é recoberta pelos sedimentos terciários do Grupo Barreiras (?) e depósitos quaternários aluvionares e dunares. No MAPA 11 está representado o contorno estrutural da base da cobertura da Formação Jandaíra nessa faixa e no MAPA 12 as espessuras desses sedimentos.

A análise de perfis de poços localizados nessas áreas revela a presença de uma camada semi-permeável entre os calcários Jandaíra e os sedimentos de cobertura, constituída por leitos predominantemente argilosos e às vezes margosos, com espessura variando desde 6 até 52 m, tendo-se admitido, para efeito de cálculos envolvidos no balanço hídrico do aquífero Jandaíra, (item 7.7) uma espessura média da ordem de 15 m. Tal camada, pode ser correspondente à porção basal da Formação Serra do Martins do Grupo Barreiras, ou mesmo representar o resultado final da decomposição da capa dos calcários Jandaíra, que teria originado então depósitos argilosos.

A observação conjunta do mapa piezométrico do aquífero Jandaíra (MAPA 14) e do mapa que contém a cota do nível d'água de poços e cacimbas localizados no sistema Dunas-Barreiras (MAPA 15) permitiu verificar que este último apresenta cargas hidráulicas superiores às do aquífero Jandaíra, em média da ordem de 5 m. Ao que tudo indica, esses depósitos argilosos funcionam hidráulicamente como camada semiconfinante do topo do aquífero Jandaíra nas áreas onde o mesmo se encontra recoberto pelos sedimentos terciários e quaternários, o que permite a existência de cargas hidráulicas mais elevadas nesse sistema aquífero, responsável assim por uma parcela de água de alimentação do aquífero Jandaíra, por drenança vertical descendente (itens 7.5.3 e 7.7.6).

Face à falta de dados de permeabilidade dessa camada semiconfinante, para os cálculos do balanço hídrico do aquífero Jandaíra (item 7.7) em comparando-se com litologias semelhantes, admitiu-se o valor de $4,0 \times 10^{-7}$ m/h para a mesma.

7.3 Características hidrodinâmicas

A avaliação dos recursos hídricos subterrâneos de um aquífero não pode prescindir do conhecimento dos valores dos parâmetros hidrodinâmicos em toda a sua área de domínio, por permitirem a estimativa do seu potencial de armazenamento, de produção e dos volumes escoados. As características hidráulicas do aquífero Jandaíra obtidas e analisadas nesta monografia foram a vazão específica (Q/s) e a transmissividade (T).

Vazão específica

Dos 853 poços do aquífero Jandaíra cadastrados no Estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1982) 478 deles possuíam dados de vazão específica.

A FIGURA 19 apresenta o histograma de freqüência dos valores de vazão específica.

Como se pode notar os valores abrangem uma amplitude bastante grande, de 0,01 até 48,0 (m^3/h)/m, com média de 4,69 (m^3/h)/m. O desvio padrão de 7,88 é porém elevado, ultrapassando mesmo o valor da média.

A técnica exploratória do diagrama de juntas ("boxplot") (FIGURA 20) revela que 75% dos valores de vazão específica estão compreendidos no intervalo 0,01 até 6,20 (m^3/h)/m. Vazões entre 15,3 e 24,5 (m^3/h)/m são *valores externos* e os valores superiores a 24,5 (m^3/h)/m são *pontos soltos* e portanto de probabilidade baixa de ocorrência.

Na FIGURA 21 é apresentado o gráfico de distribuição de probabilidade lognormal da variação Q/s e na TABELA 4, ANEXO B as freqüências correspondentes, podendo-se verificar que a mediana é de 0,69, ou seja, 50% dos dados de vazão específica são inferiores a 0,69 (m^3/h)/m).

Na FIGURA 22 é ainda apresentado o gráfico de distribuição de probabilidade lognormal da variável Q/s em 9 intervalos de classes. Pode-se admitir a existência de praticamente 4 populações de vazões específicas: uma de baixos valores, duas de valores intermediários e uma de valores altos. Essas populações provavelmente estejam refletindo a composição litológica e o grau de carstificação dos maciços calcários nos locais dos poços.

A relação entre os valores de vazão específica e os de profundidade dos poços é apresentada na FIGURA 23 podendo-se notar, pelo baixo valor do coeficiente de determinação, que praticamente inexistente uma relação direta entre esses parâmetros, a menos de uma discreta tendência de redução de Q/s com o aprofundamento dos poços, evidenciando-se assim o caráter heterogêneo do aquífero.

Na FIGURA 24 estão representados os valores acumulados das médias das vazões específicas por intervalos de 10 m de profundidade, podendo-se notar então claramente que as maiores vazões específi

FIGURA 19 - Histograma de freqüências dos valores de vazões específicas.

variável= vazão específica

MIN = 0.01 JMIN = 0.08 MED = 0.69 MEDIA = 4.69 JSUP = 6.20 MAX = 48.00

```
*****
* ELEMENTO * PERCENTIL * VALOR *
*   VAZ.   *   90.0   *  14.40 *
*           *   95.0   *  20.00 *
*           *   97.5   *  28.80 *
*           *   99.0   *  38.60 *
*****
```

VALORES SUPERIORES AO PERCENTIL 90

N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR
023	15.00	080	18.00	110	24.00	111	18.00	114	19.32	121	20.00	132	30.00	133	30.00
135	26.00	144	14.40	143	24.00	155	30.00	137	24.00	142	15.43	153	45.00	200	14.60
002	20.00	004	16.00	027	26.00	254	43.00	260	18.75	279	14.81	280	18.75	290	20.00
293	16.90	294	18.00	005	33.60	135	23.00	136	46.00	147	15.00	156	28.80	163	21.16
167	16.00	184	28.80	193	20.40	003	20.00	008	40.10	023	17.00	060	15.60	099	20.00
092	21.40	083	22.00	084	24.00	103	34.00	151	16.30	168	14.40	169	16.00	088	24.00
103	34.38	108	38.00												

VALORES SUPERIORES AO PONTO EXTERNO

PONTO EXTERNO = 15.380 PONTO SULTO = 24.500

N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR	N.	VALOR
030	18.00	110	24.00	111	18.00	114	19.32	121	20.00	132	30.00	133	30.00	135	26.00
145	24.00	165	30.00	187	24.00	192	15.43	193	45.00	002	20.00	004	16.00	027	26.00
259	48.00	260	18.75	287	18.75	290	20.00	293	16.90	294	18.00	005	38.60	135	20.00
136	46.00	156	23.50	163	21.16	157	16.00	184	28.80	193	20.40	003	20.00	008	40.10
023	17.00	060	15.60	089	20.00	092	21.40	033	22.00	004	24.00	103	40.00	151	16.30
169	16.00	088	24.00	103	34.38	103	33.00								

FIGURA 20 - Diagrama de juntas ("boxplot") dos valores de vazão específica.

FIGURA 21 - Distribuição de probabilidade de lognormal dos valores de vazão específica.

Gráfico de probabilidade da variável=vazão específica

INTERVALO		FREQUENCIA ABSOLUTA	FREQUENCIA RELATIVA	FREQUENCIA ACUMULADA	FREQUENCIA AC. REVERSA	PORCENTAGEM PLOTADA
0.010 -	0.026	28	7.94979	7.94979	100.00000	99.58605
0.026 -	0.066	65	13.59352	21.54910	92.05020	92.03682
0.066 -	0.169	70	14.6435	36.19244	78.45187	78.43944
0.169 -	0.433	50	10.46025	46.65268	63.80753	63.79611
0.433 -	1.110	32	6.07456	53.34723	53.34727	53.33658
1.110 -	2.346	41	8.57740	61.92462	46.65271	46.64249
2.346 -	7.298	75	15.69037	77.61499	38.07530	38.06567
7.298 -	18.716	74	15.43117	93.09615	22.38493	22.37639
18.716 -	48.000	33	6.70576	99.99999	6.90376	6.89631

FIGURA 22 - Distribuição de probabilidade lognormal para 9 classes de valores de vazão específica.

cas se encontram em poços com profundidades entre 20 e 140 m. Os novos acréscimos a partir de 270 m talvez se devam ao reduzi do número de dados.

EQUACAO
Y=A+B*X

A =
116.599797474

B =
-1.3433024394

COEF.DE DETERMINACAO=
0.0567628624493

ERRO RESIDUAL=
1872.1761047

RESIDUAL ABS MAX=
185.460017162

No. PARES= 477

EIXO X= Q/s(m³/h)/m

EIXO Y= PROF.POCOS (m)

X MEDIO= 4.69

Y MEDIO= 110.30

FIGURA 23- Relação entre vazão específica e profundidade dos poços.

FIGURA 24 - Curva acumulativa das médias das vazões específicas em intervalos de 10 m de profundidade.

Foi analisada também a relação entre os valores de vazão específica e os de profundidade dos níveis d'água estáticos dos poços, representada na FIGURA 25 concluindo-se ainda por uma falta de correlação entre esses parâmetros, notando-se apenas uma leve tendência de redução de vazão específica com o aprofundamento dos níveis.

FIGURA 25- Relação entre vazão específica e profundidade dos níveis d'água.

O comportamento espacial dos valores de vazão específica é apresentado no MAPA 13. As isolinhas de vazão específica revelam bem o caráter heterogêneo do aquífero, evidenciando áreas contíguas com valores de vazão específica bastante discrepantes. Pode-se observar ainda que há uma estreita correlação entre os altos valores de vazão específica e a presença de falhamentos. Esse fato é explicado pelos processos genéticos de carstificação, uma vez que geralmente há uma associação entre ambas, em que as redes cársticas são escavadas sobre as discontinuidades dos maciços calcários.

Transmissividade

Com o objetivo de obter os valores de transmissividade do aquífero Jandaíra foram interpretados registros de ensaios de bombeamento ou de recuperação de nível executados pela CDM em 74 poços tubulares por ela construídos. Como em todos os ensaios as medidas de nível d'água foram tomadas no próprio poço durante o bombeamento ou durante a recuperação, somente foi possível a obtenção de valores de transmissividade (T) do aquífero, não tendo sido possível portanto a obtenção do coeficiente de restituição (S).

Entre os ensaios interpretados foram selecionados 7 deles, considerados representativos do aquífero, cujos perfis construtivos e litológicos, registros das medidas de nível durante os ensaios bem como os gráficos representativos dos rebaixamentos em função dos tempos são apresentados no ANEXO C.

A interpretação dos dados foi conduzida mediante a aplicação do método simplificado de Jacob, para os rebaixamentos e pelo método de Jacob-Theis, para a recuperação. Assim, os valores de transmissividades foram calculados através das seguintes equações:

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} \log t, \text{ para os rebaixamentos, ou então:}$$

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s'} \cdot \log t/t', \text{ para a recuperação, onde:}$$

$$T = \text{transmissividade (m}^2/\text{h)};$$

$$Q = \text{vazão de bombeamento (m}^3/\text{h)};$$

$$\Delta s = \text{rebaixamento do nível no intervalo de tempo considerado (m)};$$

$$\Delta s' = \text{rebaixamento residual no intervalo de tempo de recuperação considerado (m)};$$

$$t = \text{tempo decorrido desde o início do bombeamento (min) e,}$$

$$t' = \text{tempo decorrido durante a recuperação de nível (min).}$$

Na TABELA 5 (ANEXO B) são apresentados os valores de transmissividade (T) e de vazão específica (Q/s) dos poços ensaiados.

No histograma da FIGURA 26 estão representadas as frequências dos valores de transmissividade assim obtidos.

FIGURA 26 - Histograma de frequências de valores de transmissividade obtidos através de ensaios de bombeamento.

Com o objetivo de amenizar problemas decorrentes da escas sez e má distribuição dos dados de transmissividade, tentativa foi feita no sentido de completar o quadro desses valores, esta belecendo-se a relação entre a transmissividade (T) e a vazão específica (Q/s) disponíveis (FIGURA 28).

Obteve-se assim a relação entre a transmissividade e a va zão específica para poços do aquífero Jandaíra, expressa pela seguinte equação:

$$\log T = -0,37 + 1,14 \log Q/s$$

Essa relação foi aplicada aos 404 poços restantes que pos suíam somente valores de Q/s, permitindo a construção do histo grama da FIGURA 27.

FIGURA 27- Histograma de freqüências de valores de transmissivi dade obtidos através de ensaios e calculados através da relação T x Q/s.

Os valores característicos de vazão específica e de trans missividade assim obtidos são resumidos no QUADRO 10 a seguir.

EQUACAO
Y=A+B*X

A =
-0.369762560206

B =
1.14326241053

COEF.DE DETERMINACAO=
0.884624690503

ERRO RESIDUAL=
0.213411959127

RESIDUAL ABS MAX=
2.63233044003

No. PARES= 74
EIXO X= Q/s (m³/h)/m
EIXO Y= T (m²/h)
X MEDIO= -0.56
Y MEDIO= -1.01

FIGURA 28 - Relação entre transmissividade e vazão específica

A equação obtida foi utilizada também na avaliação dos volumes escoados pelos exutórios naturais do aquífero (item 7.7.2) e, devido ao grande número de poços com valores de Q/s e à sua distribuição regular foi possível se proceder a uma compartimentação bastante detalhada das frentes de descarga do aquífero.

Foram calculados ainda os valores de permeabilidade (K), porém de um modo bastante aproximativo, através da equação:

$$K = T/b, \text{ onde:}$$

K - permeabilidade (m/h);

T - transmissividade (m^2/h); e

b - espessura saturada do aquífero.

As espessuras saturadas nos locais dos poços ensaiadas foram estimadas a partir do mapa de isôpacas da Formação Jandaíra (MAPA 5) e da profundidade dos níveis estáticos dos poços. Os valores constam do QUADRO 10 a seguir.

Parâmetro	Valores			
	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
Vazão específica (m^3/h)/m	0,01	48,0	4,69	7,88
Transmissividade (m^2/h)	1×10^{-4}	78,5	3,15	6,84
Permeabilidade (m/h)	7×10^{-7}	1,3	$3,6 \times 10^{-2}$	-

QUADRO 10 - Parâmetros estatísticos de vazão específica, transmissividade e permeabilidade .

7.4 Escoamento Natural

a) As descontinuidades do meio aquífero

As estruturas geológicas presentes nos maciços calcários desempenham papel duplo na hidrologia cárstica uma vez que de las depende a maior ou menor ação dos mecanismos de carstificação e também porque influenciam na dimensão das redes dos sistemas cársticos. Assim, as descontinuidades lineares presentes na Formação Jandaíra, tais como as falhas e as diaclases identificadas em superfície (item 5.3.6), juntamente com o relevo, se im põem sobre o comportamento hidráulico do aquífero Jandaíra, tan to através de suas direções e comprimentos como também através de suas frequências e densidades.

Além das descontinuidades lineares, os calcários da Formação Jandaíra apresentam indícios de carstificação cuja frequên cia está relacionada também com a sua composição litológica.

Todas as rochas calcárias cujo teor em CaCO_3 é superior a 70% são susceptíveis a fenômenos de carstificação. A maioria das grandes redes cársticas porém se desenvolve em formações cujo teor em CaCO_3 está próximo de 99%. (THÉRON, 1973). Teores elevados em componentes insolúveis são, entretanto, um freio ao desenvolvimento de redes cársticas; assim é que os mais inten sos processos de carstificação da Formação Jandaíra são encontrados nas áreas de calcários e dolomitos puros (MENOR et alii., 1980), estando ausentes na zona central da Bacia onde esses au tores encontraram elevados valores de R.I. (Resíduo Insolúvel), refletindo maiores contribuições de componentes terrígenos du rante a sedimentação dos calcários Jandaíra.

Formas exocársticas como as dolinas, são encontradas em qua se todo o domínio dos calcários, mesmo onde estes são cober tos pelos sedimentos do Grupo Barreiras; lapiaz estão presentes em toda a Chapada do Apodi, sendo conspícuas porém em Maxixe, à cerca de 50 km a oeste de Mossorô. Formas exocársticas como fur nas, cavernas e sumidouros são encontradas em várias localidades sendo porém notórias em Soledade, no município de Apodi, em Mo rorô, à 10 km a oeste de Pedra Grande, e também em Maxixe (MAPA 1).

Nos exutórios do aquífero junto ao mar deve haver intensifi cação dos processos de carstificação pelo aumento da agressividade das águas nas zonas de misturas destas com a água marinha. (THRAILKILL, 1968).

b) *Sistemas de fluxo*

Consideradas as descontinuidades lineares (item 5.3.6), as evidências de carstificação, a grande variação espacial da constituição litológica dos calcários Jandaíra (item 5.3.6) e ainda os valores de vazão específica e de transmissividade desses calcários (item 7.3), pode-se concluir que o meio aquífero, quando analisado a nível de detalhe, se apresenta heterogêneo e hidráulicamente anisotrópico, promovendo circulação tipicamente cárstica no seu interior, ou seja, um meio descontínuo com a circulação de água se processando essencialmente através de fendas e canais, além de que muitas vezes parte do fluxo se processa através das camadas arenosas presentes no interior da sequência carbonática. Quando analisado porém em sua extensão e volume regionais, como é o caso deste estudo (escala 1:500 000), pode-se-lhe atribuir constituição homogênea e comportamento isotrópico.

Como a Formação Jandaíra se comporta como um grande platô calcário de estrutura praticamente horizontal, o sistema de fissuração (diaclasamento) perpendicular às juntas, garante nesse caso, o aprofundamento das águas (movimento vertical descendente), enquanto que as juntas, permitindo o estabelecimento dos condutos horizontais de comunicação, garantem a circulação em direção aos exutórios (movimento horizontal), nas zonas mais profundas.

c) *Áreas preferenciais de recarga*

Observando-se o mapa piezométrico (MAPA 14) pode-se identificar várias áreas preferenciais de recarga do aquífero Jandaíra. Caracteristicamente livre, o aquífero apresenta em todas as áreas, coincidência entre os divisores de águas subterrâneas e superficiais, evidenciando dessa maneira, a influência do relevo sobre a sua superfície piezométrica. Essas áreas são a seguir, de oeste para leste, nominalmente identificadas e têm citadas as suas cargas hidráulicas máximas:

- a oeste do rio Apodi-Mossoró;
- área a leste de Baraúnas - 125 m;
- área de Maxixe - 132 m;
- área de Soledade - 107 m;

- entre os rios Apodi-Mossorô e Upanema-do Carmo:
  - . área de Sombras Grandes - 100 m.
- entre os rios Upanema-do Carmo e Piranhas-Açu:
  - . área Volta-Trapiã - 138 m.

Na porção oriental da bacia a área de recarga se dispõe nitidamente nas proximidades ao contacto entre as formações Jandaíra e Açu, de uma forma contínua, desde sudoeste de Jandaíra até norte de João Câmara, com os núcleos de maior carga hidráulica localizados nas seguintes áreas:

- entre os rios Mulungu e Tatu:
  - . área a sudoeste de Jandaíra - 203 m (carga hidráulica máxima do aquífero);
  - . área a sul de Queimadas - 179 m.
  - . Para o interior, no extremo nordeste, a oeste da Lagoa do Boqueirão.
  - . área a leste de Cruzamento - 77 m.

Comparando-se o mapa piezométrico (MAPA 14) com o mapa plani-altimétrico (MAPA 1) pode-se notar que as áreas preferenciais de recarga se instalam em áreas topograficamente elevadas tais como as áreas da Serra de Mossorô, Maxixe, região de Volta Trapiã e, na porção oriental da bacia, na chamada Serra Verde.

Da observação conjunta agora do mapa piezométrico e do mapa de frequências de descontinuidades (MAPA 9) nota-se estreita coincidência entre as zonas preferenciais de recarga e as áreas de maior frequência de fraturamento, principalmente na porção ocidental da bacia. O mesmo é observado no mapa de densidade de descontinuidades (MAPA 10).

d) *Direções de Fluxo*

Para a obtenção da geometria do fluxo subterrâneo no aquífero Jandaíra foram utilizados dados de poços cujas medidas de nível d'água foram tomadas durante o mês de janeiro de 1980 (IPT, 1982).

O mapa piezométrico elaborado (MAPA 14), revela uma tendência regional do fluxo subterrâneo de sul para norte, em direção ao oceano. Conforme já havia sido observado por hidrogeólogos da SUDENE (REBOUÇAS et alii, 1967), secundariamente o fluxo se faz em direção aos vales aluvionares dos principais rios (rio

Apodi-Mossoró, rio Upanema-do Carmo, rio Piranhas-Açu e rio Caubi-Mulungu-Amargoso). Esses vales, cuja influência diminui de oeste para leste, se constituem assim em verdadeiros drenos que aduzem as águas subterrâneas até ao oceano. Essa configuração faz coincidir então os interflúvios com os divisores de águas subterrâneas evidenciando-se como já exposto, a influência do relevo sobre o padrão regional de fluxo subterrâneo. Para leste do rio Açu os escoamentos se fazem quase que unicamente para norte, diretamente para o mar. A ausência de vales importantes inibe o surgimento de divisores nítidos, sendo apenas levemente perceptível a influência do vale do rio Mulungu-Amargoso.

Da observação conjunta do mapa de drenagem superficial (MAPA 2) com o mapa de freqüência de direções das descontinuidades (MAPA 6) pode-se notar que, com exceção da área situada a noroeste de Gov. Dix-Sept Rosado e da zona compreendida entre os rios Açu e Mulungu, a direção da drenagem superficial secundária é coincidente com a direção de maior freqüência das descontinuidades, refletindo assim a influência destas no estabelecimento das linhas de drenagem superficial e portanto na modelagem do relevo.

Comparando-se, por outro lado, o mapa piezométrico (MAPA 14) com o mapa de freqüência de direções das descontinuidades (MAPA 6) pode-se notar que há também uma coincidência genérica entre as direções de fluxo subterrâneo com as direções de maior freqüência de descontinuidades, fazendo exceção a esse comportamento, ainda a área situada a noroeste de Gov. Dix-Sept Rosado e a região entre os rios Açu e Mulungu. A discordância desta última região talvez seja devida à influência de intrusivas básicas da Formação Macau, com corpos de direção geral SE-NW.

Pela observação ainda do mapa piezométrico (MAPA 14), e dos mapas de direções médias (MAPA 7) e de comprimentos relativos das descontinuidades (MAPA 8) pode-se verificar a mesma correspondência geral entre as direções de fluxo subterrâneo e as direções médias e direções de maiores comprimentos das descontinuidades, a exceção das mesmas áreas encontradas nas comparações anteriores.

Fica notória dessa maneira, a estreita interrelação das descontinuidades e o comportamento do padrão de fluxo das águas

subterrâneas e superficiais no âmbito de domínio dos calcários da Formação Jandaíra.

Como se pode observar ainda pelo mapa piezométrico (MAPA 14), além do sentido preponderante do fluxo de sul para norte ou para os principais vales, interiorizando assim as águas no domínio do aquífero, parte substancial do fluxo se dirige para oeste, em direção ao vale do rio Jaguaribe e para leste, em direção à Lagoa do Boqueirão (região de Touros) e aos vales do rio Tatu e rio Maxaranguape (região de Pureza).

Poucos e curtos feixes de linhas de fluxo porém se fazem para sul, em direção ao contacto entre as formações Jandaíra e Açú, tal como ocorre na parte ocidental e central da Bacia, que levam águas em direção às cabeceiras do riacho da Barra, a noroeste de Apodi; em direção às cabeceiras do riacho da Baixa Grande, a noroeste de Upanema e ainda em direção às cabeceiras do rio Palheiro e Lagoa do Piatô, a noroeste de Açú. Esse fluxo é responsável pela manutenção de pequenas fontes e exudações, muito frequentes na base da "cuesta" calcária nessas áreas.

e) *Gradientes Hidráulicos*

Os gradientes hidráulicos são relativamente mais variáveis nas porções ocidental e central da Bacia do que na porção oriental. O valor máximo encontrado na porção ocidental é de $3,3 \times 10^{-2}$, observado no flanco norte do divisor de águas subterrâneas que passa por Baraúnas, e que separa as águas que fluem diretamente para o oceano das que o fazem, indiretamente, através do vale do rio Mossoró. Na porção central, o maior gradiente é de $2,7 \times 10^{-2}$, observado no flanco oeste do divisor de águas subterrâneas que separa as águas que fluem para o vale do rio do Carmo daquelas que o fazem para o vale do rio Açú.

Como exposto no item anterior, para leste do rio Açú as linhas de fluxo se dirigem diretamente para o oceano, nessas condições as equipotenciais são sensivelmente paralelas à costa. Aqui os gradientes se tornam mais regulares, sendo mais suaves entre os rios Açú e Mulungu, apresentando um valor máximo da ordem de $0,5 \times 10^{-2}$, tornando-se mais acentuados para leste, onde atingem o máximo de $7,7 \times 10^{-2}$ a sul da cidade de Jandaíra. Es

sa regularidade no paralelismo das equipotenciais e dos gradientes hidráulicos é novamente alterada a nordeste da área, na região de Cruzamento-Parazinho-Queimadas, por imposição do relevo, na denominada Serra dos Macacos (genericamente Serra Verde).

Profundidades dos níveis d'água

A FIGURA 29 apresenta o histograma de frequência das profundidades dos níveis d'água nos poços tubulares no período 1979/1980.

FIGURA 29 - Histograma de frequências de profundidades de níveis d'água estáticos nos poços.

Pode-se notar a grande variação das profundidades dos níveis, onde 75% dos valores estão compreendidos entre 0,0 e 45 m.

Refletindo as condições hidráulicas de aquífero livre, as profundidades dos níveis d'água estão em estreita relação com o relevo, onde os maiores valores são encontrados nas áreas preferenciais de recarga do aquífero: na região da Serra de Mosso rô, onde atinge 71 m no poço 897-282; região de Maxixe, com 40 m no poço 896-36; nas serras do Carmo e do Mel, onde atinge 170 m no poço 898-119 e na porção oriental da bacia, na região da serra da Macambira onde atinge 134 m no poço 899-14 e na Serra dos Macacos, com 138 m no poço 900-9.

Variação brusca a curta distância foi observada nas serras do Carmo e do Mel, de 90 m (3-4-75) no poço 898-120 (cota 200) para 173 m (21-1-75) e 170 m (12-8-80) no poço 898-119 (cota 185 m), distanciados de apenas 2,5 km. Embora as medidas tenham sido tomadas em épocas diferentes, considerada no entanto a relativa regularidade dos terrenos, podem estar evidenciando a existência de aquíferos suspensos.

Valores de profundidades do nível d'água observados por ocasião do cadastramento de poços "in situ" efetuado pelo IPT em março-abril/1979, quando comparados com os valores posteriormente medidos por ocasião da campanha de leituras de nível d'água nos poços da rede piezométrica estabelecida, em janeiro/1980 (IPT, 1982) revelaram, para a maioria dos poços da rede, variações nulas ou redução de nível até 3 m. Houve porém alguns poucos que apresentaram ascensão de nível, em média da ordem de 2 m e outros ainda redução de nível da mesma ordem de grandeza. Os resultados não são porém representativos devido ao grande intervalo de tempo decorrido entre as medições. Considerando-se ainda que as chuvas na região geralmente se iniciam no mês de dezembro, pode-se admitir que durante as últimas medições os níveis já estivessem influenciados pela recarga do aquífero.

g) Fontes

Em áreas bastante restritas, a superfície do nível d'água é interceptada pela superfície topográfica, dando origem às fontes do aquífero Jandaíra, tais como as representadas no MAPA 14. Essas fontes são mais freqüentes a sudoeste da cidade de Jandaíra, em área próxima à zona de recarga do aquífero, correspondente às porções mais baixas nos entornos da Serra Verde, nas cabeceiras dos riachos Olho d'água, da Mutuca, Tubibau e Baixa Branca (item 3.2).

Ainda no domínio dos calcários, há duas fontes pouco distantes entre si, localizadas no vale do riacho do Livramento, cerca de 15 km a sudeste de Gov. Dix-Sept Rosado. Outras fontes, embora estejam fora da área de afloramentos dos calcários Jandaíra, têm sua origem ligada a este aquífero, surgindo na zona

de contacto entre esses calcários e as formações adjacentes. A mais importante delas é a Fonte de Pureza, localizada na cidade do mesmo nome, no extremo leste da Bacia, já em área de cobertura dos calcários pelos sedimentos do Grupo Barreiras, que em área topograficamente deprimida exibem a fonte no topo dos calcários, junto ao contacto entre essas litologias. Fluindo com vazão bastante expressiva medida em 21-11-1972 como da ordem de $648 \text{ m}^3/\text{h}$ (MANOEL FILHO, 1972), essa fonte garante, a partir daí, a perenidade do rio Maxaranguape. Suas águas, que atualmente são utilizadas apenas para fins de recreação (balneário de Pureza), poderão, mediante planejamento adequado, se revestir de grande importância no abastecimento de água potável daquela região. Os resultados da análise química das águas da Fonte de Pureza são apresentados nas TABELAS 10 a 12 (ANEXO B).

No extremo oeste da Bacia, outra fonte bastante significativa é a denominada Olho d'água da Bica, localizada à cerca de 20 km a sudeste de Tabuleiro do Norte, no Estado do Ceará, que se instala junto ao contacto dos calcários Jandaíra com os sedimentos da Formação Açu.

Ainda como fonte de contacto, porém de menor expressão, temos a ocorrente na fazenda Buraco da Onça, localizada à cerca de 18 km ao sul de Gov. Dix-Sept Rosado. Essa fonte se instala junto à base da "cuesta" calcária, também no contacto dos calcários da Formação Jandaíra com sedimentos da Formação Açu, na cabeceira de um dos afluentes da margem direita do riacho Livramento anteriormente citado.

7.5 Interconexões Hidráulicas do Aquífero Jandaíra

7.5.1 Introdução

O aquífero Jandaíra apresenta conexão hidráulica de significativa importância com o aquífero Açu a ele sotoposto, em todo o seu domínio, e de menor importância, com o sistema aquífero Dunas-Barreiras a ele sobreposto, na sua faixa mais próxima do litoral.

O funcionamento hidráulico do aquífero Jandaíra está esquematicamente representado na FIGURA 30.

7.5.2 Interconexões hidráulicas entre os Aquíferos Jandaíra e Açu

Por comparação entre o mapa piezométrico do aquífero Jandaíra, livre, e do aquífero Açu, confinado, (IPT, 1982) foi possível executar o traçado da linha onde ocorre o equilíbrio entre as cargas hidráulicas desses dois aquíferos (MAPA 14).

A análise do MAPA 14 permite notar que a oeste do rio Mulungu, ou seja, na porção oeste e central da bacia, as cargas hidráulicas dos aquíferos Jandaíra e Açu, de maneira geral se equilibram nas vizinhanças da equipotencial de 30 metros, e que, para leste do rio Mulungu, a linha de equilíbrio desloca-se para sul, situando-se agora nas vizinhanças da equipotencial de 65 metros. Esta região corresponde a uma área topograficamente elevada, genericamente denominada Serra Verde (item 3.1), onde os dois aquíferos apresentam cargas hidráulicas relativamente altas quando comparadas às cargas das áreas vizinhas.

Para sul da linha de equilíbrio das cargas, o aquífero Jandaíra apresenta cargas hidráulicas superiores às do aquífero Açu e embora a camada semiconfinante da base do aquífero Jandaíra seja relativamente espessa e pouco permeável (item 7.2), a extensa área a sul da linha de equilíbrio — cerca de 7901 km^2 — é responsável pela transferência de considerável volume de água no sentido Jandaíra — Açu, por drenança vertical descendente (item 7.7.3). Contrariamente, na área a norte da linha de equilíbrio — 8.377 km^2 — o aquífero Jandaíra apresenta cargas hidráulicas inferiores às do aquífero Açu e então o fenômeno de drenança se inverte, ocorrendo agora fluxo ascendente, no senti

FIGURA 30 - Esquema do funcionamento hidráulico do aquífero Jandaíra

do Açú-Jandaíra (item 7.7.5).

7.5.3 Interconexões hidráulicas entre os aquíferos Jandaíra e Dunas-Barreiras

Observando-se ainda o mapa piezométrico do aquífero Jandaíra (MAPA 14) pode-se notar que a equipotencial de 10 m se situa em uma posição bastante recuada para o interior em relação à orla atlântica. Nota-se também que, com exceção da área da Serra do Carmo e Serra do Mel e do extremo leste da área, os sedimentos do Grupo Barreiras estão localizados a norte dessa equipotencial. A partir da análise conjunta do mapa piezométrico do aquífero Jandaíra (MAPA 14) e do mapa de cotas dos níveis d'água no sistema Dunas-Barreiras (MAPA 15), pôde-se delimitar as seguintes áreas onde as cargas hidráulicas do sistema aquífero Dunas-Barreiras são superiores às do aquífero Jandaíra: Icapuí (CE), Tibau (RN), serras do Carmo e do Mel (RN) e Serra do Mangue Seco-São Bento do Norte (RN).

Pode-se notar também, a partir da observação desses mapas, que com exceção da área das serras do Mel e do Carmo, as diferenças de carga hidráulica entre os aquíferos é, em média, de cerca de 5 m. Na área daquelas serras, os dados existentes, embora sejam poucos, revelam grande amplitude piezométrica nos sedimentos de cobertura, com cotas do nível d'água variando desde 2 até 110 m em uma curta distância de 2,5 km. Os perfis litológicos desses poços registram a existência de grande variação nas cotas do topo do calcário, (MAPA 11) levando a admitir a existência de aquíferos suspensos nessa área. Para efeito de cálculos porém, admitiu-se como hipótese simplificadora neste trabalho, a continuidade do sistema aquífero Dunas-Barreiras também na área das serras do Carmo e do Mel, com as cargas hidráulicas desse sistema aquífero em média 5 m mais elevadas que as do aquífero Jandaíra. Nestas condições é mister admitir que nessas áreas haja transferência de águas do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra, por drenança vertical descendente.

7.6 Posição da Interface Água doce/salgada

Na orla marinha da Bacia Potiguar as captações para abastecimento nas maiores cidades são feitas no aquífero Açu e nos povoados, no sistema aquífero Dunas-Barreiras que apesar de ter limitação de produção, fornece água de boa qualidade e tem atendido a demanda até o presente, além de ser de fácil acesso, relegando-se o aquífero Jandaíra a um plano secundário. Não se tem informação, portanto, do comportamento real da interface água doce/salgada do aquífero Jandaíra na zona litorânea sendo aqui feita apenas uma estimativa grosseira da sua profundidade.

Como base para os cálculos foi considerada a situação ocorrente no poço 899-169 na cidade de Galinhos, no litoral da porção central da bacia, com as características apresentadas a seguir.

a) Perfil litológico

(Cota da boca: $\approx$ 5 m)

- 0-12 - areia fina, mal selecionada, com biodetritos;
- 12-27 - calcilutito creme esbranquiçado;
- 27-105 - areia amarela-clara, mal selecionada, muito argilosa, com intercalações de argilitos; níveis conglomeráticos com seixos angulosos de quartzo, calcário e argilito.
- 105-117 - basalto vesicular, esverdeado, alterado;
- 117-487 - calcário creme claro, maciço, dolomítico, duro, subsidiariamente calcilutito branco a cinza esbranquiçado, duro;
- 487-765 - sedimentos da Formação Açu;
- 765 - rocha metamórfica.

b) Observações registradas durante a execução do furo.

Prof.	Evento
148 m	- perda parcial de circulação;
165 m	- perda total de circulação;
209 m	- perda total de circulação;
215 m	- perda parcial de circulação e início de jorrância;
230 m	- perda de circulação;
280 m	- alta salinidade das águas de jorro, pois $CE > 20\ 000\ \mu\text{mho/cm}$

- 361 m - vazões de jorrância de água salgada de $160 \text{ m}^3/\text{h}$ na maré baixa e de $210 \text{ m}^3/\text{h}$ na maré alta;
- 580 m - diminuição da salinidade das águas;
 CE = 5000 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ (diluição pela mistura de água do aquífero Açu)

Como foram descritos basaltos alterados no intervalo 105-117 m (Formação Macau), é provável que o aquífero Jandaíra esteja confinado, e portanto independente do sistema instalado nos sedimentos superiores (Formação Tibau (?), Grupo Barreiras (?)), aqui denominado sistema Dunas-Barreiras.

Admitindo-se os pressupostos de GHYBEN-HERZBERG, para que haja fluxo de água doce através da seção de contacto entre o aquífero e o mar, é necessário que nesse local a carga hidráulica das suas águas seja maior ou igual à carga hidráulica representada pela coluna de água marinha, ou seja:

$$(h_d + z) \cdot \gamma_d \geq z \cdot \gamma_s$$

onde: h_d - cota da água doce no ponto considerado, em relação ao nível do mar;

z - profundidade da interface no ponto considerado, em relação ao nível do mar;

γ_d - peso específico da água doce ($1,000 \text{ gf}/\text{cm}^3$)

γ_s - peso específico da água salgada (entre 1,020 até $1,030 \text{ gf}/\text{cm}^3$).

A expressão anterior pode também ser assim expressa:

$$h_d \geq z \frac{(\gamma_s - \gamma_d)}{\gamma_d}, \text{ e tomando } \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} = \beta, \text{ tem-se: } h_d \geq z \cdot \beta$$

β varia entre 0,020 e 0,030, sendo 0,025 o valor mais freqüente, e assim: $h_d \geq 0,025 \cdot z$

Como o poço em referência está junto ao mar e a Formação Jandaíra tem comportamento sub-horizontal, pode-se mesmo considerar que a profundidade do topo da camada aquífera encontrada no poço, em relação ao nível do mar (112 m), seja a mesma pro

fundidade, também em relação ao nível do mar, no ponto de contacto do seu topo com as águas do mar, e então:

$$h_d \geq 0,025 \times 112 \text{ m} \geq 2,8 \text{ m.}$$

Por outro lado, pela observação dos gradientes no mapa piezométrico (MAPA 14) e notando que no poço mais próximo do mar na área considerada (poço 899-169) o nível piezométrico é de 5 m, pode-se admitir, para o local considerado, uma carga hidráulica de 3,5 m. Nessas condições, a profundidade da interface água doce/salgada nesse local será:

$$z = h_d \div 0,025 = 3,5 \div 0,025 = 140 \text{ m.}$$

Haverá portanto uma pequena seção de descarga do aquífero junto ao mar, de cerca de 28 m.

As observações feitas durante a execução do furo do poço 899-169 parecem confirmar as estimativas, tanto pela jorrância de água salgada que se iniciou a partir de cerca de 209m, como também pelas freqüentes perdas de circulação de lama, numa faixa de profundidades que vai de 148 até cerca de 360 m denunciando a existência de fendas e canais de circulação que teriam sido desenvolvidos na zona de mistura das águas do aquífero com as do mar, pelo aumento da agressividade das mesmas na zona de mistura (THRAILKILL, 1968).

7.7 Balanço Hídrico do Aquífero Jandaíra

7.7.1 Introdução

O balanço hídrico corresponde à aplicação do princípio da conservação da massa (água) em um determinado sistema (aquífero), definida por algumas condições de contorno. Assim, num sistema com volume conhecido e durante um determinado período de tempo no qual se realiza o balanço, a diferença entre o volume total de água que entra (recarga) e o volume total de água que sai (descarga) do sistema deve ser igual à variação do volume de água de seu armazenamento.

O balanço hídrico é portanto um recurso útil por induzir a uma análise detalhada dos sistemas aquíferos, levando à obtenção da ordem de grandeza e importância relativa dos diferentes termos do balanço, permitindo assim o planejamento do uso racional do recurso. Não obstante, é preciso considerar que, dada a grande magnitude do sistema analisado e os tipos de variáveis envolvidas nas condições de contorno, as cifras que compõem o balanço não são exatas.

Os mecanismos de entrada e saída de águas no aquífero Jandaíra estão esquematizados na FIGURA 30, do item 7.5.1.

Admitindo-se que o aquífero Jandaíra esteja em equilíbrio hidrodinâmico ou seja, que durante um período de tempo bastante longo, não ocorram variações regionais do nível piezométrico, a menos das variações sazonais, então a vazão de escoamento anual médio é igual à alimentação anual média, e assim pode-se expressar esse equilíbrio através da seguinte igualdade:

$$Q_I + Q_D^{A/J} + Q_D^{B/J} = Q_{ES} + Q_D^{J/A} + Q_{BO}$$

onde temos:

1º Membro: Entradas (Recarga)

Q_I - volume anual de água que aporta no aquífero por infiltração das águas meteóricas através da superfície de exposição do mesmo (infiltração eficaz);

$Q_D^{A/J}$ - volume anual de água transferida do aquífero Açu para o aquífero Jandaíra por drenança vertical ascendente; e

$Q_{D}^{B/J}$ - volume anual de água transferida do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra, por drenança vertical descendente;

2º Membro: Saídas (Descarga)

Q_{ES} - volume anual de água que se escoia através das frentes naturais de descarga do aquífero;

$Q_{D}^{J/A}$ - volume anual de água transferida do aquífero Jandaíra para o aquífero Açu, por drenança vertical descendente; e

Q_{BO} - volume anual de água explotada do aquífero por bombeamento através de poços.

O cálculo dos volumes correspondentes a cada uma das parcelas da descarga e da recarga de água no aquífero são apresentados nos itens que se seguem.

7.7.2 Descarga pelos exutórios naturais do aquífero (Q_{ES})

Analisando-se os escoamentos naturais no aquífero Jandaíra a partir do mapa piezométrico (MAPA 14) pôde-se identificar as seguintes frentes de descarga:

- a norte - em direção à costa atlântica-norte da bacia;
- a oeste - em direção ao vale do rio Jaguaribe;
- a sul - em direção à zona de afloramento do aquífero Açu, tendo-se aqui considerado as seguintes áreas:
  - . cabeceiras do riacho da Barra (noroeste de Apodi);
  - . cabeceiras do riacho Baixa Grande (noroeste de Upanema);
  - . cabeceiras do rio Palheiro (região da Lagoa do Piató, a noroeste de Açu).
- a leste - em direção à área de dominância do aquífero Barreiras, onde se distinguem dois ramos:
  - . em direção à Lagoa do Boqueirão (região de Touros)
  - . em direção aos vales dos rios Tatu e Maxaranguape (região de Pureza).

As vazões de escoamento natural do aquífero Jandaíra junto a esses exutórios foram calculadas através da equação:

$$Q = T \cdot i \cdot l, \text{ onde:}$$

Q = vazão de escoamento natural (m^3/a);

T = transmissividade (m^2/h);

i = gradiente hidráulico da superfície piezométrica (adimensional);

l = largura da frente de escoamento na seção considerada (km).

Para a execução dos cálculos foram levantados os gradientes hidráulicos (i) e as larguras das frentes de escoamento a partir do mapa piezométrico (MAPA 14). As transmissividades médias (T) para cada seção, foram obtidas a partir do mapa de vazão específica (Q/s) (MAPA 13), através da relação entre ambas, conforme exposto no item 7.3. As vazões de descarga estimadas nas diferentes frentes são apresentadas na TABELA 6 a seguir.

TABELA 6 - Volumes anuais de água escoada pelos exutórios naturais do aquífero Jandaíra.

Exutórios	Vazão de descarga (Q_{ES}) ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
Costa atlântica norte	42,632
Rio Jaguaribe	2,308
Riacho da Barra	1,983
Riacho Baixa Grande	0,056
Rio Palheiro	0,412
Lagoa do Boqueirão	2,835
Rio Maxaranguape	2,164
TOTAL	52,390

7.7.3 Descarga por Drenança para o aquífero Açú ($Q_D^{J/A}$)

Desprezando-se o armazenamento que pode ocorrer na camada semipermeável da base do aquífero Jandaíra e considerando-se que

as superfícies piezométricas dos aquíferos Jandaíra e Açu representam um estágio, em regime estacionário, dos dois sistemas, pode-se calcular o volume de água que no período de um ano atravessa a camada semiconfinante nos dois sentidos.

Com esse objetivo foram determinadas as diferenças médias de carga hidráulica entre os dois aquíferos, e as espessuras médias da camada semiconfinante (IPT, 1982) em pequenos setores da área onde ocorre o fenômeno de drenança vertical descendente ou ascendente. O cálculo em cada setor foi efetuado através da equação de Darcy, assim expressa:

$$Q_D = K' \times \sum_{j=1}^n \frac{\Delta \bar{h}_j \times a_j}{\bar{b}'_j}$$

onde:

Q_D - vazão de drenança (m^3/h);

K' - condutividade hidráulica vertical da camada semi-confinante (m/h);

$\Delta \bar{h}_j$ - diferença média de cargas hidráulicas no setor j considerado (m);

a_j - área do setor j (m^2), e

$\bar{b}'_j$ - espessura média da camada semi-confinante no setor j (m)

Para facilitar o cálculo dos volumes transferidos anualmente do aquífero Jandaíra para o aquífero Açu por drenança vertical descendente, a área em que as cargas hidráulicas do aquífero Jandaíra são superiores às do aquífero Açu foi subdividida em seis setores. Pela aplicação da lei de Darcy em cada um desses setores e adotando-se $K = 4,2 \times 10^{-7} m/h$ (item 7.2) foram calculadas as vazões de drenança $Q_D^{J/A}$ apresentadas na TABELA 7 da página seguinte.

7.7.4 Descarga por exploração através de bombeamento de poços (Q_{BO})

O volume total explotado apenas por poços tubulares que captam água no aquífero Jandaíra, durante o ano de 1979, foi de $3,6 \times 10^6 m^3/a$ (item 9.6), tendo-se adotado então este valor para efeito de cálculos no balanço hídrico do aquífero ou seja:

$$Q_{BO} = 3,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$$

TABELA 7 - Volumes anuais de água drenada do aquífero Jandaíra para o aquífero Açu.

SETORES	Superf. (km ²)	$\bar{b}'$ (m)	$\Delta \bar{h}$ (m)	$Q_D^{J/A}$ ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
1 - a oeste de 37°00'	5515	300	37,1	2,509
2 - entre 37°00' - 36°30'	716	150	18,7	0,328
3 - entre 36°30' - 36°00'	828	100	32,1	0,977
4 - entre 36°00' - 35°30'	684	100	25,2	0,634
5 - entre Parazinho e Lagoa do Boqueirão	126	200	19,2	0,044
TOTAL				4,492

7.7.5 Recarga por drenança do aquífero Açu para o aquífero Jandaíra ($Q_D^{A/J}$)

Semelhantemente ao caso tratado no item 7.7.3, a área onde as cargas hidráulicas do aquífero Açu são superiores às do aquífero Jandaíra foi subdividida em cinco setores. Da mesma forma também foram calculadas as vazões de drenança apresentadas na TABELA 8 a seguir.

TABELA 8 - Volumes anuais de água drenada do Aquífero Açu para o aquífero Jandaíra.

SETORES	Superf. (km ²)	$\bar{b}'$ (m)	$\Delta \bar{h}$ (m)	$Q_D^{A/J}$ ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
1 - a oeste de 37°00'	3190	500	18,5	0,434
2 - entre 37°00' e 36°30'	1429	550	15,5	0,148
3 - entre 36°30' e 36°00'	1370	350	27,8	0,400
4 - entre 36°00' e 35°30'	954	300	24,4	0,285
5 - faixa costeira (além da equipotencial 10m do aquífero Jandaíra)	1434	650	15,0	0,122
TOTAL				1,389

7.7.6 Recarga por drenança do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra ($Q_D^{B/J}$)

O cálculo do volume de água transferido anualmente do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra foi feito com base nos elementos geométricos e hidráulicos anteriormente citados (itens 7.2 e 7.5.3), admitindo-se armazenamento nulo na camada semiconfinante do topo do aquífero Jandaíra, aplicando-se a equação de Darcy.

As espessuras da camada semiconfinante como visto, variam de 6 até 52 m tendo-se admitido, para efeito de cálculo, uma espessura média da ordem de 15 m. Devido às pequenas espessuras dos sedimentos de cobertura, considerou-se aqui apenas parte de sua área de domínio como constituindo o sistema aquífero Dunas-Barreiras onde foi possível identificar as áreas relacionadas no item 7.5.3 com cargas hidráulicas superiores às do aquífero Jandaíra. Dessa maneira foi estimada a vazão de drenança do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra, considerando-se os seguintes valores

$$K' = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/h}; \Delta \bar{h} = 5 \text{ m}; \bar{b}' = 15 \text{ m e } A = 2033 \text{ km}^2$$

A substituição dos valores acima na equação de Darcy fornece: $Q_D^{B/J} = 2,49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. A contribuição de cada área é ainda apresentada na TABELA 9 a seguir:

TABELA 9 - Volumes anuais de água drenada do sistema aquífero Dunas-Barreiras para o aquífero Jandaíra

ÁREAS	Superf. (km^2)	$\bar{b}'$ (m)	$\Delta \bar{h}$ (m)	$Q_D^{B/J}$ ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
Icapuí (CE)	278	15	5	0,341
Tibau (RN)	300	15	5	0,368
Serras do Mel e do Carmo (RN)	696	15	5	0,854
Mangue seco - São Bento do Norte (RN)	756	15	5	0,927
TOTAL				2,49

7.7.7 Recarga através da infiltração de águas pluviais (Q_I)

A superfície de domínio dos calcários aflorantes da Formação Jandaíra, correspondente portanto à área através da qual se processa a infiltração direta das águas de chuva, tem aproximadamente $10\,298\text{ km}^2$ (item 7.1).

A pluviometria média anual incidente sobre a área foi avaliada admitindo-se, três subáreas, dependentemente dos intervalos de precipitação média anual (item 4.2). Considerando-se a superfície de abrangência de cada subárea de exposição passível de infiltração e a pluviometria média anual em cada uma delas, foi calculado o volume anual de água de chuva precipitada em cada uma dessas áreas e apresentados no QUADRO 11 a seguir.

Subáreas	Domínio	Superfície (km^2)	Pluviometria anual média (mm/a)	Volume anual médio (Q_p) ($\times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$)
Oeste	Rio Jaguaribe até Hipólito	5689	650	3698
Central	Hipólito até Jandaíra	2912	525	1529
Leste	Jandaíra até a costa leste	1697	725	1230
TOTAL				6457

QUADRO 11- Pluviometria anual média na área de exposição dos calcários Jandaíra.

Considerando o equilíbrio anteriormente aventado (item 7.7.1) o volume médio anual de águas pluviais que aportam no aquífero Jandaíra, ou seja, a infiltração eficaz, pode ser então estimada através do balanço hídrico, considerando-se os volumes conhecidos de entrada e de saída do mesmo, ou seja:

$$Q_I = Q_{ES} + Q_D^{J/A} + Q_{BO} - (Q_D^{A/J} + Q_D^{B/J})$$

Assim sendo: $Q_I = 56,6 \times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$

Portanto a taxa de infiltração eficaz no aquífero Jandaíra (I_e) em termos percentuais será:

$$I_e = \frac{Q_I}{Q_p} = \frac{56,6 \times 10^6\text{ m}^3/\text{a}}{6\,457 \times 10^6\text{ m}^3/\text{a}} = 0,009, \text{ logo } I_e (\%) = 0,9\%$$

7.8 Avaliação das reservas do aquífero Jandaíra

7.8.1 Introdução

A avaliação quantitativa bem como a qualitativa das reservas de água do aquífero Jandaíra se revestem de extrema importância por permitir a estimativa dos recursos hídricos disponíveis e assim nortear os princípios de planejamento do aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos. O aspecto quantitativo das águas armazenadas no aquífero são a seguir analisados, calculando-se as reservas permanentes e reguladoras, bem como o aspecto da renovação das reservas do aquífero; aspectos qualitativos serão apresentados no item 8.

7.8.2 Reservas permanentes e reservas reguladoras

a) Reservas permanentes (Rp)

As reservas permanentes são definidas como sendo o volume de água armazenado nos terrenos, abaixo da superfície mínima de variação periódica dos níveis d'água, susceptível de ser restituído por gravidade (água de saturação), em aquífero livre, acrescido do volume de água acumulado sob pressão, quando confinado.

Para a estimativa das reservas permanentes do aquífero Jandaíra foram consideradas as suas características dimensionais e hidrodinâmicas, apresentadas nos itens 7.1 e 7.3. Na falta de dados que permitissem calcular a porosidade eficaz do aquífero, admitiu-se para efeito de cálculo, o mesmo valor apresentado por TODD (1965) para litologias semelhantes e adotado por MANOEL FILHO (1971), ou seja: $\mu = 5 \times 10^{-2}$

Considerando-se a inexistência de valores de coeficiente de armazenamento do aquífero Jandaíra em sua parte semiconfinada pelos sedimentos de cobertura, a sua relativa pequena área de semiconfinamento e ainda que a parcela de água armazenada sob pressão, no caso dos aquíferos confinados é muito reduzida quando comparada ao volume de água de saturação do aquífero quando livre, para a estimativa das reservas permanentes considerou-se o aquífero Jandaíra como sendo livre em toda a sua extensão.

Assim sendo, o volume das suas reservas é dado pela expressão:

$$R_p = A.h.\mu \quad \text{onde:}$$

R_p = reserva permanente, (m^3);

A = área da superfície livre das águas no aquífero: $16\,278\,km^2$

h = espessura média saturada: 150 m;

μ = porosidade eficaz: adotada como sendo 5×10^{-2} , e então:

$$R_p = 16.278\,km^2 \times 150\,m \times 0,05 = 122,085 \times 10^9 m^3, \text{ ou seja:}$$

$$R_p = 122 \times 10^9 m^3$$

b) Reservas reguladoras (R_r)

As reservas reguladoras, também denominadas *reservas periódicas*, correspondem ao volume de águas armazenado no aquífero na porção compreendida entre as duas posições extremas, máxima e mínima, da superfície dos níveis d'água do aquífero no decorrer de um ciclo hidrológico. São portanto correspondentes ao volume de água restituído para o meio físico exterior ao sistema aquífero através dos escoamentos junto aos seus exutórios naturais no decorrer do período considerado.

Em condições de equilíbrio as reservas reguladoras correspondem portanto à infiltração eficaz no aquífero e então:

$$R_r = 56,6 \times 10^6 m^3/a$$

7.8.3 Renovação das reservas do aquífero Jandaíra

Constantemente as reservas em água subterrânea de um sistema aquífero se renovam, compensando as perdas do sistema, tanto pelo aporte direto de águas pluviais de infiltração, como pelo aporte indireto, através da transferência de água, por drenança, a partir de outros aquíferos adjacentes.

O volume de águas de renovação, quando se considera o aquífero em equilíbrio hidrodinâmico, é igual ao volume de escoamento subterrâneo médio junto aos seus exutórios naturais (e portanto iguais às reservas periódicas médias ou ainda iguais à infiltração eficaz média).

a) *Coefficiente de realimentação (C_r)*

O coeficiente de realimentação de um aquífero expressa a parcela das suas reservas que é anualmente renovada, sendo portanto calculado através da relação entre a reserva reguladora média (ou o volume do escoamento subterrâneo médio ou ainda o volume de infiltração eficaz médio) e as reservas totais (R_t), que corresponde à soma das reservas permanente e periódica. Assim:

$$C_r = \frac{R_r}{R_t} = \frac{56,6 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{a}}{122,141 \times 10^9 \text{ m}^3} = 0,00046 \approx 5 \times 10^{-4} / \text{a}$$

então: C_r (%) $\approx$ 0,05% ao ano.

b) *Tempo de renovação (t_r)*

É o tempo que seria necessário para substituir a reserva total se ela fosse totalmente esgotada, considerando-se a renovação através do volume anualmente aportado ao aquífero. Em um aquífero em equilíbrio é portanto a relação entre a reserva total e o volume anual de infiltração eficaz (ou volume anual de escoamento subterrâneo junto aos exutórios naturais).

$$t_r = \frac{122,141 \times 10^9 \text{ m}^3}{56,6 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{a}} = 2158 \text{ a}$$

7.8.4 Recursos explotáveis do aquífero Jandaíra

Além do aspecto quantitativo das reservas, na avaliação dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis deve-se analisar também os aspectos de qualidade das águas armazenadas e das técnicas de exploração, além dos aspectos econômicos relativos aos custos de captação e legais no que diz respeito ao direito às águas. Abordaremos aqui apenas os aspectos quantitativos, aspectos qualitativos das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra serão apresentados no item 8, e algumas considerações referentes às técnicas e custos de captação são ainda apresentados nos itens 9 e 10, respectivamente.

Na avaliação dos recursos explotáveis de um aquífero admite-se um estado de equilíbrio hidráulico entre as vazões de entrada e de saída do sistema, e considerando-se o ciclo hidrológico

gico com sua parcela de recarga do aquífero, estará implícito que as águas subterrâneas constituem um recurso renovável. A determinação quantitativa desses recursos é complexa, uma vez que a exploração excessiva das águas de um aquífero provoca também resposta de aquíferos que estejam hidraulicamente a ele relacionados, até que um novo estado de equilíbrio seja atingido, o que pode alterar sensivelmente as condições de recarga e descarga nos seus exutórios naturais. Assim sendo, somente uma determinada quantidade de água subterrânea poderá ser explorada sem provocar perturbações indesejáveis nos sistemas aquíferos. Esse volume anual de água teoricamente explotável sem alterar a reserva permanente seria portanto correspondente à vazão anual média de escoamento natural nas frentes de descarga do aquífero (reserva reguladora ou infiltração eficaz).

Com base nos valores das reservas reguladoras e suas flutuações, nas reservas permanentes, nos dados técnicos e econômicos de projetos de captação e ainda nos dados de qualidade da água, torna-se possível então avaliar os recursos explotáveis de um aquífero.

Devemos considerar, por outro lado, que a extração de água de um aquífero qualquer provoca um aprofundamento da superfície de suas águas e, conseqüentemente, aumento dos gradientes hidráulicos. Tal rebaixamento induzirá, por conseguinte, maiores taxas de recarga e por este motivo se admite atualmente que se possa explorar, com critérios, além das reservas reguladoras, sem provocar esgotamento das reservas aquíferas. Deve-se considerar no entanto que estes recursos podem variar no espaço e no tempo em função das condições hidrogeológicas, dos efeitos das explorações sobre o regime de fluxo, da concepção e disposição das obras de captação, dos equipamentos para exploração, etc.

Do exposto depreende-se que a exploração dos recursos hídricos de um determinado aquífero deverá ser acompanhada por estudos hidrogeológicos para controle criterioso da evolução do comportamento dos mesmos, a par das técnicas de análise de sistemas que permitam a avaliação sistemática de todos os conjuntos intervenientes no aproveitamento racional das reservas.

No caso do aquífero Jandaíra, admitindo-se que as suas reservas possam ser utilizadas para quaisquer usos e que as técnicas

cas de captação permitam sempre o acesso a essas reservas, o volume anual teoricamente explotável sem alterar as reservas permanentes seria portanto correspondente ao volume anual médio da infiltração eficaz, ou seja: $56,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Deve-se considerar que, estando o aquífero Jandaíra em conexão hidráulica com o aquífero Açu e sendo este atualmente muito solicitado, é previsível uma alteração no comportamento das suas cargas hidráulicas que provocará variações nos volumes de drenança em ambos os sentidos. Assim sendo, e levando-se em conta as oscilações freqüentes nos volumes de recarga, circunstancialmente, como medida de segurança, adotando-se 75% daquele valor, teríamos:

$$R_{\text{expl.}} = 43 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$$

Nota-se assim que o volume atualmente explotado ($3,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, em 1979) representa somente 8,4% dos recursos explotáveis, como acima estimado.

8 HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO JANDAÍRA

8.1 Introdução

Os principais objetivos dos estudos hidroquímicos estabelecidos nesta monografia hidrogeológica foram a caracterização hidroquímica atual das águas do aquífero Jandaíra no que diz respeito aos teores médios dos constituintes químicos e valores médios dos parâmetros físico-químicos; conhecimento sobre a evolução da composição química da água subterrânea em seu movimento dentro do aquífero e a avaliação da adequação das suas águas para os diferentes usos básicos: doméstico, agrícola e industrial.

Para esses estudos foram utilizados essencialmente os dados de análise físico-químicas de águas de poços tubulares contidos nos seguintes documentos:

- Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste. Folha 10: Jaguaribe-NE. SUDENE, Hidrogeologia, 30 (MANOEL FILHO, 1971).
- Plano diretor dos recursos de solo e água no Vale do Apodi, Rio Grande do Norte. Relatório Final (DNOCS, 1978).
- Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1982).

Além dessas fontes, foram ainda levantados, diretamente junto à Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Rio Grande do Norte - CDM/RN, laudos de análises químicas de águas do aquífero Jandaíra, referentes ao período 1981/82.

Embora todos esses trabalhos apresentassem muitos dados de análise de água, grande parte delas não pôde ser aqui utilizada, principalmente pela dificuldade de correspondência entre os poços constantes dos inventários executados por essas entidades, devido às diferenças de informações registradas ou mesmo ausência de informes que poderiam permitir uma correspondência segura. Assim sendo, para evitar eventuais erros, no caso de correspondências duvidosas as análises não foram utilizadas. Foram recusadas ainda análises incompletas e também análises sobre as

quais persistiam dúvidas quanto ao aquífero captado. Foram utilizadas 242 análises conforme consta no QUADRO 12 a seguir, cujos dados são apresentados nas TABELAS 10 a 15 do ANEXO B.

Fonte	Tipo de Captação	Quant. de amostras
Manoel Filho (1971) (SUDENE)	Poços tubulares	1
DNOCS/Hidroservice (1978)	Poços tubulares	43
IPT/SIC-RN (1982)	Poços tubulares	150
	Fontes	02
	Água de chuva	03
CDM/RN (Cad. Compl.)	Poços tubulares	43
TOTAL		242

QUADRO 12 - Origem das amostras de água.

Para esta monografia foi utilizada a identificação de poços segundo o inventário do IPT por corresponder ao levantamento mais recente e para facilitar o acesso às informações. A TABELA 17, (ANEXO B), fornece a correlação entre os poços cadastrados pelas entidades referidas e que tiveram a análise de água incluída nesta monografia.

Após a seleção, os dados das análises químicas de água foram tratados por técnicas matemáticas e gráficas visando à caracterização hidroquímica do aquífero Jandaíra. Os resultados constantes nos laudos das análises foram inicialmente submetidos a um programa de computador a fim de que fosse verificada a consistência dos dados. O critério básico utilizado se fundamentou na avaliação dos erros das análises através do método do balanço iônico, tendo-se adotado os limites constantes em LOGAN (1965) para a aceitação de erros em análises. Nos casos em que os resultados dessas análises apresentavam erro excessivo de balanço, estas foram utilizadas somente após criteriosa avaliação do parâmetro de interesse, relativamente às outras amostras.

Foram elaborados diagramas, gráficos e mapas hidroquímicos, que através da sua interpretação, juntamente com as caracterís

ticas geológicas e hidráulicas do aquífero, forneceram subsídios à elaboração de hipótese de seu funcionamento hidráulico no que concerne às zonas de recarga e descarga naturais, interconexões hidráulicas, etc., tendo porém como maior objetivo, a caracterização hidroquímica das águas e a sua adequação aos diferentes usos.

8.2 Caracterização hidroquímica do aquífero Jandaíra

Com o objetivo de melhor caracterizar as águas do aquífero Jandaíra em seus aspectos químicos e físico-químicos, possibilitar a análise de seu comportamento hidrogeoquímico e ainda de constatar eventuais anomalias com os teores dos constituintes químicos e valores das propriedades físico-químicas analisadas, foram obtidos parâmetros estatísticos, tendo sido também elaborados diversos histogramas e análises de regressão.

a) Parâmetros estatísticos

O programa de computador aplicado proporcionou a determinação de parâmetros estatísticos básicos impressos no final de cada relação de dados, apresentados nas TABELAS 10 a 13, ANEXO B.

A síntese desses dados é apresentada na TABELA 18 a seguir. Para efeito de comparação foram colocados também os valores encontrados em amostras de águas de chuva coletadas em três cidades do Estado do Rio Grande do Norte: Natal, no litoral leste, Pau dos Ferros, no extremo sudoeste, e Mossoró, também na porção oeste, porém à cerca de 40 km da costa.

Para a determinação dos teores limites foi utilizado intervalo de confiança em 95%, calculado segundo a equação:

$$\text{Intervalo de Conf.} = \bar{x} \pm z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, \text{ onde:}$$

$\bar{x}$ = média das amostras;

$z_{\alpha/2}$ = valor dado pela tabela de *distribuição normal* para 95% de confiança;

s - desvio padrão da amostra e

n - número de observações.

Baseados então nos dados estatísticos apresentados, pode-

TABELA 18 - Composição química média das águas do aquífero Jandaíra, comparativamente às águas de chuvas.

PARÂMETROS CONSIDERADOS	ÁGUAS DOS POÇOS							ÁGUAS DE CHUVAS		
	Nº DE CSS	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIO	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CON- FIANÇA EM 95%		PAU DOS FERROS	MOSSORÓ	NATAL
pH	239	6.50	8.90	7.95	0.40	7.17	- 8.73	5,3	5,5	6,0
Condutividade elétrica ($\mu\text{mho/cm}$)	239	405.40	17 013.00	2 689.59	2 356.60	0.0	- 7 308.53	2,4	6,8	5,8
e TSD (mg/l)	239	270.27	11 342.00	1 793.06	1 571.07	0.0	- 4 872.36	-	-	-
Dureza total (mg/l de CaCO_3)	239	85.00	6 186.90	989.13	875.89	0.0	- 2 705.87	0,35	0,49	4,75
Alcalinidade total (mg/l de CaCO_3)	239	16.96	720.00	267.21	101.80	67.58	- 466.74	4,61	5,13	2,53
Sódio (mg/l de Na^+)	239	19.20	3 060.30	248.33	326.90	0.0	- 839.05	0,20	0,40	4,65
Potássio (mg/l de K^+)	239	0.91	124.00	15.18	16.00	0.0	- 46.54	0,10	0,05	0,96
Cálcio (mg/l de Ca^{+2})	239	7.00	1 315.20	193.97	185.55	0.0	- 562.84	0,12	0,01	0,97
Magnésio (mg/l de Mg^{+2})	239	11.0.	708.51	121.54	110.26	0.0	- 337.65	0,01	0,11	0,58
Ferro total (mg/l de Fe)	160	0.00	3.20	0.32	0.55	0.0	- 1.40	nihil	nihil	0,05
Fluoreto (mg/l de F^{-1})	98	0.00	3.00	0.47	0.64	0.0	- 1.72	-	-	-
Cloreto (mg/l de Cl^{-1})	239	27.87	7 043.40	712.14	963.30	0.0	- 2 600.21	<0,01	<0,01	8,98
Sulfato (mg/l de SO_4^{-2})	226	2.11	2 032.40	250.79	372.83	0.0	- 981.54	nihil	nihil	3,07
Bicarbonato (mg/l de HCO_3^{-1})	239	20.69	878.40	305.29	122.30	66,58	- 546.00	5,63	6,25	3,05
Carbonato (mg/l de CO_3^{-2})	238	0.00	87.88	9.83	14.45	0.0	- 38,15	zero	zero	-
Nitrato (mg/l de NO_3^{-1})	219	0.00	730.29	32.49	71.24	0.0	- 172.12	-	-	1,48
CO_2 dissolvido (mg/l de CO_2)	239	0.37	75.65	8.68	11.24	0.0	- 30.71	44,79	31,45	4,90

-se considerar, como aceitáveis para as águas do aquífero Jandaíra, os valores constantes da coluna "Intervalo de Confiança", da TABELA 18, os quais poderão ser tomados como padrão para efeito de considerações a respeito da caracterização e comparações das águas do aquífero Jandaíra. Assim alterações que promovam desvios do valor padrão deverão ser criteriosamente analisadas.

Para efeito de comparações são apresentados no QUADRO 13, parâmetros relativos aos aquíferos Açu e Barreiras que têm conexão hidráulica com o aquífero Jandaíra e ainda das águas subterrâneas das rochas cristalinas (item 7.5).

Propriedades e Constituintes	Aquíferos			
	Jandaíra	Açu	Barreiras	Cristalino
pH	7,95	7,9	6,87	7,8
CE	2689,5	1398,7	172,99	6,314
TSD	1793,06	932,4	115,33	4606,7
Dureza Total (mg/l CaCO_3)	989,1	323,3	43,20	1712,9
Alc.Total (mg/l CaCO_3)	267,21	166,2	41,53	297,9
Na (mg/l Na^+)	248,3	154,6	18,72	808,1
K (mg/l K^+)	15,1	16,7	4,33	50,2
Mg (mg/l Mg^{+2})	121,5	33,1	5,19	287,2
Ca (mg/l Ca^{+2})	198,9	74,9	8,76	217,6
Fe total (mg/l Fe)	0,32	0,4	0,39	2,84
F (mg/l F^{-1})	0,47	-	0,04	-
Cl (mg/l Cl^{-1})	712,14	288,2	25,87	2146,5
SO_4^{-2} (mg/l SO_4^{-2})	250,79	72,6	6,64	142,5
HCO_3^{-1} (mg/l HCO_3^{-1})	306,29	232,2	50,36	335,5
CO_3^{-2} (mg/l CO_3^{-2})	9,83	7	0,64	13,7
NO_3^{-1} (mg/l NO_3^{-1})	32,49	19,2	6,61	21,2
CO_2 (mg/l CO_2)	8,7	8,0	18,21	9,9

QUADRO 13 - Teores médios de constituintes químicos das águas dos aquíferos Jandaíra, Açu, Barreiras e Cristalino no Estado do Rio Grande do Norte (Fonte: IPT, 1982).

Adotando-se aqueles valores-padrão para o aquífero Jandaíra foi elaborada a TABELA 19 que apresenta a relação dos poços anômalos em relação a cada constituinte químico e parâmetro físico-químico analisado.

Pode-se notar que excetuando-se o pH, a maior frequência de amostras anômalas é encontrada para os fluoretos (10,2%), e a menor para os nitratos (4,1%). A partir dos dados da TABELA 19 foi elaborado ainda o QUADRO 14 que apresenta a frequência de parâmetros anômalos nas águas dos poços. Nota-se assim que das 239 amostras analisadas, 80 delas (33,4%) apresentam pelo menos um caráter anômalo dentre os pesquisados, a maioria

TABELA 19 - Poços anômalos em relação ao intervalo de confiança em 95%

PARÂMETRO CONSIDERADO	Nº de obs.	INTERVALO DE CONFIANÇA em 95%		IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS ANÔMALOS	FREQUÊNCIA DE AMOSTRAS ANÔMALAS	
					Quant.	%
pH	239	7,17	8,73	896-058-059-144; 897-105; 898-003-010-024; 974-021-031	9	3,8
Condutividade elétrica ($\mu\text{mho/cm}$) e TSD (mg/l)	239	0,0	7 308,53	824-014-022-023; 896-162; 897-015; 898-003-135-169-192; 899-070-089-119; 900-095	13	5,4
Dureza total (mg/l CaCO_3)	239	0,0	2 705,87	824-023; 898-003-135-162-169-192; 899-070-089-107-119	10	4,2
Alcalinidade total (mg/l CaCO_3)	239	67,68	466,74	824-022; 896-058-124; 897-050-060-082-134-245; 898-003-016; 899-089; 973-103	12	5,0
Sódio (mg/l de Na^{+1})	239	0,0	889,05	824-014-022; 897-015; 898-169; 899-070; 900-095	6	2,9
Potássio (mg/l de K^{+1})	239	0,0	46,54	824-019-023; 896-116-201; 897-050-058-079-245; 898-159-169; 899-070-089	12	5,0
Cálcio (mg/l de Ca^{+2})	239	0,0	562,84	824-012-022-023; 898-003-135-169-192; 899-070-089; 900-166	10	4,2
Magnésio (mg/l de Mg^{+2})	239	0,0	337,65	824-014-022; 896-162; 898-003-135-162-169-192; 899-070-089-102-107-119; 900-095	14	5,8
Ferro total (mg/l de Fe)	160	0,0	1,40	824-012; 896-019; 897-069-077-107-160; 899-033-077; 900-044	9	5,6
Fluoreto (mg/l de F^{-1})	98	0,0	1,72	896-012-064-065; 897-048-050-069-133-160; 898-114; 899-073	10	10,2
Cloreto (mg/l de Cl^{-1})	239	0,0	2 600,21	824-014-022-023; 896-162; 897-015; 898-003-135-169-192; 899-070-089; 900-095	12	5,0
Sulfato (mg/l de SO_4^{-2})	226	0,0	981,54	896-064-201; 897-050-052-058-245; 898-114-162-169-180-181; 900-166	12	5,0
Bicarbonato (mg/l de HCO_3^{-1})	239	66,58	546,00	824-022; 896-124; 897-050-060-082-134-160-245; 898-003-016; 899-089	11	4,6
Carbonato (mg/l de CO_3^{-2})	238	0,0	38,15	896-030-080-112-120-122-162-164; 897-107-109-113-192; 900-134; 973-065-103; 974-021	15	6,3
Nitrato (mg/l de NO_3^{-1})	218	0,0	172,12	897-060-062-093-102-200; 898-090; 899-034-070; 900-064	9	4,1
CO_2 dissolvido (mg/l de CO_2)	239	0,0	10,71	823-015; 826-036-058-059-065-144-165; 897-069-160; 898-024; 900-123; 974-031	12	5,0

QUADRO 14 - Frequência de anomalias dos parâmetros físicos e químicos nas águas dos poços

Quantidade de parâmetros anômalos	Frequência de poços anômalos		IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS ANÔMALOS
	quantidade (a)	% (b)	
8	4	1,6	898-003-169 e 899-070-089
7	1	0,4	824-022
5	4	1,7	824-023; 897-050 e 898-135-192
4	5	2,1	824-14-896-162; 897-160-245 e 900-095
3	6	2,5	896-058; 897-015-060-069; 898-162 e 899-119
2	19	7,9	824-012; 896-059-064-65-124-144-201; 897-58-82-107-134; 898-016-024-114; 899-107; 900-166; 973-103 e 974-021-031
1	41	17,0	823-015; 824-019; 896-012-019-030-036-080-112-116-120- 122-164-165; 897-048-052-062-077-079-093-102-105-109- 113-133-192-200; 898-010-090-159-180-181; 899-033-034-061 078-102; 900-044-064-123-134 e 973-065;
TOTAL	80	33,4	

(a) Intervalo de confiança em 95%

(b) Em relação aos 239 poços analisados.

(17%) porém apresentando somente um caráter anômalo. Nota-se ainda que 4 poços (1,6%) apresentam 8 parâmetros anômalos, ou seja, a metade dos parâmetros analisados se revelaram anômalos.

A explicação das prováveis causas das anomalias são apresentadas em itens que se seguem, quando são analisados e interpretados os diagramas e mapas hidroquímicos.

b) Histogramas de frequência

Com o objetivo de verificar o comportamento da distribuição dos parâmetros analisados foram construídos os histogramas de frequência (FIGURA 31 de a até q) nos quais estão indicados os limites de potabilidade: pH, Condutividade elétrica, dureza total, Alc. total e parcial, cátions (Na^{+1} , K^{+1} , Mg^{+2} , Ca^{+2} e Fe total) e ânions (F^{-1} , Cl^{-1} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-1} , CO_3^{-2} e NO_3^{-1}) e TSD.

Pode-se observar que com exceção dos bicarbonatos (HCO_3^{-1}) todos os constituintes apresentam uma distribuição assimétrica das frequências dos seus teores, e de uma maneira geral decrescentes com o aumento dos mesmos. No relativo aos parâmetros físico-químicos nota-se que o pH tem distribuição aproximadamente simétrica ao redor do valor 7,8 e a alcalinidade total, grosseiramente simétrica em relação ao valor 274 mg/l de CaCO_3 equivalente, ao passo que a alcalinidade parcial, a Condutividade elétrica e a Dureza total são assimétricas, com frequência decrescentes com o aumento dos seus valores.

Com base nos histogramas foram estabelecidos os teores máximos dos constituintes químicos e valores dos parâmetros físico-químicos para 75% das amostras, que são apresentados no QUADRO 15 a seguir.

c) Análise de regressão

Com o objetivo de avaliar o nível de dependência e encontrar, através da equação de melhor ajuste a relação de dependência entre alguns parâmetros e íons preponderantes, foram feitas também as análises de regressão apresentadas nos itens que se seguem.

Como a condutividade elétrica indica o teor salino das águas e sendo este de grande interesse para o estudo do aquífero Jandaíra, foram feitas várias análises envolvendo esse parâmetro.

Parâmetros considerados	Teor máximo para 75% das amostras
pH	8,20
CE ($\mu\text{mho/cm}$)	3700,00
TSD (mg/l)	2500,00
Dureza total (mg/l de CaCO_3)	1300,00
Alcalinidade parcial (mg/l de CaCO_3)	1,22
Alcalinidade total (mg/l de CaCO_3)	345,00
Sódio (mg/l de Na^{+1})	3,20
Potássio (mg/l de K^{+1})	21,00
Cálcio (mg/l de Ca^{+2})	270,00
Magnésio (mg/l de Mg^{+2})	150,00
Ferro total (mg/l de Fe)	0,30
Fluoreto (mg/l de F^{-1})	0,50
Cloreto (mg/l de Cl^{-1})	500,00
Sulfato (mg/l de SO_4^{-2})	270,00
Bicarbonato (mg/l de HCO_3^{-1})	360,00
Carbonato (mg/l de CO_3^{-2})	1170,00
Nitrato (mg/l de NO_3^{-1})	48,00

QUADRO 15 - Teores máximos dos constituintes químicos para 75% das amostras.

FIGURA 31a - Frequência dos teores de Magnésio (mg/l Mg^{+2}) FIGURA 31b - Frequência dos teores de Cálcio (mg/l Ca^{+2})

FIGURA 3lc - Frequência dos teores de Sódio (mg/l. Na⁺¹) FIGURA 3ld - Frequência dos teores de Potássio (mg/l K⁺¹)

FIGURA 31e - Frequência dos teores de Ferro (mg/l de Fe)

FIGURA 3lf - Frequência dos teores de Fluoretos (mg/l e F^{-1}) FIGURA 3lg - Frequência dos teores de Cloretos (mg/l Cl^{-1})

FIGURA 31h - Frequência dos teores de Bicarbonatos (mg/l HCO₃⁻¹)

FIGURA 31i - Frequência dos teores de Carbonatos (mg/l CO₃⁻²)

FIGURA 3lj - Frequência dos teores de Sulfatos (mg/l SO₄⁻²) FIGURA 3lk - Frequência dos teores de Nitratos (mg/l NO₃⁻¹)

FIGURA 31l - Frequência dos valores de pH

FIGURA 31m - Frequência dos valores de Dureza total (mg/l CaCO_3 equivalente)

FIGURA 3ln - Frequência dos valores de condutividade elétrica (CE) a 25°C.

FIGURA 3lo - Frequência dos valores de TSD (mg/l).

FIGURA 3lp - Frequência dos valores de Alcalinidade total (mg/l CaCO_3 equivalente).

FIGURA 3lq - Frequência dos valores de Alcalinidade parcial (mg/l CaCO_3 equivalente).

C_1 - Condutividade elétrica (CE) e Resíduo seco (RS)

Somente 95 laudos de análises apresentavam valores de RS medidos em laboratório. Com esses dados foi então avaliada a relação com a condutividade elétrica representada na FIGURA 32.

Da análise de regressão efetuada obteve-se a seguinte equação para expressar a relação entre a condutividade elétrica (CE) a 25°C e o resíduo seco (RS) a 105°C: $CE = 1,04 RS$.

FIGURA 32 - Regressão CE X RS

C_2 - Condutividade elétrica (CE) e soma de íons

Foi investigada a correlação para o grupo de todas as 239 amostras de água dos poços (FIGURA 33a) e também separadamente para as 149 amostras onde havia predominância do íon cloreto (FIGURA 33b), 72 amostras onde predominava o íon bicarbonato (FIGURA 33c) e 18 amostras do íon sulfato (FIGURA 33d).

Das regressões efetuadas obteve-se as seguintes equações representativas dessa relação:

FIGURA 33a - Regressão: CE x Soma de íons para o conjunto das 239 amostras.

FIGURA 33b - Regressão: CE x Soma de íons para águas com dominância de cloretos.

FIGURA 33c - Regressão: CE x Soma de íons para águas com dominância de bicarbonatos.

FIGURA 33d - Regressão: CE x Soma de íons para águas com dominância de sulfatos.

$CE = 0,68 \times (\Sigma \text{ c\acutes + \acutes})$ - para todo o grupo

$CE = 0,67 \times (\Sigma \text{ c\acutes + \acutes})$ - para as \acutes "cloretadas"

$CE = 0,74 \times (\Sigma \text{ c\acutes + \acutes})$ - para as \acutes "bicarbonatadas"

$CE = 0,82 \times (\Sigma \text{ c\acutes + \acutes})$ - para as \acutes sulfatadas,

c_3 - Condutividade el\acutesrica e Vaz\acuteso espec\acutesfica

A rela\acutes\acutes entre a condutividade el\acutesrica e a vaz\acuteso espec\acutesfica \acutes apresentada na FIGURA 34.

Pode-se verificar, pelo baixo valor do coeficiente de determina\acutes\acutes que praticamente n\acutes h\acutes depend\acutescia entre as vari\acutesveis, a n\acutes ser para valores bastante baixos de Q/s .

FIGURA 34 - Regress\acutes\acutes: CE x Q/s

c_4 - Condutividade el\acutesrica e transmissividade

A FIGURA 35 representa a curva de melhor ajuste entre CE e T.

Pode-se notar pela curva de melhor ajuste e pelo baixo valor do coeficiente de determina\acutes\acutes que, a menos da correspond\acutescia para valores bastante baixos de T, inexist\acutes rela\acutes\acutes entre esses par\acutesmetros

FIGURA 35 - Regressão: CE x T

c_5 - Condutividade elétrica (CE) e profundidade do nível estático (NE).

Na FIGURA 36 está representada a regressão linear, baseada na curva de melhor ajuste para os valores de CE e NE.

Pode-se verificar, pelo baixo valor do coeficiente de determinação que praticamente inexiste uma relação estreita entre esses parâmetros, a menos de uma branda redução da condutividade com o aprofundamento dos níveis d'água.

FIGURA 36 - Regressão: CE x prof. NE

c_6 - Condutividade elétrica (CE) e espessura da cobertura

Com o objetivo de avaliar a influência das águas armazenadas nos sedimentos de cobertura (Sistema Dunas-Barreiras) sobre a salinidade das águas do aquífero Jandaíra nessas áreas, foi investigada a relação citada, apresentada na FIGURA 37.

Pelo reduzido valor do coeficiente de determinação pode-se verificar que praticamente inexistente dependência entre essas variáveis, a menos de uma incipiente redução da condutividade elétrica com o aumento das espessuras dos sedimentos de cobertura.

FIGURA 37 - Regressão: CE x espessura dos sedimentos de cobertura dos calcários.

c_7 - Soma de íons e cloretos

Na FIGURA 38 está representada a reta correspondente à relação de dependência entre o total de cátions e ânions, expressos em mg/l, e os teores de cloretos.

Pode-se notar pelo elevado coeficiente de determinação a estreita interdependência entre essas variáveis, onde a participação dos cloretos é crescente com a soma de ânions, numa relação direta, portanto com a salinidade das águas.

FIGURA 38 - Regressão: soma de íons x cloretos.

c_8 - Soma de íons e bicarbonatos

A regressão entre a soma de cátions e ânions e os bicarbonatos é apresentada na FIGURA 39, podendo-se notar que praticamente inexistente relação entre as variáveis evidenciando um leve decréscimo nos teores de bicarbonatos à medida que aumenta a soma de íons denotando a pequena influência dos bicarbonatos na salinidade das águas. Nota-se também que há limitações para os teores máximos de bicarbonatos em função da soma de íons.

FIGURA 39 - Regressão: soma de íons x bicarbonatos

c_9 - Soma de íons e sulfatos

Na FIGURA 40 está representada a regressão de melhor ajuste para esta relação, podendo-se notar, pelo baixo coeficiente de determinação, a fraca influência dos sulfatos sobre a soma de cátions e ânions. Nota-se que há porém um limite para os teores máximos de sulfatos em função da soma de íons.

FIGURA 40 - Regressão: soma de íons x sulfatos.

c_{10} - Soma de íons e sódio

A curva de melhor ajuste que expressa a relação entre as somatórias de cátions e ânions e os teores de sódio é apresentada na FIGURA 41. Verifica-se pelo elevado coeficiente de determinação a estreita relação entre essas variáveis, com os teores de sódio crescendo diretamente com a soma de íons.

FIGURA 41 - Regressão: soma de íons x sódio

c_{11} - Profundidade dos poços e cloretos

Verificados os altos teores em cloretos e a sua relação com outros constituintes e parâmetros, procurou-se investigar o seu significado em águas de captação mais profundas. A FIGURA 42 apresenta a curva de melhor ajuste para expressar a relação entre essas variáveis.

Pode-se notar, pelo baixo coeficiente de correlação que praticamente inexistente influência da profundidade do poço no teor em cloretos das águas, embora haja um reduzido decréscimo dos seus teores com o aumento da profundidade.

FIGURA 42 - Regressão: profundidade dos poços x cloretos.

d) Relação entre Resíduo Seco e Pluviosidade

Objetivando investigar as relações entre fenômenos meteorológicos e a salinidade das águas, foi elaborado o gráfico apresentado na FIGURA 43, que relaciona a pluviometria e a variação do conteúdo salino, expresso em Resíduo Seco a 110°C , nas águas de alguns poços e cacimbas no domínio dos calcários Jandaíra. Os dados utilizados são apresentados na TABELA 20, ANEXO B. A pequena quantidade de dados de RS e a descontinuidade temporal da amostragem não permitiu uma análise detalhada dos fenômenos envolvidos.

Inversamente ao que se poderia esperar, nota-se um aumento da salinidade das águas do aquífero com a pluviosidade, variável

FIGURA 43 - Correlação entre RS em águas de poços e cacimbas e a pluviometria.

porém de local para local, e em intervalo de tempo relativamente curto. Esse fato deve estar representando a influência dos solos sobre a composição química das águas subterrâneas onde as águas de chuva promoveriam uma grande atividade iônica no meio não saturado e se enriqueceriam em sais antes de aportar na camada aquífera.

A cacimba nº 437-10, com comportamento inverso, segundo o inventário da SUDENE (MANOEL FILHO, 1970) capta água do aquífero Açú e portanto deve estar refletindo fenômeno diverso do ocorrente no aquífero Jandaíra, pois os solos mais arenosos sobrepostos ao aquífero Açú tendo composição diferente dos solos calcários promoveriam menor salinização.

e) *Grupamento das Águas do Aquífero Jandaíra*

Com o objetivo de identificar grupos de águas que apresentassem parentesco nos parâmetros físico-químicos e químicos pesquisados foram efetuadas diversas análises de agrupamento. Para essas análises foi verificada a significação dos agrupamentos. São apresentados os resultados da análise em que se utilizou como variáveis os seguintes parâmetros e relações iônicas: pH, CE ($\mu\text{mho/cm}$ a 25°C), $r\text{Mg}/r\text{Ca}$, $r\text{K}/r\text{Na}$, $r\text{Na}/r\text{Ca}$, $r(\text{Na} + \text{K})/r(\text{Ca} + \text{Mg})$, $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$, $r\text{Cl}/r\text{SO}_4$, $r\text{Cl}/r\text{Ca}$, $r\text{Cl}/r\text{Mg}$, $r\text{Cl}/r(\text{Ca} + \text{Mg})$, $r\text{Cl}/r(\text{Na} + \text{K})$.

Obteve-se assim 7 grupos de águas cujas amostras componentes de cada grupo são apresentadas na TABELA 21, ANEXO B.

No MAPA 16 é apresentada a distribuição espacial dos grupos encontrados, onde podem ser notados os seguintes comportamentos:

- as águas do Grupo 1 dominam a porção ocidental da bacia, quase desaparecendo na porção central, voltando a aparecer na zona mediana e no extremo leste da porção oriental da mesma;
- as águas do Grupo 2 ocorrem mais frequentemente a norte de Mossorô, dominando em uma faixa compreendida entre o rio Açú e o riacho da Mutuca, cedendo então lugar às águas do Grupo 1, até o riacho do Cabelo, voltando a reaparecer na região de Parazinho;
- as águas do Grupo 3 geralmente estão bordejando as áreas de domínio das águas do Grupo 2;

- as águas dos Grupos 4, 5, 6 e 7 são águas com teores salinos e de cloro bastante elevados, crescentes no sentido dos últimos grupos (ver também MAPAS 17 e 19).

Comparando-se o agrupamento obtido com a freqüência das anomalias nos parâmetros físicos e químicos (QUADRO 14 item 8.2.a) pode-se notar que os resultados são bastante coincidentes reunindo em um mesmo conjunto, poços com a mesma freqüência de anomalias.

Ainda comparando-se o zoneamento dos grupos de águas com as áreas de dominância dos calcários de alta pureza (MENOR et alii, 1980) apresentadas na FIGURA 10 (item 5.3.6), pode-se notar uma grande coincidência entre a área de domínio das águas do Grupo 2 com a de domínio daqueles calcários.

8.3 Classificação das Águas do Aquífero Jandaíra

Com o objetivo de fornecer informações de caráter global sobre a composição química das águas do aquífero Jandaíra, foram as mesmas classificadas em relação ao Resíduo Seco, à Dureza Total e aos íons dominantes, conforme a seguir apresentado.

a) Classificação pelo Resíduo Seco (RS)

Como os valores de Resíduo Seco são bastante próximos do Total de Sais Dissolvidos (TSD), para esta classificação foram utilizados estes dados, constantes da TABELA 10 (ANEXO B), calculados através da equação:

$$CE = A.TSD, \text{ onde}$$

CE = condutividade elétrica ($\mu\text{mho/cm}$) a 25°C .

A = coeficiente de proporcionalidade, adotado 1,5, genericamente para todas as amostras; e

TSD= total de sólidos dissolvidos (mg/l).

Utilizando-se a classificação proposta por CUSTÓDIO (in — & LLAMAS, 1976, p. 1058) para os dados constantes na TABELA 10 (ANEXO B), obteve-se os resultados apresentados no QUADRO 16 a seguir.

Tipos de Água	Limites de RS (mg/l)	Frequência	
		Quant.de amostras	%
Doce	0 - 2 000	171	71,2
Salobra	2 000 - 5 000	56	23,3
Salgada	5 000 - 40 000	12	5,0

QUADRO 16 - Classificação das águas pelo RS (Baseada em CUSTODIO in ____ & LLAMAS, 1976).

Apesar da maioria das águas ser classificada como água doce segundo esses limites, pode-se notar porém a alta frequência de águas salobras e salgadas.

Observando-se o histograma de frequência dos valores de TSD na FIGURA 31o e QUADRO 15 (item 8.2.b) nota-se que 75% das amostras possuem TSD compreendido entre 270,00 e 2500,00 mg/l.

b) *Classificação pela Dureza Total*

Com os dados constantes na TABELA 10 (ANEXO B), as águas do aquífero Jandaíra, foram classificadas, segundo a Dureza Total como apresentado no QUADRO 17 a seguir:

Classes de Águas	Limites de Dureza Total (mg/l de CaCO ₃)	Frequência	
		Quant.de amostras	%
Branda	0- 50 (ou 60)	0	0
Algo Dura	50-100 (ou 120)	1	0,4
Dura	100-200 (ou 250)	7	2,9
Muito Dura	200 - até a saturação	231	96,2

QUADRO 17 - Classificação das águas pela Dureza Total (baseada em CUSTODIO in ____ & LLAMAS, 1976).

Nota-se, portanto que a quase totalidade das águas do aquífero Jandaíra (96,2%) se enquadra na categoria de águas "muito duras". Como pode ser visto na TABELA 18 (item 8.2.a), os valores variam de 85,00 até 6186,90 mg/l de CaCO₃, com média de 989,13

mg/l de CaCO_3 . Estes são valores bastante altos quando comparados aos encontrados nas águas subterrâneas em geral (entre 10 e 300 mg/l de CaCO_3 , "apud" CUSTODIO & LLAMAS, 1967, p. 212).

Observando-se ainda o histograma dos valores de Dureza Total (FIGURA 31m e QUADRO 15 item 8.2.b), pode-se notar que 75% das amostras apresentam dureza total compreendida compreendida entre 85,00 e 1300,00 mg/l de CaCO_3 equivalente.

c) Classificação das águas pelos íons dominantes

Nas TABELAS 15 e 16 (ANEXO B) são apresentadas as porcentagens relativas e dominância dos cátions e dos ânions das amostras analisadas. Com base nesses valores foi feita a classificação das águas pelos íons dominantes, pelo sistema de SCHOELLER (SCHOELLER, 1962, "apud" CUSTODIO & LLAMAS, 1976).

O sistema de classificação se baseia na sobrepujança de determinados íons sobre outros; a água é denominada pelo ânion (ou cátion) cuja concentração, expressa em miliequivalentes por litro, ultrapassar em 50% as suas respectivas somas. Se nenhum deles ultrapassar os 50%, se denomina a água pelos dois ânions (ou cátions) mais abundantes. Estas últimas são denominadas "águas mistas".

A classificação das águas do aquífero Jandaíra feita por essa sistemática é apresentada na TABELA 22.

A representação dessas águas no Diagrama de Piper pode ser vista na FIGURA 44 e a sua distribuição espacial é apresentada no mapa de diagramas de Stiff (MAPA 23), cuja descrição é feita no item (8.4.7.).

São feitas a seguir, algumas considerações relativas às diferentes classes de águas.

c.1) Águas cloretadas ($r\text{Cl} > r\text{HCO}_3 \gtrsim r\text{SO}_4$)

Entre as 239 amostras analisadas, 149 delas (62,3%) são águas com predominância de cloretos. Entre estas, 125 amostras (52,3%) são águas cloretadas e 24 amostras (10,0%) são águas mistas, relativamente aos ânions presentes.

No que diz respeito aos cátions, entre as águas cloretadas são encontradas 23 amostras (9,6%) onde $r\text{Na} > r\text{Mg} \gtrsim r\text{Ca}$, 4 amostras (1,7%) onde $r\text{Mg} > r\text{Na} \gtrsim r\text{Ca}$, 1 amostra (0,4%) onde $r\text{Ca} > r\text{Mg}$

TABELA 22: Classificação das águas pelos íons dominantes

CLASSES DE ÁGUAS	FREQUÊNCIA			IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS
	Quantidade de amostras	%		
		Em relação ao total	Em relação à classe	
a) Cloretadas e Mistas				
Cloretada sódica	23	9,4	15,4	823-20; 824-22; 896-58-116; 897-15-17-42-76-97-129-174-192-294-299; 898-90-92-96-107-163-169 e 900-89-95-108.
Cloretada cálcica	1	0,4	0,7	898-3
Cloretada magnesiânica	4	1,7	2,7	899-102-119; 900-80-122.
Cloretada sódico-cálcica	14	5,8	9,4	896-59-64; 897-4-60-80-101-147-180-211-293; 898-193 e 899-70-94-151.
Cloretada cálcico-sódica	16	6,7	10,7	823-8; 824-12-19-23; 896-117-203; 897-93-102-109-196-200-245-294; 899-99-124 e 973-26.
Cloretada sódico-magnesiânica	21	8,8	14,1	824-14; 896-29-124-162; 897-119-169; 898-35-37-136-159-173-178-179-190; 899-36-45-80; 900-36-64-83-125.
Cloretada magnesiânico-sódica	12	5,0	8,0	896-30-61-202; 897-62-78; 898-113-184; 899-21-24-197; 900-88 e 89-10.
Cloretada cálcico-magnesiânica	17	7,1	11,4	897-118; 898-7-135-137-164-180-182; 899-89-113-142-199; 900-50-110-123; 973-60-F03 e 974-27;
Cloretada magnesiânico-cálcica	17	7,1	11,4	896-65-98-100; 898-10-24-29-164; 899-13-93-106-167-174-196-201; 900-10-48 e 974-21.
Cloretada-bicarbonatada sódica	1	0,4	0,7	899-61.
Cloretada-bicarbonatada cálcica	2	0,8	1,3	823-23; e 973-65
Cloretada-bicarbonatada magnesiânica	1	0,4	0,7	897-77.
Cloretada-bicarbonatada cálcico-magnesiânica	3	1,3	2,0	899-3; 900-134 e 974-28
Cloretada-bicarbonatada magnesiânico-cálcica	2	0,8	1,3	897-01 e 899-122.
Cloretada-bicarbonatada magnesiânico-sódica	2	0,8	1,3	899-68 e 973-109.
Cloretada-bicarbonatada sódico-cálcica	1	0,4	0,7	824-36.
Cloretada-bicarbonatada cálcico-sódica	1	0,4	0,7	896-135.
Cloretada-bicarbonatada sódico-magnesiânica	2	0,8	1,3	897-292 e 899-75.
Cloretada-sulfatada magnesiânica	1	0,4	0,7	899-55.
Cloretada-sulfatada magnesiânico-cálcica	5	2,1	3,3	896-14; 897-59 e 898-100-114-165
Cloretada-sulfatada sódico-magnesiânica	2	0,8	1,3	897-48 e 899-78.
Cloretada-sulfatada magnesiânico-sódica	1	0,4	0,7	897-133.
TOTAL	149	62,3	39,8	
b) Bicarbonatadas e Mistas				
Bicarbonatada sódica	4	1,7	5,5	897-82-134-291 e 974-23.
Bicarbonatada cálcica	11	4,6	15,3	896-36-57-74-109-144; 897-290; 973-10-32-106-108 e 974-45.
Bicarbonatada magnesiânica	6	2,5	8,3	896-33-164-206; 898-14; 899-22 e 974-37.
Bicarbonatada sódico-cálcica	1	0,4	1,4	898-8.
Bicarbonatada cálcico-sódica	4	1,7	5,5	896-140; 899-16; 973-61 e 974-32.
Bicarbonatada cálcico-magnesiânica	9	3,8	12,5	823-15; 896-32-121; 897-111-160-161; 899-6; 900-6; e 974-28
Bicarbonatada magnesiânico-sódica	3	1,3	4,2	896-41-44 e 899-200.
Bicarbonatada magnesiânico-cálcica	13	5,4	16,0	896-34-49-80-83-163-165-175-205; 897-297; 899-2; 900-F01 e 973-110-114.
Bicarbonatada-cloretada sódica	1	0,4	1,4	897-79.
Bicarbonatada-cloretada cálcica	4	1,7	5,5	823-16 e 896-107-112-122
Bicarbonatada-cloretada magnesiânica	3	1,3	4,2	896-8; 897-107 e 973-103
Bicarbonatada-cloretada sódico-magnesiânica	2	0,8	2,8	896-19 e 898-183.
Bicarbonatada-cloretada magnesiânico-sódica	3	2,1	6,9	896-24-204 e 897-89-103-116.
Bicarbonatada-cloretada cálcico-magnesiânica	4	1,7	5,5	896-120; 897-113; 900-32 e 973-58.
Bicarbonatada-cloretada magnesiânico-cálcica	1	0,4	1,4	897-130.
Bicarbonatada-sulfatada magnesiânica	1	0,4	1,4	897-128.
TOTAL	72	30,2	99,8	
c) Sulfatadas e Mistas				
Sulfatada cálcica	4	1,7	22,2	900-44-111-118-166.
Sulfatada magnesiânica	2	0,8	11,1	900-57-78.
Sulfatada sódico-cálcica	1	0,4	5,6	900-26.
Sulfatada cálcico-sódica	1	0,4	5,6	897-58.
Sulfatada cálcico-magnesiânica	2	0,8	11,1	896-12 e 898-76.
Sulfatada magnesiânico-cálcica	2	0,8	11,1	896-201 e 898-162.
Sulfatada magnesiânico-sódica	2	0,8	11,1	897-50-52.
Sulfatada-cloretada cálcico-magnesiânica	2	0,8	11,1	898-131 e 899-33
Sulfatada-cloretada magnesiânico-sódica	1	0,4	5,6	897-69.
Sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnesiânica	1	0,4	5,6	897-64.
TOTAL	18	7,3	100,1	

DIAGRAMA DE PIPER

FIGURA 44 - Classificação das águas do Aquífero Jandaíra segundo o Diagrama de Piper (teores em % meq/l).

$\geq rNa$ e 97 amostras (40,5%) sem predominância de cátion específico, ou seja, são mistas em relação aos cátions, e podem ser representadas pela expressão genérica: $rNa \geq rMg \geq rCa$.

c.2) *Águas bicarbonatadas* ($rHCO_3 > rCl \geq rSO_4$)

Entre as 239 amostras analisadas, 72 delas (30,2%) apresentam predominância de íon bicarbonato; dentre estas, 51 amostras (21,3%) são bicarbonatadas e 21 amostras (8,8%) são águas mistas em relação aos ânions.

Relativamente aos cátions presentes nas águas bicarbonatadas, temos 11 amostras (4,6%) onde $rCa > rNa \geq rMg$, 6 amostras (2,5%) onde $rMg > rCa \geq rNa$, 4 amostras (1,7%) onde $rNa > rMg \geq rCa$ e 30 amostras (12,5%) são mistas em relação aos cátions, ou seja, não há predominância de cátion específico.

c.3) *Águas sulfatadas* - ($rSO_4 > rCl \geq rHCO_3$)

Entre as 239 amostras de águas analisadas, em 18 delas (7,3%) há predominância do íon sulfato; dentre estas, 14 amostras (5,8%) são sulfatadas e 4 amostras (1,7%) são águas mistas relativamente aos ânions. Deve-se notar a ausência de águas sódicas entre as sulfatadas.

Relativamente aos cátions, entre as águas sulfatadas temos 4 amostras (1,7%) onde $rCa > rMg \geq rNa$, 2 amostras (0,8%) onde $rMg > rCa \geq rNa$, e 12 amostras (5,0%) sem predominância de cátion específico, ou seja, são mistas com relação aos cátions.

c.4) *Águas mistas* - ($rCl \geq rHCO_3 \geq rSO_4$)

Como exposto anteriormente, são classificadas como mistas as águas em que a concentração de nenhum dos ânions, expressa em meq/l, ultrapassa em 50% a concentração dos outros ânions, apresentando portanto grande variedade de relações iônicas.

Entre as águas analisadas, 49 amostras (20,5%) são águas mistas em relação aos ânions, apresentando as seguintes composições iônicas:

- 15 amostras (6,3%) - cloretadas-bicarbonatadas;
- 9 amostras (3,8%) - cloretadas-sulfatadas;
- 20 amostras (8,4%) - bicarbonatadas-cloretadas;

- 1 amostra (0,4%) - bicarbonatada-sulfatada;
- 3 amostras (1,2%) - sulfatadas-cloretadas;
- 1 amostra (0,4%) - sulfatada-bicarbonatada.

Na TABELA 23 estão relacionados os parâmetros estatísticos dos dados físico-químicos, dos constituintes químicos e relações iônicas das águas do aquífero Jandaíra, separados de acordo com a dominância relativa dos ânions. Através da observação dessa tabela ficam evidentes os seguintes comportamentos:

- . as águas cloretadas têm os menores valores de pH apresentan do tanto caráter ácido como básico, ao passo que as águas bi carbonatadas e sulfatadas têm caráter básico;
- . os teores salinos mais elevados correspondem às águas cloreta das, embora em termos de média de TSD as águas sulfatadas se aproximem bastante das cloretadas;
- . as águas sulfatadas apresentam os maiores valores da média de dureza total, seguidas das águas cloretadas e bicarbonatadas, podendo-se notar que se trata essencialmente de dureza de não carbonatos;
- . as médias mais elevadas de Mg e Ca são as das águas cloretadas e sulfatadas que apresentam também praticamente os mesmos va lores médios da relação rMg/rCa , havendo portanto equilíbrio na participação desses íons; as águas bicarbonatadas, ao con trário, apesar de possuírem as menores médias de Mg e Ca, a presentam maior valor médio da relação rMg/rCa , denotando pre domínio dos íons Mg sobre os íons Ca nessas águas;
- . a relação rK/rNa revela a participação praticamente equitativa desses íons em todas as águas;
- . a relação entre elementos alcalinos e alcalinos terrosos é le vemente maior nas águas cloretadas, decrescendo para as bicarbonatadas e sulfatadas;
- . nas águas cloretadas $rCl/rHCO_3$ é exageradamente elevada, com a média atingindo 11,59 (usualmente varia entre 0,1 e 5,0).

As relações rCa/rCl , rMg/rCl e $rCa+rMg/rCl$, revelam, como se poderia esperar, a dominância dos íons Ca e Mg nas águas sulfatadas e bicarbonatadas relativamente às cloretadas, onde domina o íon Na.

TABELA 23: Parâmetros estatísticos dos constituintes químicos, físico-químicos e das relações iônicas para os diferentes tipos de água.

Parâmetros	TIPOS DE ÁGUA								
	CLORETADAS			BICARBONATADAS			SULFATADAS		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
pH	6.5	8.89	7.92	7.00	8.89	8.03	7.19	8.5	7.76
CE (μmho/cm) a 25°C	556.50	17013.00	3400.26	405.39	2670.89	1105.80	1209.39	6451.59	3141.86
TSD (mg/l)	371.00	11342.00	2266.84	270.26	1780.59	737.20	806.26	4301.06	2094.57
Dureza Total (mg/l CaCO ₃)	170.00	6106.89	1161.36	95.00	816.00	451.89	244.00	2952.79	1501.54
Alc. total (mg/l CaCO ₃)	16.95	416.00	237.07	112.70	720.00	343.21	25.94	345.45	212.67
Alc. parcial (mg/l CaCO ₃)	0.00	40.00	6.47	0.00	73.22	12.72	0.00	21.53	4.55
CO ₂ dissolv. (mg/l CO ₂)	0.37	58.57	7.74	0.39	75.64	10.46	1.08	37.71	9.30
Mg (mg/l Mg ⁺²)	18.82	708.50	144.46	11.00	168.50	56.72	42.75	418.17	191.12
Ca (mg/l Ca ⁺²)	22.39	1315.19	237.14	7.00	169.02	86.94	112.26	596.18	330.97
Na (mg/l Na ⁺¹)	30.21	3060.29	338.90	19.19	235.00	71.03	44.79	500.00	207.75
K (mg/l K ⁺¹)	0.97	81.13	16.44	0.90	124.00	9.41	6.00	78.80	27.82
Fe (mg/l Fe)	0.00	3.19	0.29	0.00	3.00	0.37	0.00	1.44	0.31
F (mg/l F ⁻¹)	0.00	2.00	0.44	0.00	3.00	0.56	0.00	0.25	0.03
Cl (mg/l Cl ⁻¹)	106.55	7043.39	1018.84	27.86	321.08	139.91	41.76	1130.00	462.29
HCO ₃ (mg/l HCO ₃ ⁻¹)	20.68	507.51	272.20	121.65	878.39	390.77	31.65	421.45	250.48
SO ₄ (mg/l SO ₄ ⁻²)	2.1	1380.59	227.11	4.80	344.44	66.01	244.08	2032.39	1153.76
NO ₃ (mg/l NO ₃ ⁻¹)	0.00	730.28	37.93	0.00	143.86	14.78	0.00	301.53	46.59
CO ₃ ⁻² (mg/l CO ₃ ⁻²)	0.00	64.25	8.37	0.00	87.87	14.05	0.00	27.06	4.40
rMg/rCa	0.17	4.05	1.14	0.13	8.89	1.42	0.34	2.49	1.07
rK/rNa	0.00	0.25	0.04	0.01	0.61	0.07	0.04	0.20	0.08
rNa/rCa	0.25	6.78	1.39	0.21	14.78	1.06	0.10	1.32	0.60
rNa+rK/rCa+rMg	0.16	3.86	0.69	0.13	4.90	0.46	0.07	0.64	0.31
rCl/rHCO ₃	1.00	289.84	11.59	0.11	1.29	0.63	0.17	39.51	5.85
rSO ₄ /rCl	0.00	0.00	0.23	0.02	1.28	0.35	1.04	12.87	2.96
rCa/rCl	0.16	1.45	0.49	0.07	4.90	1.29	0.56	10.63	2.16
rMg/rCl	0.11	1.23	0.51	0.28	6.05	1.30	0.61	7.28	1.81
rCa+rMg/rCl	0.39	2.34	1.01	0.36	9.78	2.60	1.40	17.91	3.98
rNa+rK/rCl	0.14	1.53	0.59	0.43	2.63	0.89	0.33	11.55	1.29

8.4 Comportamento Espacial das Características Químicas e Físico-Químicas das Águas do Aquífero Jandaíra

Com o objetivo de se proceder à análise do comportamento espacial de alguns constituintes químicos e índices hidrogequímicos das águas do aquífero Jandaíra foram elaborados diversos mapas que são apresentados no VOLUME 2 e que, para facilidade de acesso foram relacionados seqüencialmente no QUADRO 18 a seguir.

Item	Título do Mapa	Linhas de Isovalores (números)	Nº do MAPA
8.2.e	Grupos de águas obtidos por análise de agrupamento		16
8.4.1	Total de sólidos dissolvidos (TSD) (mg/l)	500, 1000, ..., 11000	17
8.4.2	Dureza Total (mg/l de CaCO_3)	500, 1000, ..., 6000	18
8.4.3	Cloretos (mg/l de Cl^{-1})	250, 500, ..., 6000	19
8.4.4	Sulfatos (mg/l de SO_4^{-2})	250, 500, ..., 2000	20
8.4.5	Índices de troca de bases (ITB)	-0,5, -0,4, ..., 0, ..., 0,8	21
8.4.6	Capacidade de ataque químico (Índice de Estabilidade de Ryznar)	5,0, 5,5, ..., 8,0	22
8.4.7	Mapa com diagramas de Stiff	(diagramas)	23
8.5.3	Qualidade da água para irrigação	(classes)	24

QUADRO 18 - Dados gerais dos mapas hidroquímicos.

A seleção dos intervalos para o traçado das linhas de isovalores se baseou nos valores mínimos e máximos de cada variável e na escala dos mapas apresentados. A variação espacial brusca de alguns parâmetros no entanto motivou a distribuição bastante irregular das isolinhas, fazendo surgir áreas de estreitamento exagerado entre as mesmas, refletindo a heterogeneidade na composição química das águas do aquífero.

Os mapas elaborados permitiram uma caracterização global bastante confiável do comportamento espacial das propriedades analisadas.

Algumas áreas porém, pela ausência de poços que captam águas no aquífero Jandaíra, não puderam ser hidrogeoquimicamente caracterizadas, como é o caso, por exemplo, da área das serras do Carmo e do Mel e da área contígua às mesmas, em sua parte sudeste.

A análise dos mapas elaborados é apresentada a seguir.

8.4.1 Mapa de total de sólidos dissolvidos (TSD)

Existem dois aspectos a serem analisados quanto ao comportamento das concentrações de sais no aquífero Jandaíra: a análise da área como um todo e a análise de parcelas dessa área que apresentam características peculiares, cuja salinidade é de terminada por fatores locais.

Assim, analisado sob o ponto de vista global (MAPA 17) nota-se um aumento de concentração salina em direção aos vales dos principais rios (Mossoró e Açu) e em direção ao mar. Esse comportamento, em comparando-se com o mapa piezométrico (MAPA 14) é perfeitamente concordante com a tendência natural de aumento da salinidade, de montante para jusante do fluxo subterrâneo.

Os teores de TSD variam de um mínimo de 270,27 mg/l até um máximo de 11342,0 mg/l com média de 1793,0 mg/l. Os menores teores são encontrados tanto junto às zonas de recarga do aquífero como também junto aos afloramentos do Grupo Barreiras, porém sempre em áreas onde os gradientes hidráulicos são mais acentuados; os maiores teores são encontrados junto à orla atlântica, onde surgem os teores máximos e também junto ao baixo vale dos principais rios.

Dentro desse comportamento geral, algumas áreas de concentração relativamente anômalas merecem destaque sendo descritas a seguir.

- Áreas com teores relativamente mais baixos

a) Porção ocidental da bacia

- . noroeste de Mossoró: poço 897-291 com 386 mg/l e 823-16 com 539 mg/l;
- . sul de Maxixe: poço 896-206 com 398 mg/l e 896-205 com 424 mg/l;

- . noroeste de Apodi: poço 972-106 com 496 mg/l;
- . sudeste de Gov. Dix-Sept. Rosado: poço 973-23 com 475 mg/l.

b) *Porção central da bacia*

- . flanco oeste das serras do Carmo e do Mel: poço 897-64 com 806 mg/l;
- . flanco sul das serras do Carmo e do Mel: poço 898-113 com 980 mg/l;
- . vale do rio Mulungu: poço 898-8 com 524 mg/l, 898-183 com 636 mg/l e 898-14 com 694 mg/l.

c) *Porção oriental da bacia*

- . nordeste de Pureza: poço 900-6 com 281 mg/l, 900-10 com 371 mg/l e fonte 900 F-1 com 280 mg/l.

A maior parte desses núcleos está relacionada com a presença de sedimentos do Grupo Barreiras. Assim por exemplo, para os poços citados que se localizam na porção oriental da bacia, a redução dos teores poderia ser explicada pela mistura com águas do aquífero Barreiras cujo teor médio de TSD em suas águas é de 115,33 mg/l (QUADRO 13, item 8.2-a), associando-se o fato de que há aumento de pluviosidade à medida que nos aproximamos da costa leste (média de 700 mm/a a noroeste de Pureza).

Na área das serras do Carmo e do Mel, embora sejam poucos os poços anômalos e possuam teores relativamente mais elevados quando comparados aos da porção oriental, foram considerados como tal, comparativamente aos teores dos poços circunvizinhos. O sistema aquífero Dunas-Barreiras com seu domínio parcialmente firmado sobre essas serras estaria garantindo assim uma diluição das águas do aquífero Jandaíra a ele sotoposto (item 7.5.3).

Comparando-se o padrão das isolinhas com o dos outros mapas, as linhas de isovalores de TSD nessa área sugerem uma disposição aproximadamente concêntrica, com valores crescentes à medida que se afastam do cume dessas serras.

- Áreas com teores relativamente mais elevados

a) *Núcleos litorâneos*

Na faixa litorânea, onde os teores normalmente já se apre

sentam elevados por se encontrarem próximos à zona de descarga do aquífero, surgem alguns núcleos que registram teores relativamente ainda mais elevados e que são citados a seguir:

- . a sul e sudoeste da cidade de Tibau: poço 824-12 com 4224 mg/l; 824-14 com 5836 mg/l; 824-19 com 2862 mg/l; 824-22 com 11342 mg/l e 824-23 com 6042 mg/l, localizados nas proximidades de grandes falhamentos e de lagoa intermitente interligada com o oceano;
- . sudeste de Macau: poço 898-135 com 6466 mg/l; 898-192 com 5035 mg/l e 898-3 com 5729 mg/l, próximos a áreas inundãveis contíguas a salinas;
- . sul de Guamarê: poço 899-89 com 9010 mg/l, junto a grande falhamento no flanco sudeste da Serra do Mangue Seco;
- . a sudoeste de São Bento do Norte: poço 898-119 com 5035 mg/l;
- . sudeste de São Bento do Norte: poço 900-95 com 6254 mg/l, próximo à Lagoa Cutiã;
- . sudeste de Pedra Grande: poço 900-83 com 4028 mg/l, nas proximidades da Lagoa Canto da Ilha de Cima, intermitente, em comunicação com o oceano.

Comparando-se este mapa com os mapas geológico (MAPA 3) piezométrico (MAPA 14) e de contorno estrutural da base da cobertura (MAPA 11) pode-se notar que se trata de áreas assinaladas por grandes falhamentos, onde o topo dos calcários estão a cotas bastante reduzidas e as cargas piezométricas são baixas, da ordem de apenas 1 metro. Além disso, pode-se notar, observando a TABELA 13 (ANEXO B) que a relação $rCl/rHCO_3$ das águas desses poços é em geral superior a 25. Assim analisado é provável que os teores elevados de TSD estejam refletindo um processo de contaminação por água marinha que durante as marés mais altas (de cerca de 3 m nessa área) avançaria para o interior da bacia através de condutos de carstificação mais desenvolvidos na orla atlântica, principalmente nas zonas de intenso fraturamento (item 7.4.a). Observando-se o mapa poder-se-ia dizer que a isolinha de 2000 mg/l estaria limitando grosseiramente a zona de influência marinha.

b) *Núcleos interiores*

Mais para o interior da bacia surgem também alguns núcleos de teores relativamente elevados, entre os quais se destacam:

b.a) *Porção ocidental da bacia*

- . em Mossoró: poço 897-15 com 4829 mg/l;
- . a noroeste de Mossoró: poço 896-162 com 6225 mg/l, localizado em área com alto grau de fraturamento e correspondente a uma das zonas preferenciais de recarga mais notórias do aquífero, situada nas cabeceiras do Riacho Grande, na região da Serra de Mossoró.
- . oeste de Mossoró: poço 896-203 com 2597 mg/l;
- . noroeste de Gov. Dix-Sept. Rosado: poço 896-64 com 4240 mg/l, poço 896-12 com 3153 mg/l e 896-59 com 2670 mg/l. Esse núcleo se localiza nas cabeceiras do riacho do Taupio;
- . a noroeste de Felipe Guerra: poço 896-30 com 3657 mg/l, situado nas cabeceiras do Riacho da Forquilha.

b.b) *Porção central da bacia*

- . a noroeste de Carnaubais: poço 898-114 com 2534 mg/l;
- . a sudoeste de Carnaubais: poço 897-211 com 3816 mg/l e 898-96 com 3100 mg/l, nas cabeceiras de afluentes da margem direita do riacho Umbuzeiro, sobre um divisor de águas subterrâneas pouco expressivo;
- . em Carnaubais: poço 898-107 com 3333 mg/l;
- . sul de Alto do Rodrigues: poço 898-169 com 9540 mg/l e 898-162 com 2809 mg/l;
- . noroeste de Afonso Bezerra: poço 898-24 com 3710 mg/l, nas cabeceiras do riacho da Oiticica, e poço 898-184 com 3498 mg/l.

b.c) *Porção oriental da bacia*

- . norte de Afonso Bezerra: poço 899-99 com 2862 mg/l no divisor de águas superficiais do rio Mulungu e rio Baixa do Tamanduá;
- . norte de Pedro Avelino: poço 899-70 com 6254 mg/l, cor

- respondendo ao mais elevado teor dos núcleos interiores, localizado nas cabeceiras do riacho Santa Maria;
- . a sudeste de Parazinho, em Cruzamento: poço 900-36 com 4611 mg/l, nas cabeceiras do riacho do Angico.

Comparando-se o mapa de TSD (MAPA 17) com o mapa geológico (MAPA 3) pode-se notar que os poços 897-15 da cidade de Mossoró, 898-107 em Carnaubais e 898-169 a sul de Alto do Rodrigues, considerada a semelhança do contexto hidrogeológico, devem possuir alto teor salino por estarem nas proximidades dos aluviões dos rios Mossoró e Açu respectivamente, em áreas que devem sofrer influência marinha. Durante as marés altas a água do mar avança para o interior do continente através dos vales dos principais rios (MANOEL FILHO, 1970).

Analisando-se o comportamento geral das curvas de isovalores na porção central da bacia (MAPA 17) e considerando-se as feições estruturais e topográficas da área (MAPAS 3 e 1), poder-se-ia dizer que os altos valores de TSD ao longo do vale do rio Açu, comparativamente aos do vale do rio Mulungu que só apresenta valores elevados em seu baixo curso, na região da Baixa dos Afonsos, poderia ser explicado também como influência de águas marinhas que, como suposto anteriormente, teriam adentrado através daquele vale, permanecendo incólumes o médio e alto vales do rio Mulungu por se encontrarem a maiores altitudes.

Comparando-se agora a distribuição dos núcleos interiores (MAPA 17) com as curvas isopiezométricas (MAPA 14) e ainda com as linhas de drenagem (MAPA 2) nota-se que a maioria desses núcleos se situa em divisores de águas superficiais e subterrâneas e em áreas de fracos gradientes hidráulicos subterrâneos (2×10^{-3}), portanto áreas de baixas velocidades de circulação de águas.

Considerando-se ainda que os níveis desses poços são relativamente profundos (superiores a 10 m) descarta-se a possibilidade de enriquecimento em sais por evaporação da água subterrânea em superfície (WHITE, 1932 "apud" TODD, 1952) e, pelo exposto no item 8.2.d, é lícito então supor que as águas de infiltração ao aportarem na porção saturada já estariam com concentrações salinas elevadas. Comparando-se o mapa de TSD (MAPA 17)

com o mapa de solos do DNPEA (1971) nota-se que os poços de núcleos com teores anormalmente elevados no interior da bacia estão geralmente situados em áreas de associações de solos salinos (poços 896-30 e 64; 897-76 e 898-24), ou então em linha de drenagem também com associações de solos salinos a montante (poço 897-211).

Assim exposto, pode-se supor que devido à percolação pelos solos salinos as águas pluviais se enriqueceriam em sais, cujos teores, já no aquífero seriam ainda aumentados devido à baixa velocidade de circulação (baixos gradientes hidráulicos) nessas áreas, uma vez que os canais de circulação somente estariam em carga na época das chuvas.

Como são frequentes os indícios de formas endocársticas e também tendo sido detectado poços secos que promovem sopro contínuo e relativamente forte de vento, poder-se-ia supor ainda que a circulação de grandes volumes de ar seco e quente pelos dutos de carstificação pudessem causar uma taxa de evaporação significativa a médias profundidades, que estariam assim corroborando com o aumento de concentração de sais em áreas de carstificação mais intensa. Não há porém nenhum controle de parâmetros que possa confirmar tal hipótese.

8.4.2 Mapa de Dureza Total

A composição química das águas subterrâneas é um reflexo da constituição mineralógica das rochas por onde elas percolam. O mapa de Dureza Total (MAPA 18), não foge à regra geral, refletindo sem dúvida a natureza calcária e dolomítica das rochas da Formação Jandaíra.

As águas subterrâneas do aquífero Jandaíra são predominantemente "muito duras" (item 8.3.b), apresentando valores de dureza que variam entre um mínimo de 85,0 mg/l, até um máximo de 6186,9 mg/l de CaCO_3 equivalente, com média de 989,1 mg/l.

A partir dos dados constantes da TABELA 10 (ANEXO B) pode-se notar que a dureza é devida principalmente a não-carbonatos.

Observa-se que a distribuição da Dureza Total (MAPA 18) se faz então geralmente com teores crescentes concordantes com o

sentido de fluxo, ou seja, em direção aos vales dos grandes rios (Mossoró, Açu e Mulungu) e genericamente em direção ao litoral. Os valores mais baixos são encontrados no extremo leste da área, nas proximidades do contacto com os sedimentos do Grupo Barreiras.

Dentro desse comportamento geral destacam-se alguns núcleos com teores anômalos que, como se pode notar, correspondem às mesmas áreas e geralmente também aos mesmos poços notórios no mapa de TSD (MAPA 17) e de cloretos (MAPA 19). Entre essas áreas tanto na orla como no interior da bacia as mais importantes são destacadas a seguir.

- Áreas com teores relativamente mais baixos

a) *Porção ocidental da bacia*

- . noroeste de Mossoró: poço 897-291 com 114 mg/l e 897-192 com 170 mg/l;
- . oeste de Mossoró: poço 897-129 com 172 mg/l;

b) *Porção central da bacia*

- . sudeste de Gov. Dix-Sept. Rosado: poço 973-23 com 150 mg/l;
- . norte de Volta: poço 897-79 com 85 mg/l;
- . flanco oeste das Serras do Carmo e do Mel: poço 897-64 com 498 mg/l;
- . flanco sul das serras do Carmo e do Mel: poço 898-113 com 470 mg/l;
- . vale do rio Mulungu: poço 898-8 com 194 mg/l.

c) *Porção oriental da bacia*

- . noroeste de Pureza: poço 899-6 com 166 mg/l, poço 900-10 com 188 mg/l e fonte 900-01 com 136 mg/l.

Da mesma maneira que os teores de TSD, os teores de dureza parecem estar refletindo nessas áreas a influência da mistura das águas do aquífero Jandaíra com as águas menos duras do aquífero Barreiras a ele sobreposto, que apresentam Dureza Total mêdia de 43,20 mg/l (QUADRO 13, item 8.2-a), pois esses poços se localizam nas proximidades do contato entre as formações Jandaíra e Barreiras.

Outro fato observado é que alguns desses núcleos menos elevados coincidem com áreas de recarga do aquífero, denotando assim um processo de "endurecimento" dessas águas no sentido do fluxo.

- Áreas com teores relativamente mais elevados

a) *Núcleos litorâneos*

- . sul e sudeste de Tibau: poço 824-22, com 4116 mg/l, 824-23 com 3224 mg/l, 824-14 com 2644 mg/l e 824-12 com 2141 mg/l;
- . sudeste de Macau: poço 898-3 com 4158 mg/l, 898-135 com 4177 mg/l, 898-192 com 3995 mg/l e 898-135 com 4177 mg/l;
- . sul de Guamarê: poço 899-89 com 6187 mg/l;
- . sudoeste de São Bento do Norte: poço 899-119 com 3244 mg/l;
- . sudeste de São Bento do Norte: poço 900-95 com 2552 mg/l;
- . sudeste de Pedra Grande: poço 900-83 com 2083 mg/l.

O aumento de dureza total identificado nos poços da orla marítima pode ser explicado também pela mistura de águas marinhas com as águas do aquífero, através de condutos abertos pelos processos de carstificação, provavelmente desenvolvidos ao longo das zonas de falha mapeadas.

A isolinha de 1000 mg/l estaria limitando grosseiramente a área de influência marinha.

b) *Núcleos interiores*

b.a) *Porção ocidental da bacia*

- . a noroeste de Mossorô: poço 896-162 com 2682 mg/l;
- . Mossorô: poço 897-18 com 2004 mg/l;
- . a noroeste de Dix-Sept. Rosado: poço 896-64 com 2374 mg/l e 896-12 com 2371 mg/l.

b.b) *Porção central da bacia*

- . Alto do Rodrigues: poço 898-162 com 2962 mg/l e 898-169 com 4586 mg/l;
- . a noroeste de Afonso Bezerra: poço 898-24 com 2431 mg/l;
- . vale do rio Mulungu: poço 898-184 com 2432 mg/l;

b.c) *Porção oriental da bacia*

- . a norte de Pedro Avelino: poço 899-70 com 3677 mg/l;
- . a sudeste de Parazinho: poço 900-166 com 2522 mg/l, 900-44 com 2236 mg/l, 900-36 com 2162 mg/l e 900-26 com 1056 mg/l.

Como já explanado anteriormente, esses poços apresentam também altos teores de cloretos, com valores da relação $rCl/rHCO_3$ anormalmente elevados, evidenciando um aumento exagerado na concentração salina que parece estar ligada, à reduzida velocidade de circulação das águas subterrâneas, associada aos tipos de solos pelos quais percolam as águas meteóricas antes de aportarem no aquífero. Nessa passagem pelo solo, se enriqueceriam em Mg e cederiam Na e K (BAZILEVICH, 1965).

Pode-se notar ainda a correspondência entre os altos teores de Dureza total e a mineralogia dos calcários, em comparando-se estes resultados com os mapas de distribuição de CaO e MgO (FIGURA 9, item 5.3.6) e mapa de áreas com dominância de calcários aflorantes de alta pureza (FIGURA 10, item 5.3.6). Verifica-se assim que os teores mais elevados de Dureza total estão sobre áreas de dominância de rochas carbonático-magnesianas, com $MgO \geq 2\%$ e os valores menos elevados, nas áreas onde $CaO > 53\%$ e $MgO < 2\%$.

8.4.3 Mapa de cloretos

Analisando-se a área como um todo (MAPA 19), observa-se que genericamente ocorre enriquecimento em cloretos de montante para jusante do fluxo subterrâneo, semelhantemente ao que ocorre com a tendência de enriquecimento em sais (MAPA 17). Essa relação pode ser identificada também na regressão $(\Sigma c_{at} + \Sigma a_n) \times Cl$, apresentada na FIGURA 38 (item 8.3.c). Assim, pode-se notar que os poços que geraram núcleos com concentrações relativamente anômalas no mapa de TSD são os mesmos dos núcleos anômalos do mapa de cloretos.

Os teores de cloretos variam de um mínimo de 27,8 mg/l até um máximo de 7043,4 mg/l, com média de 712,1 mg/l.

Semelhantemente ao mapa de TSD, os menores teores são en

contrados de uma maneira geral junto às zonas de recarga do aquífero e junto aos afloramentos dos sedimentos do Grupo Barreiras; os maiores teores se encontrando junto à orla atlântica que apresenta os teores máximos e também junto ao baixo vale dos principais rios, além de núcleos isolados dispersos no do mínio.

As áreas anômalas são a seguir analisadas.

- Áreas com teores relativamente mais baixos

a) *Porção ocidental da bacia*

- . a sudeste de Maxixe: poço 896-33 com 27 mg/l, 896-206 com 49 mg/l, 896-205 com 53 mg/l e 896-80 com 63 mg/l;
- . a noroeste de Apodi: poço 973-32 com 40 mg/l e 973-106 com 68 mg/l;
- . a sudeste de Gov. Dix-Sept Rosado: poço 974-23 com 48 mg/l;
- . a nordeste de Gov. Dix-Sept Rosado: poço 897-111 com 55 mg/l;

b) *Porção central da bacia*

- . flanco oeste das serras do Carmo e do Mel: poço 897-64 com 130 mg/l;
- . flanco sul das serras do Carmo e do Mel: poço 898-113 com 382 mg/l;
- . vale do rio Mulungu: poço 898-14 com 85 mg/l, 898-8 com 91 mg/l.

c) *Porção oriental da bacia*

- . noroeste de Pureza: poço 900-6 com 36 mg/l, 900-21 com 41 mg/l e 900-10 com 106 mg/l e 900-F1 (Fonte de Pureza) com 47 mg/l.

Quanto às prováveis causas da redução dos teores de clorotos nesses núcleos pode-se dizer que os poços das serras do Carmo e do Mel, os da porção extremo oriental da bacia e o de nordeste de Gov. Dix-Sept Rosado estariam sendo influenciados pela mistura de águas do aquífero Barreiras superposto, que têm concentrações de cloretos menos elevadas que as do aquífero Jandaíra (QUADRO 13, item 8.2.a), ao passo que os poços restantes provavelmente estejam em áreas de solos relativamente menos salinos.

- Áreas com teores relativamente mais altos

a) *Núcleos litorâneos*

- . sul e sudoeste de Tibau: poço 824-12 com 2334 mg/l, 824-14 com 2865 mg/l, 824-22 com 6613 mg/l e 824-23 com 3094 mg/l;
- . sudeste de Macau: poço 898-135 com 3491 mg/l, 898-192 com 3675 mg/l e 898-3 com 3485 mg/l;
- . sul de Guamaré: poço 899-89 com 5097 mg/l;
- . sudoeste de São Bento do Norte: poço 899-119 com 2583 mg/l;
- . sudeste de São Bento do Norte: poço 900-95 com 2932 mg/l; e
- . sudeste de Pedra Grande: poço 900-83 com 2151 mg/l.

b) *Núcleos interiores*

b.a) *Porção ocidental da bacia*

- . noroeste de Mossorô: poço 896-162 com 3117 mg/l;
- . oeste de Mossorô: poço 896-203 com 1527 mg/l;
- . em Mossorô: poço 897-15 com 3020 mg/l;
- . noroeste de Gov. Dix-Sept Rosado: poço 896-64 com 1521 mg/l e 896-59 com 1300 mg/l.

b.b) *Porção central da bacia*

- . sudoeste de Carnaubais: poço 897-211 com 1876 mg/l;
- . Alto do Rodrigues: poço 898-169 com 7043 mg/l; e
- . noroeste de Afonso Bezerra: poço 898-24 com 1930 mg/l.

b.c) *Porção oriental da bacia*

- . norte de Afonso Bezerra: 899-99 com 1484 mg/l;
- . norte de Pedro Avelino: 899-70 com 3049 mg/l; e
- . sudeste de Parazinho: 900-36 com 2151 mg/l.

Quanto às causas dos pontos anômalos com altos teores de cloretos poder-se-á supor as mesmas causas da existência de teores anômalos de sais, ou seja, na orla atlântica, pelo aumento do teor de cloretos segundo o sentido do fluxo subterrâneo e também por influência de contaminação por água marinha, que por ocasião das marés altas, adentrariam no continente tanto através dos vales dos grandes rios como através dos dutos de carstificação, desenvolvidos mais extraordinariamente junto às zonas

fraturadas. Observando-se o mapa pode-se dizer que a isolinha de 500 mg/l estaria limitando grosseiramente a zona de influência marinha.

Os núcleos interiores, também da mesma forma que no mapa de TSD, podem ser explicados pelos baixos gradientes hidráulicos, vinculados a associações de solos salinos da cobertura dos calcários nessas áreas.

8.4.4 Mapa de sulfatos

Os teores de sulfatos nas águas do aquífero Jandaíra variam de 2,4 mg/l até 2032,40 mg/l, com média de 250,79 mg/l.

A distribuição dos teores é regular por toda a área de domínio do aquífero (MAPA 20), havendo porém alguns núcleos com teores anormalmente elevados que se destacam nesse contexto, a saber:

a) Porção ocidental da bacia

- . sudoeste de Tibau: poço 824-14 com 797 mg/l;
- . noroeste de Gov. Dix-Sept Rosado: poços 896-12 com 1786 mg/l, 896-64 com 1271 mg/l e 896-201 com 1268 mg/l; e
- . flanco oeste das serras do Carmo e do Mel: poços 897-58 com 1758 mg/l, 897-52 com 1320 mg/l, 897-245 com 1052 mg/l e 897-50 com 1115 mg/l.

b) Porção central da bacia

- . noroeste de Carnaubais: poço 898-114 com 1047 mg/l;
- . Alto do Rodrigues: poço 898-169 com 1013 mg/l e 897-162 com 2032 mg/l;
- . sudeste de Pendências: poço 898-16 com 968 mg/l, 898-181 com 1032 mg/l e 898-184 com 869 mg/l.

c) Porção oriental da bacia

- . norte de Pedro Avelino: poço 899-70 com 980 mg/l;
- . sudoeste de Parazinho: poço 900-111 com 854 mg/l e 900-118 com 807 mg/l;
- . sudeste de Parazinho: poço 900-166 com 2025 mg/l, 900-78 com 907 mg/l, 900-44 com 1963 mg/l e 900-26 com 728 mg/l.

A localização do núcleo com teores elevados a noroeste de Gov. Dix-Sept Rosado deve estar associada à presença de evaporitos (gipsita) descritos nas proximidades daquela cidade (item 5.3.6) podendo-se presumir também essa correspondência a oeste da serra do Carmo e na porção oriental da bacia, a sul de Parazinho. Os teores elevados na porção central da bacia a oeste do rio Mulungu talvez sejam provocados pela presença de intrusivas básicas da Formação Macau.

Comparando-se o mapa de sulfatos (MAPA 20) com o mapa de dureza total (MAPA 18) pode-se notar uma correspondência entre os núcleos com teores elevados indicando a associação dos sulfatos com o Mg.

8.4.5 Mapa de índices de troca de bases (ITB)

Para a elaboração do mapa de intercâmbio iônico foi utilizado o índice de desequilíbrio (ID) entre elementos alcalinos e alcalinos terrosos, também denominado "Índice de Troca de Bases - ITB", calculado de acordo com as seguintes equações:

$$ITB (+) = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}$$

$$ITB (-) = \frac{rCl - r(Na + K)}{r(SO_4 + HCO_3 + NO_3)}$$

onde r significa que os teores são tomados em miliequivalentes por litro (meq/l).

Os valores assim calculados são apresentados na TABELA 14 (ANEXO B), onde os valores de ITB (+) e ITB (-) foram representados por ID₁ e ID₂, respectivamente.

A observação dos mapas de ITB (MAPA 21) e piezométrico (MAPA 14) e da TABELA 14 (ANEXO B), revela que de uma maneira geral os valores de ITB aumentam no mesmo sentido do fluxo, portanto em direção à costa e aos vales dos principais rios e outros exutórios, , enquanto que a relação $r(Na + K)/r(Mg + Ca)$ diminui acentuadamente. Pode-se notar que há uma faixa contínua ao longo da costa, com valores de ITB maiores do que 0,5, que na região a oeste de Pedra Grande e Parazinho avança para o inte

rior da bacia, que corresponde a uma das áreas de dominância de dolomitos (FIGURA 11, item 5.3.6).

Parece evidente portanto um processo de troca de bases de endurecimento das águas, ou seja, troca de elementos alcalinos (Na e K) da água, por alcalinos terrosos (Ca e Mg) da rocha. Tal fato é concordante com o comportamento da dureza total (MAPA 18) que como visto, é crescente de montante para jusante do fluxo.

Valores negativos ou tendendo a zero podem ser observados ora nas proximidades de vales, ora em áreas de recarga, porém sempre em áreas onde o gradiente hidráulico é fraco, o que provavelmente esteja evidenciando mudanças litológicas do meio aquífero (maior teor de terrígenos junto aos vales).

Na parte leste da área, é visível a influência das águas do aquífero Barreiras, conforme mostra a tendência dos valores das isolinhas, ao se tornarem mais negativos à medida que se aproximam do contato entre a Formação Barreiras e a Formação Jandaíra, evidenciando um processo de abrandamento das águas.

8.4.6 Mapa de índices de estabilidade do carbonato de cálcio (IE)

A capacidade de ataque químico de uma água, ou seja, o seu caráter incrustante ou agressivo (corrosivo), é um importante fator a ser considerado quando do manejo dos recursos hídricos. O grau de incrustação ou agressividade da água pode inviabilizar a implantação de projetos ou aumentar sensivelmente os seus custos face à necessidade de adequá-la ao uso a que se destina, pois os processos e tecnologias de tratamento de água ou de proteção contra a corrosão são em geral onerosos.

No presente trabalho, as águas subterrâneas do aquífero Jandaíra foram classificadas de acordo com a sua tendência de ataque químico, através do Índice de Estabilidade do Carbonato de Cálcio, conforme definido por RYZNAR (1944), como expresso pela seguinte equação (ver também item 8.5.4)

$$IE = 2pH_s - pH$$

onde:

IE = índice estabilidade do CaCO_3

pH = Potencial hidrogeniônico da água

pHs = pH de saturação do CaCO_3

Segundo esse autor, de uma maneira geral as águas com índice (IE) maior do que 7,0 são consideradas agressivas; com valores entre 6,0 e 7,0 têm caráter duvidoso e com valores menores do que 6,0 são incrustantes, ou seja, precipitam o carbonato de cálcio.

Assim, com base nos dados contidos na TABELA 14 (ANEXO B) foi elaborado o mapa de valores do índice de estabilidade do carbonato de cálcio segundo RYZNAR (MAPA 22).

Pode-se notar que de uma maneira geral as águas têm caráter francamente incrustante na maior parte da área de domínio do aquífero e, conforme mostram as linhas de isovalores, geralmente estes são decrescentes no sentido do fluxo, evidenciando assim que o caráter incrustante aumenta no mesmo sentido do fluxo. Os menores valores estão localizados na porção ocidental e central da bacia, ao lado mesmo dos maiores valores.

Comparando-se o mapa piezométrico (MAPA 14) com o mapa de IE (MAPA 22) pode-se notar que genericamente os núcleos de valores mais elevados de IE estão localizados em áreas preferenciais de recarga, havendo porém exceções, como por exemplo a noroeste de Mossoró. Esses poços estão geralmente localizados em áreas de fracos gradientes hidráulicos e provavelmente estejam refletindo a baixa velocidade de circulação das águas nessas áreas. Deve-se esperar portanto, maior intensidade nos processos de carstificação nessas regiões devido ao caráter agressivo das águas.

Nota-se também uma tendência geral de aumento de agressividade (IE mais elevado) à medida que os poços estejam mais próximos do contacto com os sedimentos do Grupo Barreiras, como ocorre, por exemplo, nos poços 896-100, 897-50 e 60 e 898-3 e 14 nas porções ocidental e central da bacia e também nos poços 900-6 10-32 e 80, no extremo leste do domínio.

Nos poços da porção ocidental e central da bacia, o aumento de IE é motivado pelos baixos valores da alcalinidade total, e nos poços do extremo oriental, pela redução da salinidade (TSD). (ver também item 8.5.4).

8.4.7 Mapa de diagramas de Stiff

A análise do mapa de diagramas de Stiff (MAPA 23), elaborado com base nos dados contidos nas TABELAS 11 e 12 (ANEXO B) evidencia os seguintes aspectos:

- . as águas cloretadas que representam a grande maioria, distribuem-se regularmente por toda a área porém, aquelas relativamente mais concentradas em cloretos, via de regra se localizam junto aos vales dos principais rios; no extremo noroeste da área estão junto à costa atlântica e na porção oriental da bacia estão preferencialmente próximas a áreas estruturalmente falhadas;
- . as águas bicarbonatadas ocorrem com distribuição regular na porção oeste da Bacia, até o vale do rio do Carmo; na porção central, surgem somente no vale do rio Mulungu e na porção oriental, nos arredores da cidade de Jandaíra. Para leste, sua ocorrência se restringe à região da Serra Verde (área da Serra dos Macacos). A comparação dessas observações com o mapa litológico elaborado por MENOR et alii (1980) (FIGURA 8) leva a admitir que as águas bicarbonatadas estão associadas, principalmente às ocorrências de calcários lajeados e compactos;
- . as ocorrências de águas sulfatadas são bastante restritas, sendo encontradas em pontos dispersos na área estudada. Em alguns locais, como por exemplo, a noroeste da cidade de Gov. Dix-Sept Rosado, esse tipo de água estaria ligado à presença de evaporitos (item 5.3.6). Nesse sentido é mister destacar ainda as ocorrências de águas sulfatadas a oeste da Serra do Carmo, a sudeste de Alto do Rodrigues e na área que se estende de sudoeste a sudeste da cidade de Parazinho.

8.5 Qualidade das águas do aquífero Jandaíra

8.5.1 Introdução

O estudo da adequação das águas do aquífero Jandaíra tem um caráter genérico e visa, fundamentalmente, a fornecer algumas informações para eventuais e futuros planos de aproveitamento desses recursos para consumos básicos gerais, não se tratando de caracterizações específicas.

Os aspectos de qualidade da água aqui analisados se referem às principais características químicas e físicas da água desse aquífero, que definem a sua adequação ao consumo humano, e aqueles considerados mais importantes, quando se pretende utilizá-la em atividades agropecuárias e industriais.

Os aspectos de qualidade da água do aquífero Jandaíra somente puderam ser analisados sob o ponto de vista dos parâmetros químicos e alguns parâmetros físicos das águas amostradas, uma vez que a pesquisa de pesticidas, análises bacteriológicas e radioativas dessas águas não foram solicitadas pelas entidades executoras dos estudos hidrogeológicos citados no item 8.1.

8.5.2 Adequação para Consumo Humano

As características físicas e químicas de águas para consumo humano são regulamentadas, em diversos países, através de legislação específica, onde geralmente são estabelecidos limites máximos desejáveis e admissíveis para cada propriedade ou constituinte químico. Em geral as regulamentações são modificadas e aperfeiçoadas à medida em que as técnicas analíticas permitam que sejam estabelecidas formas mais precisas de controle de qualidade e de determinação dos parâmetros, índices e teores dos constituintes químicos da água.

Para a análise da adequação das águas do aquífero Jandaíra destinada ao consumo humano foram adotadas as especificações da legislação abaixo discriminada.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT: PB-19/1959;
- Resolução 25/1976 - Ministério da Saúde - CNNPA-Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (Águas Minerais);
- Decreto 79367 de 09/03/77. Portaria 56 BSB de 13/03/77, e

- Organização Mundial de Saúde - OMS. 1963.

Os teores dos diferentes íons ou propriedades foram comparados com os teores recomendados na legislação brasileira e nos casos em que a mesma se revelou deficiente foram comparados com os padrões da OMS.

Feitas essas considerações, observa-se então, com base nos dados contidos nas TABELAS 10 a 13 (ANEXO B) e nos histogramas hidroquímicos (item 8.2.2) os seguintes aspectos:

- *total de sais dissolvidos* (TSD) - (Portaria 56 BSB de 13/3/77: valor máximo permissível 1000 mg/l).

Os valores de TSD foram calculados a partir da condutividade elétrica medida em laboratório, através da equação geral:

$$CE (\mu\text{mho/cm}) \approx 1,5 \text{ TSD.}$$

Pode-se notar que das 239 amostras, 148 delas (69%) ultrapassam o valor máximo permissível de salinidade.

Deve-se salientar contudo que os teores observados em águas consumidas pela população do nordeste brasileiro são às vezes muito mais elevados que aqueles prescritos na legislação federal. Considerando-se a situação de carência de água nas áreas de domínio do aquífero Jandaíra, nas quais a população local já está inclusive habituada ao consumo de águas de salinidade superior a 1000 mg/l e muitas vezes a 1500 mg/l, poder-se-ia adotar este último valor como teor máximo tolerável.

- *pH* (Resol. 25/1976: 4,0 - 9,0)

Como podemos verificar, todos os valores de pH (239 amostras) estão dentro dos padrões de potabilidade admissíveis.

- *Dureza Total* (ABNT: máx. tolerado 200 mg/l em equivalente de CaCO_3).

Das 239 amostras analisadas, 228 delas, ou seja, 95% apresentam dureza acima do teor máximo tolerado.

- *Alcalinidade Total* (OMS: permitido até 370 mg/l em equivalente CaCO_3).

Entre as 239 amostras analisadas, 202 (84%) apresentam teores de alcalinidade inferiores ao teor permitido.

- *Sódio*

Embora não existam recomendações de teor máximo para Sódio, esse teor fica indiretamente limitado pelo conteúdo total de sólidos dissolvidos (TSD), pois segundo o COMMITTEE ON WATER QUALITY CRITERIA (1972), pessoas que sofrem de hipertensão, no caso de dietas rígidas devem consumir águas com um máximo de 20 mg/l de Sódio e no caso de dietas moderadas, até no máximo 270 mg/l de Sódio; porém, águas com teores superiores têm valor de TSD bastante elevado não sendo consideradas águas potáveis.

Considerando-se então a concentração máxima permitida de 270 mg/l, de Na^{+1} , pode-se notar que apenas 71 (30%) das 239 amostras são insatisfatórias para consumo humano por excederem ao teor tolerável.

- *Magnésio* (OMS: permitido até 50 mg/l; excessivo 150 mg/l de Mg^{+2}).

Nota-se que apenas 54 (23%) das 239 amostras apresentam teores inferiores ao permitido e 56 amostras (23%) superiores ao teor excessivo estando portanto a maioria delas, 129 amostras (54%) com teores entre o permitido e o excessivo.

- *Cálcio* (OMS: permitido até 75 mg/l; excessivo 200 mg/l de Ca^{+2})

Nota-se que apenas 46 (19%) das 239 amostras apresentam teores inferiores ao permitido e 74 amostras (31%) superiores ao teor excessivo. A maioria delas, 119 amostras (50%) portanto, tem teores entre o valor permitido e o excessivo.

- *Ferro total* (Portaria 56 BSB de 13/03/77: máximo permissível 1,00 mg/l de Fe).

Analisando-se os dados pode-se notar que apenas 15 (9%) das 160 amostras apresentam teores superiores ao valor máximo permi-tido.

- *Fluoretos* (Portaria 56 BSB de 13/03/77: intervalo tolera-do 0,6 - 0,8 mg/l de F^{-})

O teor recomendado de Flúor em águas para consumo humano é dependente da média das temperaturas máximas diárias do ar da região. Tendo em vista as características climáticas da área

estudada (item 4.3), pode-se admitir um teor mínimo recomendado de 0,6 mg/l e máximo de 0,8 mg/l (ótimo 0,7 mg/l) com base na correspondência estabelecida por aquela Portaria (para $26,4 < t^{\circ}\text{C} < 32,5$). Assim posto, verifica-se então, que das 98 amostras, 75 delas (77%) possuem teores inferiores ao mínimo recomendado e 19 amostras (19%) apresentam teores superiores ao recomendado. Apenas 4 amostras (4%) se situam dentro do intervalo desejado para teores de Flúor.

- *Cloretos* (Portaria 56 BSB de 13/03/77: máximo desejável 200 mg/l; máximo permissível 600 mg/l).

Pela análise dos dados pode-se notar que apenas 71 (30%) das 239 amostras apresentam teores inferiores ao valor máximo desejável; 80 amostras (33%) apresentam teores superiores ao máximo permissível e 88 amostras (37%) naquele intervalo.

- *Sulfato* (ABNT: máximo tolerado 250 mg/l).

Quanto aos sulfatos, observa-se que das 226 amostras, 62 delas (27%) apresentam teores superiores ao teor máximo tolerado.

- *Bicarbonato* (OMS: permitido 300 mg/l de HCO_3^{-1})

O valor de bicarbonatos permitido pela OMS foi calculado a partir da alcalinidade de bicarbonatos, cujo teor permitido é de 250 mg/l.

Nota-se que 123 (51%) das 239 amostras apresentam teores de bicarbonatos superiores ao permitido.

- *Carbonatos* (OMS: permitido 70mg/l).

O valor de carbonatos permitido pela OMS foi calculado a partir da alcalinidade de carbonatos, cujo teor permitido é de 120 mg/l.

Das 238 amostras apenas 1 (0,4%) apresenta teor de carbonato superior ao permitido.

- *Nitratos* (Portaria 56 BSB de 13/03/77: máximo permissível 45 mg/l de NO_3^{-1}).

Entre as 218 amostras analisadas, 41 delas (19%) apresentam teores superiores ao máximo permissível, e portanto impróprias ao consumo humano.

Teores elevados de nitrato geralmente revelam processo de poluição das águas por substâncias orgânicas nitrogenadas. Na região estudada os teores elevados de nitrato estão presentes em áreas restritas, não se tratando portanto de processo generalizado de poluição.

Embora alguns poços situados em centros urbanos apresentem teores de nitratos relativamente elevados, todas as amostras que excedem ao máximo permissível correspondem a poços localizados na zona rural, nos campos de pastagem ou nas proximidades de currais. A análise das instalações, dos perfis litológicos e dos revestimentos desses poços leva a supor os seguintes mecanismos de poluição:

- ausência de guarnecimento por tampa na boca do poço, permitindo o acesso direto às águas subterrâneas, de material orgânico (restos vegetais, insetos e pequenos mamíferos);
- em muitos casos a boca do poço se situa no mesmo nível ou mesmo abaixo da superfície do terreno, o que permite o escoamento de águas de superfície eventualmente ricas em matéria orgânica, para o interior do poço;
- a freqüente ausência de cimentação de proteção do espaço anular entre a parede do furo e o revestimento de boca, favorecendo a infiltração de águas superficiais;
- como os calcários muitas vezes permitem instalações de bombeamento em furos sem total revestimento, como se trata de meio fissurado, pode permitir o acesso rápido de águas de superfície eventualmente poluídas, ao nível freático, principalmente quando estes são rasos, sem haver a desejável eliminação natural do poluente;
- a combinação dos diferentes fatores acima citados, aliada à rápida circulação através de zonas carstificadas, propiciam condições favoráveis à poluição do aquífero;

O resumo das considerações sobre a potabilidade das águas do aquífero Jandaíra considerando-se apenas os padrões extremos de potabilidade nas diferentes normas são apresentados no QUA DRO 19 a seguir.

Parâmetros Considerados	Nº de obs.	Teores Considerados (mg/l)		Frequência das amostras em relação aos padrões (%)	
		Mínimo Desejável	Máximo Tolerado	Satisf.	Insatisf.
pH	239	4,0	9,0	100	0,0
Dureza Total (mg/l de CaCO_3)	239	-	200	5	95
Alcalinidade Total (mg/l de CaCO_3)	239	-	370	84	16
Na (mg/l de Na^{+1})	239	-	270	70	30
Magnésio (mg/l de Mg^{+2})	239	-	150	77	23
Cálcio (mg/l de Ca^{+2})	239	-	200	50	50
Ferro Total (mg/l de Fe)	160	-	1,0	91	9
Fluoretos (mg/l de F^{-1})	98	0,6	0,8	4	96 *
Cloretos (mg/l de Cl^{-1})	239	-	600	67	33
Sulfatos (mg/l de SO_4^{-2})	226	-	250	73	27
Nitratos (mg/l de NO_3^{-1})	218	-	45	81	19
Bicarbonatos (mg/l de HCO_3^{-1})	239	-	300	49	51
Carbonatos (mg/l de CO_3^{-2})	238	-	70	99	0,4
TSD (mg/l)	239	-	1000	38	62

* 77% < 0,6; 19% > 0,8

QUADRO 19 - Frequência das amostras em relação aos padrões de potabilidade.

Pode-se facilmente notar então que, em se baseando apenas na Dureza total, onde 95% das amostras excedem ao teor tolerado, as águas do aquífero Jandaíra, sem tratamento prévio, são impróprias ao consumo humano. Para torná-las adequadas, seria necessário tratamento para abrandamento das mesmas. Ainda, sob o ponto de vista das concentrações de Flúor, onde 77% das amostras apresentam teores inferiores e 19% superiores ao intervalo recomendado, seria conveniente se proceder a um controle do seu teor e efetuar tratamento para atingir o intervalo desejável para a região, ou seja, entre 0,6 e 0,8 mg/l de F^{-1} .

8.5.3 Adequação para consumo agropecuário

8.5.3.1 Adequação para consumo agrícola

A adequação das águas para irrigação é determinada pela concentração de determinados constituintes específicos tais como os boratos, sulfatos e cloretos e também dos sais dissolvidos, correlacionáveis à condutividade elétrica, que terá seus efeitos sobre os vegetais e sobre os solos, merecendo portanto estudos detalhados inerentes a cada espécie de planta no que diz respeito à sua tolerância aos sais, ao seu ciclo de vida, etc., devendo-se levar também em consideração as características climáticas e do próprio solo, tais como a constituição mineralógica, permeabilidade, textura, topografia e aeração.

Quase todos os tipos de águas que têm sido mundialmente utilizadas para irrigação, têm sua condutividade elétrica menor do que 2250 $\mu\text{mho/cm}$. Ocasionalmente foram usadas águas de maior condutividade, mas salvo raras exceções, as colheitas obtidas não foram satisfatórias. Águas cuja condutividade elétrica varia entre 750 e 2250 $\mu\text{mho/cm}$ são comumente utilizadas obtendo-se com elas crescimento adequado das plantas, sempre que haja um bom manejo da terra e uma drenagem eficiente; no entanto as condições de salinização aparecerão se a lavagem e a drenagem dos terrenos não forem adequadas.

Em geral, águas cuja condutividade elétrica é menor do que 750 $\mu\text{mho/cm}$ são satisfatórias para irrigação no que diz respeito aos sais dissolvidos, embora algumas culturas sensíveis possam ser afetadas adversamente mesmo quando se utilizam águas com condutividade elétrica variando entre 250 e 750 $\mu\text{mho/cm}$.

No presente trabalho, para a classificação das águas para fins de irrigação, foi empregado o método do United States Salinity Laboratory (USSL). Esse método leva em consideração a condutividade elétrica da água e a Relação de Adsorção de Sódio (RAS).

A condutividade elétrica é dependente da concentração total de sais dissolvidos (item 8.3) e foi medida em laboratório (TABELA 10, ANEXO B); e a RAS é calculada através da equação: $RAS = rNa/[r(Ca+Mg)/2]^{1/2}$ (TABELA 14, ANEXO B).

Assim, segundo os critérios do USSL, as águas do aquífero Jandaíra foram classificadas conforme mostrado no QUADRO 20 a seguir:

Classe	Frequência	
	Quantidade de amostras	%
C ₃ S ₁	124	52
C ₄ S ₂	57	24
C ₄ S ₁	26	11
C ₄ S ₃	15	6
C ₂ S ₁	12	5
C ₄ S ₄	3	1
C ₃ S ₂	2	1

QUADRO 20 - Frequência das classes de água para fins de irrigação.

Da observação dos valores desse quadro, pode-se verificar que a maioria das amostras (52%) pertence à categoria C₃S₁, representando águas com alto risco de salinização e baixo risco de Sódio, seguindo-se ainda um grupo expressivo (24%) na categoria C₄S₂, que representa riscos muito altos de salinização e risco médio de Sódio.

O QUADRO 21 , a seguir apresenta as frequências das amostras quando considerados separadamente os riscos de salinização, avaliados através dos valores de condutividade elétrica, e dos riscos de Sódio, avaliados através da Razão de Adsorção de Sódio (RAS).

Categorias	Frequência	
	Quantidade de amostras	%
Salinidade		
C ₂	12	5
C ₃	126	53
C ₄	101	42
RAS		
S ₁	162	68
S ₂	59	25
S ₃	15	6
S ₄	3	1

QUADRO 21 - Frequência das amostras por categorias de salinidade e de RAS.

Observando-se os dados constantes desse quadro pode-se notar que:

- quanto à significância das categorias da salinidade, a maioria das águas (53%) se encontra dentro da categoria C₃, que representa águas de salinidade alta, podendo ser aplicadas somente em culturas muito tolerantes aos sais e em solos com boa drenagem, devendo-se efetuar o controle de salinidade dos solos, mesmo naqueles com drenagem adequada. Segue-se a classe C₄ (42%) que representa águas de salinidade muito alta, não sendo adequadas para irrigação comum. O seu uso somente é aconselhável em culturas tolerantes aos sais e em solos de alta permeabilidade e boa drenagem, devendo contudo ser utilizada a água em excesso a fim de promover a lixiviação dos mesmos;
- quanto à significância das categorias de risco de Sódio, a maioria das águas (68%) está na categoria S₁, ou seja, são águas que possuem baixa RAS, com poucas possibilidades de alcançar concentrações elevadas de Sódio intercambiável, podendo ser utilizadas para irrigação em quase todos os tipos de solos, atendidas porém a sensibilidade de determinadas culturas ao

Sódio. Segue-se depois um menor grupo (25%) na categoria S_2 , que representam águas com valores médios de RAS, podendo apresentar perigo quando em condições deficientes de lixiviação em solos de textura fina com alta capacidade de troca de cá tions.

Assim sendo, a utilização das águas do aquífero Jandaíra para irrigação fica limitada, na maioria dos casos, pela categoria de salinidade, exigindo bastante cautela na sua utilização, devendo-se levar em consideração principalmente a resistência das culturas aos sais, a constituição, textura e drenagem dos solos, além dos grandes volumes de água que devem ser utilizados para acelerar a lixiviação. Nota-se, por outro lado, que todas as amostras apresentam valores de carbonato de sódio residual (CSR) negativos (TABELA 14, ANEXO B), indicativos da não existência de condições favoráveis à formação do carbonato de sódio, altamente prejudicial à estrutura e textura dos solos e também aos cultivos.

A distribuição espacial das classes de água do aquífero Jandaíra para irrigação, conforme classificação do USSL, está representada no MAPA 24.

Da observação desse mapa pode-se depreender que:

- há nitidamente um zoneamento das áreas das classes menos salinas para as mais salinas, crescente em direção ao mar, a partir do contacto da Formação Jandaíra com a Formação Açu, refletindo o enriquecimento em sais no sentido do fluxo subterrâneo;
- a área de domínio das águas da classe C_3S_1 é praticamente contínua em todo o domínio do aquífero, com núcleos de classes de salinidade mais alta dispersos no seu interior. Exceção a esse comportamento é feita na porção oriental da Bacia, onde ocorre uma grande faixa da classe C_4S_1 de direção NW-SE, desde sul de São Bento do Norte até norte de João Câmara, quebrando a continuidade da faixa C_3S_1 que se reinicia depois na área de Parazinho.
- as águas da classe C_2S_1 , menos salinas e com baixo risco de Sódio se localizam no extremo oriente do domínio da área estudada, junto ao contato dos calcários Jandaíra com os sedi

mentos do grupo Barreiras, cujas condicionantes devem ser a influência de mistura de águas dos dois aquíferos e índice pluviométrico mais elevado nessa área (item 4.2);

- além de núcleos isolados de águas de classes com maior risco de salinidade e riscos de Sódio no interior (C_4S_3) e no litoral (C_4S_4) nota-se um núcleo de aumento de risco em Sódio (C_4S_3) a norte de Pedra Grande (poços 900-95 e 900-108) com alto teor em Sódio, talvez por influência de águas marinhas, uma vez que a relação $rCl/rHCO_3$ é relativamente alta (15 e 8, respectivamente). O mesmo fenômeno pode ser suposto para explicar o aumento de risco em Sódio no núcleo de Pendências.

8.5.3.2 Adequação para consumo animal

O estabelecimento de critérios de qualidade da água para consumo animal é bastante complexo, não havendo até o presente, padrões que possam ser genericamente adotados uma vez que os mesmos são influenciados pelas espécies dos animais, suas variedades, clima, regime alimentar, sexo, condicionamento físico, etc. Em muitos países as experiências ainda prosseguem com o objetivo de se determinar os "limites aceitáveis" dos constituintes químicos das águas para dessedentação animal.

Segundo LOGAN (1965) de uma maneira geral o gado deve consumir água com menos de 5000 mg/l de sais dissolvidos (TSD). Na falta de uma classificação universal das águas para consumo animal, foi utilizada a do Estado de Montana (EEUU) que parece ser apropriada para uso geral (LOGAN, op. cit.). Segundo esses padrões as águas do aquífero Jandaíra são classificadas conforme consta no QUADRO 22 a seguir.

Classe	TSD (mg/l)	Frequência	
		Quantidade de amostras	%
Boa	até 2500	179	75
Satisfatória	2500 até 3500	29	12
Pobre	3500 até 4500	16	7
Insatisfatória	acima de 4500	15	6

QUADRO 22 - Classificação das águas para consumo animal

Observa-se assim que apesar dos elevados teores de TSD, a maioria das amostras (75%) se classifica como boa para consumo animal e apenas uma pequena parcela delas (6%) é insatisfatória.

Segundo LOGAN (1965) diz-se que o gado do nordeste do Brasil bebe muito bem água com concentração de 42 000 mg/l de sais. Segundo o COMMITTEE ON WATER QUALITY CRITERIA (1972) há muitas indicações de que o gado não se desenvolve a contento quando se dessedenta com água de alto teor salino. Assim sendo, mesmo as águas da classe "insatisfatória" poderiam ser apenas excepcionalmente utilizadas para dessedentação animal.

8.5.4 Adequação para consumo industrial

A adequação das águas para fins industriais é bastante complexa, uma vez que depende do tipo de indústria e dos processos de industrialização utilizados. Esses fatores fazem com que se ja considerada uma variedade muito ampla de constituintes químicos e aspectos físico-químicos da água para suprimento das indústrias. Por outro lado, técnicas modernas de tratamento de água permitem que praticamente qualquer tipo de água possa ser tratada para adquirir as características desejáveis para um determinado uso. Os custos desse tratamento porém serão tanto mais elevados quanto maiores as diferenças entre as características da água de suprimento e as recomendadas para utilização no processo industrial específico. De uma maneira geral o custo do tratamento das águas representa apenas uma pequena parcela do custo final dos produtos, tornando-se geralmente viáveis mesmo os processos mais onerosos de tratamento.

Na TABELA 24 (ANEXO B) são apresentados diversos tipos de indústrias e os teores limites de alguns constituintes presentes nas águas normalmente adotados pelas mesmas.

Da comparação dos teores constantes da TABELA 10, ANEXO B, com os teores-padrão constantes da TABELA 24 do mesmo anexo onde se destacam marcadamente os teores excessivos de TSD e de Dureza total, depreende-se que as águas do aquífero Jandaíra não podem ser utilizadas para fins industriais em seu estado natural, exigindo para tanto, tratamentos prévios.

Dentre as diversas propriedades que devem ser analisadas nas águas que se destinam a fins industriais, encontra-se a capa

cidade de ataque químico, que revela o seu caráter incrustante, neutro ou agressivo (corrosivo). Sob este aspecto a TABELA 14, ANEXO B, apresenta os valores do índice de estabilidade do carbonato de cálcio, conforme definido por RYZNAR (1944) que fornece indicações sobre a capacidade de ataque químico das águas em condições naturais.

O índice de estabilidade do carbonato de cálcio (IE) foi definido por Ryznar, pela expressão:

$$IE = 2 \text{ pHs} - \text{pH}, \text{ onde:}$$

IE - índice de estabilidade do carbonato de cálcio;

pH - potencial hidrogeniônico da água em consideração;

pHs - potencial hidrogeniônico de saturação teórica (pH de saturação ou pH de equilíbrio do carbonato de cálcio).

O índice de estabilidade do carbonato de cálcio conforme definido por Ryznar pode ainda ser calculado através da expressão: $IE = S - C - \text{pH}$, onde S e C são obtidos a partir de ábacos, pois S é função da concentração total de sais dissolvidos (TSD) e C é função da alcalinidade total e da concentração do íon cálcio.

No QUADRO 23 a seguir, são apresentadas as frequências das águas amostradas segundo o valor do IE, classificadas conforme proposição de Custódio (in — & LLAMAS, 1976 p. 1765), baseado em Ryznar, 1944).

IE	Caráter da água	Frequência	
		Quantidade de amostras	%
4,0 - 5,0	muito incrustante	7	3
5,0 - 6,0	moderadamente incrustante	96	40
6,0 - 7,0	pouco incrustante ou agressiva	107	45
7,0 - 7,5	agressiva	17	7
7,5 - 9,0	francamente agressiva	11	4
> 9,0	muito agressiva	1	0,4

QUADRO 23 - Frequência do caráter das águas em relação aos valores do índice de estabilidade do carbonato de cálcio (IE).

Como se pode observar, a maior parte das amostras (45%) , apresenta um caráter anfótero, ou seja, pode ser incrustante ou agressiva dependentemente das condições de utilização da mesma onde a temperatura é uma variável importante. Segue-se em importância, com a frequência de 40%, a categoria "moderadamente incrustante". Nota-se assim que praticamente o caráter incrustante, com uma porcentagem total de 88%, sobrepuja o caráter agressivo, com 11,4%.

Assim sendo, pode-se prever que as águas do aquífero Jandaíra, ao serem aduzidas por canalizações, possam provocar a precipitação de carbonato de cálcio e portanto cuidados especiais devem ser tomados quando da utilização dessas águas, principalmente no que concerne aos usos em caldeiras e produção de vapor.

O comportamento espacial das águas do aquífero Jandaíra no que se refere ao seu caráter incrustante ou agressivo pode ser observado no mapa de IE (MAPA 22), cuja descrição foi apresentada no item 8.4.6.

Além desses aspectos, em águas para destinação industrial deve-se considerar ainda o conteúdo de sílica, fosfatos, gás sulfídrico, oxigênio dissolvido, manganês, etc. porém, geralmente tais constituintes somente são analisados dependentemente do interesse em um determinado uso da água em processos industriais específicos, não tendo sido pesquisados, conforme revelam os laudos das análises utilizados nesta monografia.

9 SITUAÇÃO ATUAL DA CAPTAÇÃO NO AQUIFERO JANDAÍRA

9.1 Introdução

Para a avaliação da captação e exploração atual das águas do aquífero Jandaíra foram utilizados os dados constantes do Inventário do IPT (IPT, 1982) por se tratar do mais recente cadastramento realizado abrangendo a quase totalidade da área de domínio do aquífero.

A grande extensão de domínio do aquífero Jandaíra e a facilidade de acesso ao aquífero, por ser ele do tipo freático e portanto acessível através de poços escavados (cacimbas) e poços tubulares relativamente rasos, cuja perfuração pode ser feita por processo percussivo, proporcionam a existência de um grande número de obras de captação das suas águas, quer seja através de poços tubulares, quer seja através de cacimbas e fontes. Para a avaliação aqui apresentada porém, foram utilizadas apenas as informações sobre poços tubulares.

Dos 1300 poços tubulares no Estado do Rio Grande do Norte até 1979 cadastrados pelo IPT (IPT, 1982) contou-se com 853 poços (65,6%) construídos para captação de água do aquífero Jandaíra (FIGURA 45). Infelizmente uma parcela razoável desses poços não dispõe de dados técnicos e informações completas, dificultando os levantamentos e análises feitas e que são apresentados nos itens que se seguem.

9.2 Evolução das Captações no Aquífero Jandaíra

Com o objetivo de avaliar a tendência de aproveitamento das águas do aquífero Jandaíra, procedeu-se a um levantamento da quantidade de poços tubulares anualmente construídos. Dos poços cadastrados, 70% possuíam informações sobre o ano da sua construção. A evolução das perfurações no período 1918 até 1979 está representada na FIGURA 46 a seguir.

Pode-se observar que até 1930 praticamente não houve acréscimos no ritmo das perfurações. Provavelmente tal fato tenha sido motivado tanto pela pequena demanda de água como pela falta de conhecimento hidrogeológico e estrutura inadequada das entidades perfuradoras, pela deficiente organização técnico-administrativa e equipe técnica. De 1930 até 1965 houve um pequeno in

FIGURA 45 - Poços construídos no Estado do Rio Grande do Norte no período de 1918/79 segundo os aquíferos (IPT, 1982).

cremento, praticamente nítido apenas no aquífero Jandaíra e que a partir de 1942 já é visível para todos os aquíferos daquele Estado. A partir de 1964 porém se torna notório o grande aumento no ritmo das perfurações que mantém essa tendência até o final do período analisado. Verifica-se também que a partir de 1970, com exceção do aquífero Açu, os aquíferos Jandaíra, Barreiras e Cristalino apresentam praticamente a mesma taxa de aumento anual. Esse fenômeno talvez possa ser explicado pela ação de dois fatores essenciais: o aumento natural da demanda e os investimentos públicos (federais e estaduais) e privados no setor, facilitados então pela atuação da SUDENE. Além desses fatores, presume-se que o avanço no conhecimento hidrogeológico da região e o aprimoramento das técnicas de perfuração tenham contribuído também para despertar maior interesse na utilização das águas subterrâneas.

FIGURA 46 - Evolução da construção de poços tubulares no Estado do Rio Grande do Norte no período 1918/79, segundo os aquíferos (IPT, 1982).

Observa-se ainda que esses impactos parecem atuar defasada_{mente} segundo os aquíferos, pois nota-se na FIGURA 46 que o incremento surge primeiramente no aquífero Jandaíra, seguido

ordenadamente pelos aquíferos Barreiras, Cristalino e Açu. Os fatores que causam essa antecedência do aquífero Jandaíra provavelmente sejam a sua extensa área, o clima semi-árido em seu domínio com praticamente inexistência de outra alternativa de abastecimento, e a maior facilidade de construção de obras de captação. Tais fatores sobrepõem mesmo a alta densidade demográfica, no caso da área de domínio do aquífero Barreiras (a baixa densidade demográfica na área do aquífero Cristalino) e as dificuldades técnicas e econômicas de acesso ao aquífero Açu.

Na FIGURA 47 a seguir está representada a evolução da construção de poços conforme as iniciativas privada e pública no período 1918/1979 naquele Estado.

FIGURA 47 - Evolução da construção de poços tubulares no Estado do Rio Grande do Norte, no período 1918/79, conforme iniciativas particular ou pública (IPT, 1982).

Pode-se notar que a partir de 1970 praticamente ambas as iniciativas têm tido as mesmas taxas de incremento anual e que a iniciativa pública sobrepujou a particular apenas no período 1935/50, correspondente provavelmente às medidas governamentais de combate à forte estiagem que se abateu sobre o nordeste no início da década de 1930.

Na FIGURA 48 estão representados ainda os poços construídos até 1979 no Estado do Rio Grande do Norte, segundo o aquífero captado, conforme seja de iniciativa privada ou pública.

FIGURA 48 - Poços construídos até 1979 no Estado do Rio Grande do Norte, por aquífero, segundo as iniciativas particular ou pública (IPT, 1982).

Verifica-se que no caso do aquífero Jandaíra, 615 poços (72%) entre os cadastrados são de propriedade particular e que, apenas no caso deste aquífero ocorre uma predominância de poços para abastecimento particular; nos aquíferos Barreiras e Cristalina ocorre o inverso, e no aquífero Açu essas iniciativas se igualam.

9.3 Características Construtivas dos Poços Tubulares

A quase totalidade dos poços para captação das águas do aquífero Jandaíra apresenta diâmetro útil de 6 polegadas, são perfurados pelo sistema percussivo a cabo e recebem revestimento de 6 polegadas muitas vezes apenas nos primeiros 10 m sendo desprovidos de revestimento nas porções inferiores. Conforme informações obtidas durante o cadastramento, uma das causas de abandono de poços reside no colapso de trechos das paredes não revestidas.

Dos 853 poços que captam água no aquífero Jandaíra no Estado do Rio Grande do Norte 705 deles (82,6%) possuíam dados de profundidade. A FIGURA 49 representa o histograma de freqüências das profundidades dos poços analisados.

FIGURA 49 - Histograma de freqüências das profundidades dos poços

Observando-se o histograma pode-se notar que as profundidades variam de 25 até 300 metros; a maior frequência, 189 poços (26,8%) é correspondente ao intervalo 75-100 m; a grande maioria porém (77,8%) possui profundidades que variam entre 50-150 m.

9.4 Equipamentos de Bombeamento

Ainda com os dados obtidos no cadastramento efetuado pelo IPT foram levantadas informações sobre os equipamentos utilizados para exploração das águas do aquífero Jandaíra, bem como obtida a vazão média de produção para cada tipo de equipamento. Nessa avaliação não foram consideradas as captações mistas. Dos 853 poços desse aquífero, 555 (65%) estavam equipados na ocasião da aquele cadastramento. O QUADRO 24 a seguir fornece as informações obtidas.

Equipamento	Frequência dos Poços		Vazão Média m ³ /h
	Quant.	%	
Catavento	185	33,3	0,8
Compressor (sistema air lift)	120	21,6	6,0
Bomba injetora	95	17,1	6,0
Bomba pistão (tipo Itaúna)	81	14,4	2,0
Bomba manual	56	10,1	0,8
Bomba submersível	18	3,2	5,0

QUADRO 24 - Equipamentos de bombeamento utilizados nos poços do aquífero Jandaíra.

Os sistemas de bombeamento mais utilizados para exploração consistem no catavento (33,3%) e "air lift" (21,6%), principalmente devido à falta de rede de distribuição de energia elétrica na área de domínio do aquífero e mesmo devido à própria finalidade de uso da água, onde a maioria dos poços destina-se à agropecuária, sendo grande parte deles construídos no próprio local de consumo, às vezes de difícil acesso e de elevado custo para instalação de rede elétrica.

9.5 Estado Atual dos Poços Tubulares

Com o objetivo de avaliar a situação atual das captações

em termos de potencialidade de exploração, foram tratadas ainda as informações levantadas durante a inventariação processada pelo IPT (IPT, 1982).

Nas FIGURAS 50a e b está representado o estado atual dos poços cadastrados. Pode-se verificar que, em 1979, sem considerar as captações mistas, apenas 529 poços (62,0%) se encontravam em operação; 158 poços (18,5%) foram abandonados; 77 poços (9%) ainda não tinham recebido equipamentos de bombeamento na ocasião do cadastramento e 59 poços (6,9%) haviam sido desativados, não obstante fossem utilizáveis.

FIGURA 50 - Estado atual dos poços do aquífero Jandaíra (a) e mistos (b), no Estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1982, modificado).

No caso dos poços abandonados, as principais causas de abandono foram a baixa produção e os desmoronamentos das paredes do furo e menos freqüentemente pelo alto teor salino das águas produzidas. Foram incluídos como "sem informações", os poços onde, quando da execução do cadastramento "in situ", não foi possível obter informações que permitissem prever a sua reativação ou seja, se a paralisação era temporária ou abandono definitivo. Estes, num total de 30 poços, atingem uma razão de 3,5%.

9.6 Volume de Águas Explotadas

Segundo o cadastramento efetuado, dos 853 poços que captam água no aquífero Jandaíra, 726 (85,1%) possuíam dados de vazão. A FIGURA 51 apresenta a freqüência das vazões desses poços.

FIGURA 51 - Histograma de freqüências dos valores de vazão

Nota-se que as vazões variam de 0 até $40 \text{ m}^3/\text{h}$, porém a grande maioria 690 poços (95%) apresentam vazões que variam de 0 até $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Considerando-se as informações sobre o período de funcionamento dos poços em operação durante o ano de 1979 e as vazões de exploração medidas durante o cadastramento ou as vazões de ensaios de produção desses poços, foram calculados os volumes explotados em cada poço durante aquele ano, obtendo-se um volume total de $3,6.10^6 \text{ m}^3$.

Não existem dados relativos ao volume de água explotado em anos anteriores, mas a evolução das perfurações referida anteriormente (FIGURA 46) deve se refletir também no volume de água explotado. Assim sendo, é possível concluir que houve um aumento anual considerável na exploração de água subterrânea do aquífero Jandaíra nos últimos 10 ou 15 anos e que essa tendência continuará de forma ainda mais acentuada no futuro.

9.7 Usos da Água

A destinação da água explotada do aquífero Jandaíra foi analisada também a partir do levantamento efetuado pelo IPT.

Há muita dificuldade em definir a destinação específica das águas explotadas uma vez que em grande parte dos poços a água é utilizada para os mais diversos fins, tendo sido desprezadas as suas limitações de adequação baseadas em parâmetros legais; a pertinência da área ao polígono das secas e as dificuldades de obtenção de água de melhor qualidade preme sua utilização para os mais diversos fins. O QUADRO 25 apresenta as finalidades das perfurações e os volumes explotados, em termos de usos da água.

Usos	Frequência de poços		Volumes explotados (x10 ³ m ³ /a)	
	Quant.	%	Quant.	%
PD-AN: Particular doméstico e animal	190	37,4	1304	36,64
AP: Abastecimento público	128	25,2	820	23,05
AG: Agropecuário	120	23,6	814	22,87
PD: Particular doméstico	60	11,8	488	13,72
PD-IR: Particular doméstico e irrigação	4	0,79	43	1,2
ID: Industrial	4	0,79	55	1,5
RE: Recreação	2	0,39	35	0,9
TOTAL	508	99,97	3 559	99,88

QUADRO 25- Frequência dos poços e volumes explotados segundo os usos da água.

Verifica-se assim que a maioria dos poços construídos tem fins múltiplos, onde se sobressaem os usos doméstico e animal, com 190 poços (37,4%); os usos específicos sendo limitados a um reduzido número de poços. Quanto aos poços colocados na categoria de abastecimento público deve-se ressaltar que têm também usos múltiplos abrangendo praticamente todos os tipos de uso aqui considerados.

É notória a grande quantidade de captações para fins agropecuários (dessedentação animal e irrigação), com 120 poços ... (23,6%).

No que diz respeito à destinação dos volumes explotados pode-se verificar que mantêm as mesmas relações dos objetivos dos poços, ou seja, com a maior porcentagem referida ao uso particular doméstico e animal. A componente de consumo animal, conquanto não pudesse ser avaliada especificamente, deve ser bastante expressiva uma vez que participa das três categorias de maiores volumes apresentadas no QUADRO 25.

10 CUSTO DE PRODUÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DO AQUÍFERO JANDAÍRA

10.1 Introdução

O custo de produção de água subterrânea analisado em conjunto com outros aspectos, tais como as reservas aquíferas e a qualidade química da água, complementa o quadro geral de diagnóstico da exploração atual dos recursos do aquífero Jandaíra, fornecendo ao usuário os elementos básicos necessários a uma definição quanto ao seu aproveitamento. Cumpre ressaltar contudo, que os custos apresentados devem ser considerados dentro dos limites das condições aqui impostas, constituindo-se portanto apenas como simples referência quando da elaboração de programas e projetos de abastecimento devendo ser portanto, ajustados às condições específicas de cada plano.

10.2 Metodologia de Avaliação

Na avaliação dos custos de produção de água devem ser consideradas diferentes sistemáticas, de acordo com os fins a que se destinam as águas explotadas. Assim, por exemplo, as demandas de água para abastecimento público e dessedentação animal geralmente variam pouco no decorrer do ano, comparativamente às demandas de água para fins de irrigação, que oscilam bastante em função do tipo e estágio da cultura, da época do ano, tipo de solo, etc.

Além dos fatores de demanda, a estimativa do custo de produção do metro cúbico de água subterrânea requer inicialmente a definição das características técnicas da obra de captação.

Para esta avaliação foram definidos os poços-padrão do aquífero Jandaíra, para os quais consideram-se válidos os cálculos efetuados. Devido à grande heterogeneidade litológica e hidrodinâmica do aquífero, e conseqüentemente da impraticabilidade de se estabelecerem áreas típicas, os poços-padrão foram definidos em função das características geométricas e hidráulicas médias, estimadas ou calculadas estatisticamente (itens 7.3 e 9.3), tendo então sido definidos três tipos de poços-padrão, cujas características técnicas são apresentadas no QUADRO 26 a seguir.

Poço Tipo	Perfuração		Revestimento		Vazão específica (m ³ /h/r)	Vazão de Projeto (m ³ /h)	Nível Dinâmico (m)	Rebaixam. acumulado 20 anos (m)	Altura Manométrica (II) (m)
	Ø (polegadas)	Profund. (m)	Tubo P.V.C. (pól.)	Capim. (m)					
P1	8	0-10	6	102 18m filtros	0,5	5,0	50,0	18,0	68,0
	6	10-120							
P2	8	0-10	6	102 18m filtros	2,5	10,0	30,0	3,0	33,0
	6	10-120							
P3	8	0-10	6	102 18m filtros	5,0	30,0	20,0	2,0	22,0
	6	10-120							

QUADRO 26 - Características técnicas dos poços-padrão do aquífero Jandaíra.

10.3 Estimativas de Custos

Considerando-se que o maior volume das águas explotadas do aquífero Jandaíra se destina ao abastecimento humano e animal, foram avaliados apenas os custos de produção do metro cúbico de água para esses fins.

Com base nas características técnicas dos poços-padrão foram calculados:

- A - Despesas com construção do poço e casa de bombas;
- B - Despesas com aquisição, transporte e instalação do equipamento de bombeamento;
- C - Despesas com operação e manutenção; e
- D - Despesas com consumo de energia elétrica

A - Despesas com construção do poço e casa de bombas

a) *Despesas de construção do poço*

Na avaliação dos gastos com construção do poço foram computados os seguintes custos parciais:

- elaboração do projeto e supervisão técnica da construção da obra;
- deslocamento e instalação da perfuratriz e acessórios;
- abertura do furo, tendo-se admitido perfuração pelo método percussivo a cabo;
- acabamento da obra, tendo sido considerado revestimento em PVC de 6" e filtros tipo "Nold".
- operações de limpeza, cimentação e desinfecção;
- ensaios e análises, tendo-se considerado a realização de um ensaio de produção (18 de bombeamento e 24 h de recuperação) e ainda análise física, química e bacteriológica de uma amostra de água.

O custo final de cada poço-padrão, ou seja, o custo do poço perfurado, revestido e testado, pronto para receber o equipamento de bombeamento foi avaliado tomando-se os preços médios de janeiro/84, tendo-se obtido o valor abaixo, uma vez que as características construtivas são as mesmas para os três poços-padrão:

Valor orçado: Cr\$ 13 300.000,00

b) *Despesas de construção da casa de bombas*

Considerou-se a construção da casa de bombas para abrigo do quadro de comando e eventuais equipamentos e acessórios, em alvenaria, com área construída de 4 m². Tomando-se o valor de Cr\$ 100 000,00/m² (janeiro/84), temos:

Valor orçado: Cr\$ 400 000,00

Admite-se a vida útil das obras como sendo de 20 anos.

B - Despesas com aquisição, transporte e instalação do equipamento de bombeamento

Foram consideradas as despesas relativas à aquisição, trans

porte e instalação do equipamento de bombeamento.

a) *Aquisição*

Os preços das bombas variam em função da vazão que se deseja produzir e da altura de recalque (altura manométrica) correspondente. Para a avaliação das despesas com equipamentos foram consideradas as características dos projetos constantes do QUADRO 26 e as condições a seguir relacionadas:

- utilização de bomba elétrica submersível, selecionada em função das alturas de recalque e das vazões a bombear;
- preço médio da bomba a partir de preços informados por diferentes fornecedores para o conjunto motor-bomba, quadro de comando, cabos elétricos e tubulação de descarga (janeiro/84);

Preço: Cr\$ 1 000 000,00

- a vida útil do equipamento de bombeamento sendo de 7 anos e a vida útil da obra de 20 anos, pode-se prever aquisição de três equipamentos de bombeamento, que deverão ser adquiridos a cada 7 anos.

Para a avaliação do custo de produção da água porém, foi computado o montante das despesas em aquisição e instalação dos três equipamentos de bombeamento.

b) *Transporte e instalação*

Para a instalação, considerou-se energia elétrica disponível no local do poço e não necessidade de transformadores, tendo-se admitido então que as despesas com transporte e instalação dos equipamentos sejam correspondentes a 25% do seu valor de compra.

Assim sendo, o capital dispendido para fazer frente às despesas integrantes do item B, será:

Valor orçado: Cr\$ 1 250 000,00

C - Despesas com operação e manutenção

a) *Operação*

Para a estimativa das despesas anuais com mão-de-obra foram

consideradas as seguintes condições:

- regime de bombeamento de 12 h/d; 30 d/mês; 12 meses/ano;
- admitindo-se esse regime de bombeamento, serão necessários dois operadores do sistema, porém, para reduzir os custos, considerar-se-á que os dois operadores são responsáveis pela operação e manutenção de uma bateria de 5 poços;
- salário mensal correspondente a dois salários mínimos da região, ou seja: Cr\$ 100 000,00/mês (janeiro/1984). Este salário deverá ser acrescido dos encargos sociais (INPS, FGTS e Seguro de Acidente de Trabalho) num montante de cerca de 35% e também do 13º salário.

b) *Manutenção*

Considerou-se, para a avaliação das despesas anuais com manutenção, que os gastos com reparos, reposição de peças, compra de lubrificantes (óleos e graxas), etc., como sendo anualmente da ordem de 5% do preço do equipamento de bombeamento.

D - Despesas com consumo de energia elétrica

a) *Consumo*

O consumo de energia elétrica é calculado com base no trabalho mecânico necessário para elevar 1 m³ de água à altura de 1 metro. Assim teremos:

$$C_E = 0,002726 \times \frac{V.H.}{r_{mb}}$$

onde:

C_E = consumo anual de energia (kWh);

V = volume anual de água bombeada;

H = altura manométrica (altura de recalque) (m);

r_{mb} = rendimento do conjunto motor-bomba, admitido em 65%.

b) *Despesa*

$$D_E = C_E \times p$$

onde:

D_E = despesa anual com energia elétrica (Cr\$);

C_E = consumo anual de energia (kWh);

p = preço do kWh para companhias estatais de água e esgoto.

Cr\$ 43,35 em janeiro/84.

Avaliação do custo de produção do m^3 de água

Com o objetivo de tornar realista a avaliação do custo de produção converteu-se os valores de cruzeiros em ORTNs. Nestas condições, em qualquer cálculo efetuado, os valores já estarão corrigidos monetariamente, o que dispensa cálculos do custo de financiamento para cobrir as despesas referentes aos itens A, B e C.

As despesas relativas aos itens A e B foram diluídas durante a vida útil média das obras e equipamentos, com a finalidade de linearizar o custo nesse período.

São relacionados a seguir os valores das despesas envolvidas nos cálculos efetuados, conforme as condições admitidas.

A - a) Construção do poço:	Cr\$ 13 300.000,00
b) Construção da casa de bombas:	Cr\$ 400 000,00
B - a) aquisição dos 3 equipamentos de bombeamento:	Cr\$ 3 000 000,00
b) transporte e instalação dos equipamentos de bombeamento.	Cr\$ 750 000,00
Subtotal	Cr\$ 17 450.000,00
Valor correspondente à parcela anual do custo (1/20 do subtotal):	Cr\$ 872.500,00
C - a) operação:- mão-de-obra:	Cr\$ 691 200,00
b) manutenção:	Cr\$ 62 500,00
Subtotal	Cr\$ 1 626 200,00

Valor anual de custo comum: Cr\$ 1 626.200,00

O custo de produção do m^3 de água à boca do poço foi calculado através da seguinte expressão:

$$C_p = \frac{[(A + B + C)/20] + D}{V}, \text{ onde:}$$

- C_p - custo anual de produção do m^3 de água (Cr\$)
- A - despesas com construção do poço e casa de bombas;
- B - despesas com aquisição, transporte e instalação do equipamento de bombeamento;
- C - despesa anual de operação e manutenção do sistema;
- D - despesa anual com energia elétrica;
- V - Volume anual de água explotada por poço, sendo de 21.600 m^3/a , 43.200 m^3/a e 129.600 m^3/a para os poços padrão P_1 , P_2 e P_3 , respectivamente.

Na TABELA 25 são apresentados resumidamente os valores envolvidos nos cálculos e os custos de produção do m^3 de água em cada poço-padrão.

Comparando-se os valores dessa tabela pode-se notar que para poços pouco produtivos (poço-padrão P_1) os custos são mais elevados.

Os custos de produção de água do aquífero Jandaíra quando comparados com o dos aquíferos Açu e Barreiras (IPT, 1982) também à boca do poço e nas situações mais desfavoráveis: poço-tipo P_2 do aquífero Açu (0,0108 ORTNs) e poço-tipo P_6 do aquífero Barreiras (0,0025 ORTNs), fazem notar que a produção de água do aquífero Jandaíra é relativamente mais onerosa.

TABELA 25 - Custo de produção do m³ de água pelos poços-padrão

Discriminação das despesas	Custos de produção do m ³ pelos poços padrão					
	P ₁		P ₂		P ₃	
	Cr\$	ORTNs(a)	Cr\$	ORTNs	Cr\$	ORTNs
Valor anual de custo comum	1 626 200,00	215,50	1 626.200,00	215,50	1 626.200,00	215,50
Despesas com energia elétrica	267 036,00	35,39	251 343,00	33,31	518 336,00	68,69
TOTAIS	1 893.236,00	250,89	1 877.543,00	248,81	2 144.536,00	284,19
Custo do m ³ de água	87,65	0,0116154	43,46	0,0057593	16,55	0,0021932

(a) Valor da ORTN de janeiro/84: Cr\$ 7 545,98

11 CONCLUSÕES

- A presente monografia, tendo reunido os conhecimentos adquiridos através dos diversos estudos hidrogeológicos envolvendo o domínio do aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar, permitiu um melhor entendimento do funcionamento desse aquífero. A sua complexidade limitou porém o desenvolvimento adequado das investigações, impedindo que fosse atingido um grau de entendimento desejável de todos os fenômenos hidrogeológicos nele ocorrentes.
- Na evolução dos conhecimentos sobre o aquífero Jandaíra merecem destaque a participação dos estudos exploratórios da SUDENE, que a selecionou como Bacia Escola de Hidrogeologia, e o Governo do Estado do Rio Grande do Norte, com estudos regionais voltados à avaliação dos recursos hídricos subterrâneos do Estado.
- Mapeamentos, sondagens mecânicas e geofísicas da PETROBRÁS e da SUDENE em muito vêm contribuindo para o conhecimento espacial e estrutural dos vários estratos da Bacia Potiguar em que pesem algumas dificuldades de interpretação de sondagens elétricas verticais.
- As rochas carbonáticas da Formação Jandaíra abrangem uma superfície de cerca de $17\,756\text{ km}^2$ estendendo-se desde a porção oriental do Estado do Ceará até o extremo leste do Estado do Rio Grande do Norte. A superfície de domínio do aquífero Jandaíra foi considerada porém com $16\,278\text{ km}^2$, somente até uma linha unindo as cidades de Touros e Pureza, no extremo nordeste da bacia, devido ao desconhecimento geológico-estrutural a leste dessa linha e à supremacia do aquífero Barreiras sobre os aquíferos Jandaíra e Açu nessa região. Seu domínio está inserido em região de clima semi-árido do nordeste brasileiro, no denominado *Polígono das Secas*.
- Por toda a sua extensão, o aquífero Jandaíra é limitado na base por uma camada pouco permeável, de espessura máxima de 800m na parte central da bacia, e que da base para o topo é constituída por arenitos, siltitos argilosos, argilitos, folhelhos, margas, calcarenitos e calcários compactos, pertencentes à porção superior da Formação Açu e à porção inferior da Formação Jandaíra. Essa camada funciona hidraulicamente como aquitardo, através do qual se faz a conexão hidráulica entre os aquíferos Jandaíra e Açu a ele sotoposto, responsável pelo aporte de

$1,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ de águas no aquífero Jandaíra provenientes do aquífero Açu, por drenança vertical ascendente, e pela transferência de $4,49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ de águas para o aquífero Açu, por drenança vertical descendente.

- Junto à costa, com um paleo-relevo bastante irregular, a Formação Jandaíra é recoberta por uma faixa de sedimentos terciários e quaternários com largura e espessura bastante variáveis, onde se instala, de maneira descontínua, o sistema aquífero Dunas-Barreiras. Esse sistema é limitado na base por uma camada pouco permeável, constituída por leitos argilosos e às vezes margosos com espessura média de 15 m que o separa do aquífero Jandaíra, conferindo-lhe caráter de semi-confinamento em algumas áreas. Esse sistema constitui uma das fontes de recarga do aquífero Jandaíra que, por drenança vertical descendente através da camada semi-confinante, lhe transfere um volume de água da ordem de $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, e que influencia também a composição química das suas águas.

- A recarga do aquífero Jandaíra se processa essencialmente pela infiltração de águas pluviais em sua superfície livre, cujas áreas preferenciais se instalam em regiões topograficamente elevadas, evidenciando-se notável coincidência entre a localização dessas áreas com as regiões de maior frequência e densidade de fraturamento. Na porção ocidental da bacia as áreas preferenciais de recarga se localizam na região da Serra de Mossoró, onde têm carga hidráulica máxima de 125 m, e na região de Maxixe, localizada na porção central da Chapada do Apodi, com carga hidráulica máxima de 132 m. No domínio central da bacia se situam na região de Sombras Grandes na zona do interflúvio dos rios Apodi-Mossoró e Upanema-do Carmo, com carga hidráulica máxima de 100 m, e também na região de Volta-Trapiá entre os rios do Carmo e Piranhas-Açu, onde atinge 138 m. Na porção oriental da bacia, as áreas preferenciais de recarga se localizam nas bordas do domínio, nas vizinhanças do contacto entre as formações Jandaíra e Açu na região denominada genericamente de Serra Verde de uma forma contínua, desde sudoeste de Jandaíra até norte de João Câmara, onde atinge a mais elevada carga hidráulica do aquífero, da ordem de 200 m. No interior do domínio, pode ser citada a região da Serra dos Macacos, localizada a sul de Queimadas, com 179 m. Essas áreas deverão ser portanto preferen

cialmente consideradas sob os aspectos de preservação ambiental e ocupação do solo em eventuais planos de aproveitamento dos recursos hídricos do aquífero Jandaíra.

Secundariamente a recarga se processa com aportes por drenagem a partir dos aquíferos Açu e sistema Dunas-Barreiras.

- Caracteristicamente livre, o aquífero Jandaíra apresenta as profundidades dos níveis d'água em estreita relação com o relevo, encontrando-se as maiores profundidades de nível nos interflúvios, nas áreas preferenciais de recarga do aquífero, como por exemplo na região da Serra de Mossoró onde atinge a profundidade de 71 m; na região de Maxixe, com 40 m; nas serras do Carmo e do Mel, com 170 m e na porção oriental da Bacia, atinge 134 m na região da Serra da Macambira e 138 m na Serra dos Macacos. Os menores valores geralmente são encontrados nos seus exutórios junto aos vales dos principais rios e orla atlântica. Diferenças bruscas de profundidades de nível a curtas distâncias, como as que ocorrem nas serras do Carmo e do Mel, sugerem a existência de aquíferos suspensos nessas áreas. Inexistem medições periódicas de nível que possam fornecer a sua evolução no decorrer do tempo e a amplitude da variação anual. Medições efetuadas no intervalo de 9 meses (abril/79 e janeiro/80) revelaram desde ausência de variação até redução de nível, em média da ordem de 3 m nesse período. Como as chuvas na região se iniciam em dezembro, é provável que na ocasião das últimas medições os níveis já estivessem influenciados pela recarga do aquífero.

- Consideradas a grande variação na constituição litológica tanto vertical como horizontal dos calcários Jandaíra, as descontinuidades lineares, as evidências de carstificação e ainda a amplitude dos valores de vazão específica e de transmissividade pode-se concluir que o meio aquífero se apresenta heterogêneo, descontínuo e hidraulicamente anisotrópico, promovendo circulação tipicamente cárstica no seu interior, ou seja, se processa essencialmente através de fendas e canais, além do que muitas vezes parte do fluxo se faz através de camadas arenosas presentes no interior da seqüência carbonática, principalmente nas proximidades dos vales dos rios Mossoró, Açu e Mulungu.

- As direções de fluxo, quando consideradas em áreas restritas geralmente coincidem com as direções de maior frequência e

com as direções de maiores comprimentos relativos (em relação ao domínio) das descontinuidades.

De uma maneira geral, as equipotenciais condicionam o fluxo subterrâneo de sul para norte, em direção ao oceano, com gradiente médio de 10^{-3} , interiorizando as águas no domínio do aquífero a partir das áreas de recarga; secundariamente o dirige para os vales dos rios Apodi-Mossoró, Upanema-do Carmo, Piranhas-Açu e Cabugi-Mulungu-Amargoso ou mesmo para o exterior do domínio; para oeste, em direção ao vale do rio Jaguaribe, para leste, em direção à Lagoa do Boqueirão e vale do rio Maxaranguape.

A interceptação desse escoamento pela topografia permite o surgimento das fontes mais expressivas, tais como a fonte de Pureza, no extremo leste e a de Olho d'Água da Bica no extremo oeste do domínio do aquífero.

Escoamento subterrâneo pouco expressivo se processa para sul, garantido por poucos e curtos feixes de linhas de fluxo em direção ao contacto entre as formações Jandaíra e Açu. Assim, na parte ocidental e central da bacia há escoamentos em direção às cabeceiras do riacho da Barra, localizado a noroeste de Apodi, em direção ao riacho Baixa Grande, localizado a noroeste de Upanema e também em direção às cabeceiras do rio Palheiro e Lagoa do Piatô, localizados a noroeste de Açu. Esses escoamentos são responsáveis pela manutenção de pequenas fontes e exudações da "cuesta" calcária nessas regiões.

- A partir da interpretação de 74 ensaios de bombeamento foram obtidos valores de transmissividade (T) que variam de 1×10^{-4} até $78,50 \text{ m}^2/\text{h}$, com média de $3,15 \text{ m}^2/\text{h}$, cuja amplitude reflete a heterogeneidade do meio aquífero. Valores de coeficiente de armazenamento não puderam ser calculados uma vez que não se dispunham de medidas de nível em poços de observação nas proximidades dos poços ensaiados.

A produtividade dos poços é bastante variável pois as vazões específicas (Q/s) variam de 0,01 até $48,0 \text{ (m}^3/\text{h})/\text{m}$, com média de $4,69 \text{ (m}^3/\text{h})/\text{m}$. Deve-se frizar porém, que 75% dos dados de vazão específica estão compreendidos entre 0,01 e $6,20 \text{ (m}^3/\text{h})/\text{m}$, havendo uma frequência ao redor de apenas 10% para vazões entre 0,5 e $12 \text{ (m}^3/\text{h})/\text{m}$. As maiores vazões específicas estão compreendidas entre as profundidades de 20 a 140 m, conforme revelou a

curva representativa das médias acumuladas dos valores de vazão específica para intervalos de 10 m.

A análise do comportamento espacial das vazões específicas torna notória a relação entre os seus altos valores e a presença de fraturamentos, permitindo supor que uma das formas de reduzir os insucessos de construção de poços pouco produtivos seja a execução de estudos hidrogeológicos de detalhe nas áreas de interesse, levando-se em consideração principalmente os aspectos estruturais dos calcários.

A melhoria de produtividade dos poços pouco produtivos poderia ser obtida por processos artificiais de aumento da permeabilidade do reservatório nos arredores do poço pelo método de acidificação ou mesmo por detonações seguidas de acidificação.

Através de análise de regressão entre os valores de transmissividade e de vazão específica dos poços ensaiados foi obtida a relação entre ambas, expressa pela equação:

$$\log T = - 0,37 + 1,14 \log Q/s$$

Assim foi possível a obtenção de um grande número de valores de T a partir dos dados de Q/s, que permitiu a compartimentação bastante detalhada das frentes de descarga do aquífero para a avaliação dos volumes escoados nos seus exutórios naturais.

• Técnicas utilizando isótopos ambientais têm sido empregadas em investigações envolvendo as águas subterrâneas do aquífero Jandaíra. Analisando-se dados de concentrações de D e O^{18} pôde-se verificar que o coeficiente angular da reta representativa da relação entre δD e δO^{18} para águas dos aquíferos Jandaíra e Açú ($\delta D = 0,55 + 5,6 \delta O^{18}$) quando comparado ao da equação de CRAIG (1961), "apud" SALATI et alii (1976), representativa das águas meteóricas ($\delta D = 10 + 8,0 \delta O^{18}$) é relativamente baixo, aproximando-se do coeficiente angular da reta representativa das águas de açude no Estado do Ceará ($\delta D = 0,4 + 4,9 \delta O^{18}$), conforme SANTIAGO (1972). Tal fato permite concluir que as águas armazenadas nesses aquíferos sofreram intenso processo de evaporação antes de aportarem nos respectivos aquíferos. Essa evaporação estaria contribuindo portanto para o processo de concentração de sais nas porções superficiais dos terrenos.

• A análise do comportamento de algumas medidas de salinidade expressas pelo Resíduo Seco (RS a $110^{\circ}C$) das águas de poços

e cacimbas, comparativamente à pluviosidade medida em estações próximas àqueles, revelou uma estreita relação entre ambas: a salinidade das águas aumentando paralelamente à pluviosidade. A menos de uma pequena defasagem no tempo haveria correspondência, entre os máximos valores da pluviosidade e os valores de Resíduo Seco. Embora sejam bastante reduzidos o número de pontos d'água analisados e os períodos pode-se, aceitando-se a existência de tal fato, admitir que seja esse o mecanismo pelo qual se processa a salinização das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra. Assim, as águas pluviais dissolvendo sais existentes na camada não saturada, originados por processos pedogenéticos e concentrados por processos climáticos, seriam responsáveis pela sua veiculação até a porção saturada do aquífero nas épocas de maior pluviosidade e recarga do mesmo.

• A caracterização hidroquímica do aquífero Jandaíra permitiu verificar que as águas de armazenamento são essencialmente básicas, com pH variando de 6,5 até 8,9 e apresentam salinidade bastante elevada, com TSD (total de sais dissolvidos) variando de 270,27 até 11 342,00 mg/l, com média de 1 793,06 mg/l. Em 75% das amostras os valores de TSD variam de 270,27 mg/l até 2500,00 mg/l havendo estreita relação entre a salinidade das águas e teor de cloretos. Embora, segundo a classificação proposta por CUSTODIO (1976), 71% das amostras estejam colocadas na categoria de água doce, tem-se 23% das amostras na categoria de água salobra e 5% na categoria de água salgada.

No que se refere ao comportamento espacial da salinidade, expressa em valores de TSD, notou-se que de uma maneira geral há aumento de concentração salina em direção aos vales dos principais rios tais como o rio Mossoró e Açu e em direção ao mar, ou seja, em direção aos exutórios do aquífero, portanto com tendência natural de aumento da concentração salina de montante para jusante do fluxo subterrâneo. São notórios porém núcleos com salinidade relativamente elevada, tanto junto ao litoral como no interior do domínio. Zonas com salinidade relativamente reduzida foram também identificadas ora junto às áreas preferenciais de recarga, ora em áreas próximas aos sedimentos do Grupo Barreiras e ainda em áreas de maior pluviometria, no extremo oriente do domínio.

Os núcleos litorâneos com concentrações de TSD anormalmente elevadas, que também se destacaram nos mapas de Dureza e de cloretos, têm provavelmente suas origens na influência das águas marinhas. Estas contaminariam as águas do aquífero pelo seu avanço para o interior, tanto através dos vales dos principais rios por ocasião das marés altas, como através das redes do sistema cárstico que, como se acostuma acontecer, são extraordinariamente desenvolvidas junto ao mar, pelo aumento da agressividade das águas provocado pela mistura que se processa nesses exutórios. Os núcleos interiores com concentrações elevadas teriam sua origem na presença de solos salinos da cobertura, além do aumento natural de concentração de sais, já no aquífero, devido à baixa velocidade de circulação das águas subterrâneas nessas áreas.

• Como a condutividade elétrica (CE) reflete o teor salino das águas e sendo este de grande interesse para o estudo do aquífero Jandaíra, foram feitas diversas análises de regressão envolvendo esta variável, com o objetivo de avaliar as suas relações de dependência com outros parâmetros de interesse. Não foram encontrados no entanto bons níveis de interdependência entre a condutividade elétrica, tanto com a vazão específica (Q/s) como também com a transmissividade (T). Embora seja bastante reduzido o coeficiente de correlação encontrado na análise de regressão entre esta e a profundidade do nível d'água e entre a espessura dos sedimentos sobrepostos do aquífero Jandaíra, poder-se-ia dizer que a condutividade elétrica se reduz levemente para valores crescentes dessas duas variáveis.

A análise de regressão entre a condutividade elétrica e o Resíduo Seco permitiu a obtenção da equação $CE = 1,04 RS$, útil na determinação de Resíduo Seco a partir de valores de condutividade elétrica. Da mesma forma foram obtidas as equações representativas da relação entre a condutividade elétrica (em $\mu mho/cm$ a $25^{\circ}C$) e a soma de íons (em mg/l) para os diferentes grupos de águas, a saber:

$CE = 0,67$ (Soma de íons) - águas com dominância de cloretos;

$CE = 0,74$ (Soma de íons) - águas com dominância de bicarbonatos e carbonatos;

$CE = 0,82$ (Soma de íons) - águas com dominância de sulfatos, e

$CE = 0,68$ (Soma de íons) - para todo o conjunto.

- A Dureza total das águas do aquífero Jandaíra é geralmente elevada, levando a quase totalidade das amostras (96%) a serem classificadas na categoria de águas *muito duras*, segundo a classificação proposta por CUSTÓDIO & LLAMAS (1976). Os valores variam de 85,00 até 6 186,90 mg/l, com média de 898,13 mg/l de CaCO_3 equivalente e para 75% das amostras os valores de Dureza total estão compreendidos entre 85,00 e 1 300,00 mg/l de CaCO_3 equivalente, tratando-se essencialmente de dureza devida a não-carbonatos.

O comportamento espacial da Dureza total, da mesma forma que o TSD e os cloretos também se faz crescente no sentido do fluxo subterrâneo. Os núcleos de teores elevados correspondem às mesmas áreas encontradas nos mapas de TSD e de cloretos. É notória a correspondência entre os teores de Dureza total e a mineralogia dos calcários encontrando-se os altos valores de Dureza em áreas de dominância dos calcários aflorantes de alta pureza, conforme distribuição configurada por MENOR et alii (1980), correspondentes às rochas carbonático-magnesianas com $\text{MgO} > 2\%$; os valores menos elevados são encontrados em áreas onde $\text{Ca} > 53\%$ e $\text{MgO} < 2\%$, principalmente no extremo leste do domínio.

- Relativamente aos ânions maiores, segundo a classificação proposta por SCHOELLER, "apud" CUSTÓDIO & LLAMAS (1976) as águas do aquífero Jandaíra são representadas por 52% de águas cloretadas, 21% de águas bicarbonatadas, 6% de águas sulfatadas e 21% de águas mistas. A distribuição dessas águas observada através do mapa de diagramas de Stiff, faz notar que as águas sulfatadas da região localizada a noroeste da cidade de Gov. Dix-Sept Rosado estão associadas a evaporitos presentes naquela região. Nesse sentido é importante destacar também a ocorrência de águas sulfatadas a oeste da Serra do Carmo, a sudeste de Alto do Rodrigues e na área que se estende desde sudoeste até sudeste de Parazinho, que podem estar revelando a presença de evaporitos também nessas áreas.

A dominância dos cloretos se efetiva em 62% das amostras, com teores que vão de 27,87 até 7 043,40 mg/l. Para 75% das amostras os teores de cloretos são bastante elevados, variando entre o teor mínimo e 950,00 mg/l.

- Com uma espessura média saturada de 150 m e porosidade eficaz de 5×10^{-2} estima-se que as reservas permanentes do aquífe

ro Jandaíra sejam da ordem de $122 \times 10^9 \text{ m}^3$; as reservas reguladoras, foram avaliadas como sendo da ordem de $56,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, garantidos por infiltração eficaz de 0,9%. Consequentemente fica fixado o coeficiente de realimentação anual como sendo da ordem de 0,05%.

• No que concerne à qualidade das reservas de água do aquífero Jandaíra pode-se concluir que:

- quanto à adequação para consumo humano suas águas podem ser consideradas insatisfatórias quando se comparam os teores de alguns de seus constituintes ou valores de parâmetros físico-químicos com os padrões estabelecidos em legislação específica. Assim, a salinidade das águas expressa em TSD, ultrapassa o valor máximo permissível em 69% das amostras; a Dureza total é superior ao máximo tolerado em 95% das amostras; o teor de Magnésio é superior ao permitido em 77% das amostras; o teor de flúor em 96% das amostras se situa fora do intervalo recomendado para a região ($6,0 - 8,0 \text{ mg/l de F}^{-1}$), e o teor de bicarbonato é superior ao máximo permissível em 51% das amostras;

Teores elevados de nitrato revelam processo de poluição das águas por substâncias orgânicas. Em 20% das amostras o teor de nitrato é superior ao máximo permissível de $45 \text{ mg/l de nitrato (em mg/l de NO}_3^{-1})$. Essas amostras correspondem a poços da zona rural, localizados nos campos de pastagem ou nas proximidades de currais. A análise desses poços leva a supor os seguintes mecanismos de poluição: ausência de quarncimento de tampa na boca dos poços, boca do poço situada abaixo da superfície do terreno e ausência de cimentação de proteção na parte superior do poço. Tais situações permitiriam o acesso de águas poluídas diretamente, pelo interior do poço, ou indiretamente, pelo furo não cimentado, às águas do aquífero. Cuidados especiais deverão portanto ser tomados quando do revestimento do furo, cimentações e da instalação dos equipamentos de bombeamento além do estabelecimento efetivo de perímetro de proteção da captação para garantir a preservação da qualidade das águas extraídas.

- no que diz respeito à utilização para fins de irrigação pode-se constatar que, de acordo com a classificação do United States Salinity Laboratory (USSL), 51% das amostras de águas

do aquífero Jandaíra se enquadram na classe C_3S_1 , seguindo-se a classe C_4S_2 com 25%. Isto significa que a maioria das águas apresenta alta salinidade e relativamente baixo risco em sôdio, podendo ser aplicadas somente em culturas com alta tolerância aos sais e em solos de alta permeabilidade e boa drenagem, devendo-se utilizar água em excesso para promover a lixiviação dos mesmos. A aplicação, portanto, das águas do aquífero Jandaíra para irrigação deverá ser precedida de estudos pedológicos de detalhe da área a ser irrigada, e

- para consumo industrial, as águas do aquífero Jandaíra não são recomendadas sem que se as submeta a tratamento prévio, devido principalmente ao seu caráter incrustante evidenciado pelos baixos valores do índice de estabilidade do carbonato de cálcio (IE) aqui calculado segundo RYZNAR (1944), que variam de 4,68 até 9,57, com um valor médio de 7,69, revelando que a maioria das águas tem caráter francamente incrustante. Para adequá-las ao uso industrial seria necessário tratamento prévio específico segundo o tipo de indústria ou processo industrial utilizado.

Com base nos mapas hidroquímicos elaborados neste estudo, é possível o conhecimento apriorístico da composição química aproximada e das características físico-químicas das águas de novos poços a serem construídos, tornando-se assim possível a previsão da qualidade das águas a serem explotadas. Tal conhecimento prévio será útil no planejamento do aproveitamento dos reursos hídricos subterrâneos do aquífero Jandaíra e mesmo no planejamento do uso e ocupação do solo, adequando, quando necessário, as atividades e ocupações humanas à qualidade das águas disponíveis.

- No que se refere à exploração das águas do aquífero Jandaíra, no seu domínio pertencente ao Estado do Rio Grande do Norte, correspondente a 90% da sua superfície, foram cadastrados 853 poços tubulares que captam suas águas, construídos até 1979, equivalentes a 65% dos poços construídos naquele estado. Entre os poços cadastrados, 72% (615 poços) são de iniciativa particular e 25% (217 poços) são poços públicos, sendo que 62% (529 poços) se encontram em operação e 19% (158 poços) foram abando

nados. As principais causas de abandono foram a reduzida vazão de produção, ocasionais desmoronamentos das paredes do furo quando não revestidos e, menos freqüentemente, a alta salinidade das águas produzidas.

- Os poços tubulares são geralmente construídos pelo sistema percussivo a cabo tendo-se registrado profundidade máxima de 300 m. O maior valor encontrado para as vazões foi de $40 \text{ m}^3/\text{h}$, porém em 95% dos poços a vazão não ultrapassa $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os níveis estáticos estão à profundidade máxima de 45 m para 75% dos poços.

- Como equipamento de bombeamento são utilizados cataventos em 33% dos poços, seguindo-se o sistema "air lift" em 22% e bombas injetoras em 17% dos poços; bombas submersíveis são instaladas em apenas 3% dos poços construídos.

Nessas condições o volume de águas anualmente explotadas é da ordem de $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (em 1979).

- A pertinência da área ao Polígono das Secas e as dificuldades da obtenção de água de melhor qualidade preme que se as utilize para os mais diversos fins, tendo sido desprezadas as limitações de uso baseadas em parâmetros legais.

Há bastante dificuldades em definir a destinação específica, em termos de volumes explotados, uma vez que em uma grande quantidade de poços a água é utilizada para fins múltiplos sem contudo haver controle de elementos que possam permitir o cálculo dos volumes de cada destinação. As informações levantadas, no entanto, permitiram identificar alguns usos, tendo-se 37% do volume explotado com destinação para uso doméstico e animal, 23 % para uso agropecuário e 13% para uso exclusivamente doméstico, entre outros. Deve-se ressaltar no entanto, que é expressivo o volume destinado ao uso na pecuária uma vez que as águas explotadas através dos poços para abastecimento público e que representam 23% dos volumes, têm fins múltiplos, incluindo-se portanto também aqui o uso na pecuária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.P.T. 1970. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste: folha 15, Jaguaribe - SE. Recife, SUDENE. (SUDENE Hidrogeologia, 32).
- ALMEIDA, F.F.M. de. 1969. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23, Salvador, 1969. Anais... Salvador, SBG. p.29-46.
- ARAÚJO, J.M. de C. & RODIS, H.G. 1967. Recursos d'água subterrânea da área do Vale Açu. Recife, SUDENE. 41 p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 12).
- ARAÚJO, M.B.; GOMES, J.B.; SOUZA, S.M. 1978. Bacia Potiguar; aspectos gerais e perspectivas petrolíferas. (Offshore Brasil, OB-78-02: 1-11. RJ).
- ASMUS, H.E. 1975. Controle estrutural da deposição mesozóica nas Bacias da margem continental brasileira. Rev. Bras. Geoc. São Paulo, 5 (3):160-175.
- ASMUS, H.E. 1981. Geologia das bacias marginais mesozóicas-cenozóicas do Brasil. Buenos Aires, Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico, Cuencas Sedimentarias del Jurásico y Cretácico de America del Sur. v.1, p.127-155.
- ASMUS, H.E. 1981. Relacionamento genético e feições geológicas da margem continental sudeste brasileira e da área continental emersa adjacente. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1981. Atas... São Paulo, SBG, v.1, p.252-261.
- ASMUS, H.E. & PORTO, R. 1972. Classificação das Bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém, 1972. Anais... Belém, SBG. v.2, p.67-90.il.
- BARBOSA, A.J. & BRAGA, A. de P.G. 1974. Projeto leste da Paraíba e Rio Grande do Norte; relatório integrado. Recife, DNPM/CPRM. v.3.

- BAZILEVICH, N.I. 1965. The geochemistry of soda soils; Moscou, V.A. Kovda. Traduzido por Israel Program for Scientific Translations, 1970, Jerusalém, R. Amols. 392p.il.
- BELTRÃO, A.E. de A. 1974. Aspectos hidrogeológicos do Território Federal de Fernando de Noronha. Recife, SUDENE. 52p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 49).
- BEURLIN, K. 1961. O Turoniano marinho no nordeste do Brasil. Bol. Soc. Bras. Geol., São Paulo, 10 (2):39-52.
- BEURLIN, K. 1964. Novas observações sobre o Cretáceo do Rio Grande do Norte. Bol. Paranaense de Geografia, (10-15):173-178.
- BEURLIN, K. 1967. Geologia da região de Mossoró. Rio de Janeiro, Pongetti. 173p. (Coleção Mossoroense. Série C, v.18).
- BEZERRA, M.A. 1978. Avaliação da capacidade de produção dos poços do sistema de abastecimento d'água de Natal, RN. Recife. 134p.il. (Dissertação apres. UFPE. Grau de Mestre. Área de concentração em Hidrogeologia).
- BLANKENAGEL, R.K. 1962. Geological Sumary and Ground Water Potential of the Potiguar Basin in Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX. 22p. (inédito).
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Geral. 1981. Projeto RADAMBRASIL; Folhas SB 24/25. Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 744p.il. (Levantamento de Recursos Naturais, 23).
- CAMPOS, M. de et alii. 1979. Projeto Rio Jaguaribe, Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba; relatório final de geologia. Brasília, DNPM. 149p. (DNPM. Série Geologia, 4, Seção Geologia Básica, 1).
- CAMPOS, & SILVA, A. 1968. O Grupo Barreiras e unidades correlatas no Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 4, Recife, 1968. Resumo das comunicações... Recife, SBG. p.21-22.

- CAMPOS, & SILVA, A. 1965. O Grupo Barreiras na região de Natal. Natal, Univ. Fed. Rio Grande do Norte, Inst. Antropol. 4p. (Relatório comum, geol. 1).
- CAMPOS, & SILVA, A.; MABESOONE, J.M. & BEURLIN, K. 1971. Estratigrafia do Grupo Barreiras nos Estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Rev. Bras. Geol., Recife, 1 (2): 1-13.
- CLIMATOLOGIA, geologia e recursos hídricos s.d. s.l., Consórcio TAHAL-SONDOTÉCNICA. cap.3.
- COMMITTEE on WATER QUALITY CRITERIA. 1972. Water quality criteria, 1972. Washington, Environmental Protection Agency.
- COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTOS DO RIO GRANDE DO NORTE - CAERN. 1970. Estudo hidrogeológico de Natal, RN. Recife, Consulta Técnica de Geologia e Engenharia. 224p.il.
- COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. 1978. Mapa geológico preliminar do Rio Grande do Norte; escala 1:500 000. Recife.
- COMPANHIA NORDESTINA DE SONDAGENS E PERFURAÇÕES - CONESP. 1965/66. Perfis litológicos de 20 poços rasos, perfurados para água na Bacia Potiguar. São Paulo. (inédito).
- CRANDALL, R. 1910. Geografia, Geologia, suprimento d'água, transportes e açudagem nos Estados orientais do Norte do Brasil: Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Rio de Janeiro, Ministério de Viação e Obras Públicas, Inspeção de Obras Contra Secas. 132p.il. (Publicação IFOCS nº 4). (Série I.D.E. Hidrogeologia, Geologia, Assuntos Gerais).
- CRUZ, W.B. da. 1967. Alguns aspectos de circulação e salinização de águas subterrâneas em rochas cristalinas no nordeste do Brasil. Recife, SUDENE. 20p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 8).
- CRUZ, W.B. da & FRANÇA, H.P.M. 1970. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste: folha nº 14, Jaguaribe-SO. Recife, SUDENE. (SUDENE, Hidrogeologia, 31).

- CRUZ, W.B. da & MELLO, F. de A.F. de. 1974. Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do nordeste do Brasil. Recife, SUDENE. 128p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 19).
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. 1976. Hidrologia Subterrânea. Barcelona, Omega.
- CYPRIANO, J.L. & NUNES, A.B. 1968. Geologia da Bacia Potiguar. Maceió, PETROBRÁS, DEXPRO/DIVEX/RPNE. 74p. (Relatório interno, 3088).
- DANTAS, J.R.A. 1974. Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha Natal, SB-25, folha Recife, SC-25. Brasília, DNPM. 21p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS - DNOCS. 1976. Relatório dos estudos hidrogeológicos; Baixo Açu. Recife, SERETE.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS - DNOCS. 1978. Plano diretor para o aproveitamento dos recursos de solo e água no Vale do Apodi, Rio Grande do Norte. São Paulo, Hidro service. v.2 e 3.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS E SANEAMENTO - DNOS. 1969. Aproveitamento hidro-agrícola da Bacia do Rio Ceará-Mirim e da Lagoa de Extremoz. Rio de Janeiro, TAHAL/TEL-AVIV/SONDOTÉCNICA. 3v.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - DNPEA. Convênio MA/DNPEA/SUDENE/DRN. 1971. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte. Recife. 53lp.il. (Série Pedologia nº 9).
- FEITOSA, E.C. 1978. Estudo geofísico por eletrorresistividade da porção ocidental da Bacia Potiguar, RN. São Paulo, IPT. (Relatório interno).
- GAMA, C.D. da. 1982. Computação gráfica interativa de dados geológicos vetoriais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Brasília, 1982. Anais... Brasília, CNPq/INPE. v.1, p.17-24.il.

HARGREAVES, G.H. 1965. Evapotranspiração e sua relação com a recarga de água subterrânea; traduzido por Luiz Tasso de Brito Dantas. Água Subterrânea, 1 (2):32-41, mar/maio.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - IPEN. 1981. Avaliação dos recursos hídricos com aplicação de isótopos no Rio Grande do Norte. São Paulo. (3 relatórios técnicos parciais e um relatório técnico final elaborado pelo IPEN/CARRET).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO-IPT. 1981. Reconhecimento hidrogeológico e estudo sobre a qualidade atual das águas subterrâneas da Grande Natal. São Paulo. 2 v. (IPT. Relatório, 14 813).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO-IPT. 1981. Ensaio geofísicos (sondagens elétricas verticais) em apoio ao estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. São Paulo. (Relatório nº 16 018).

_____. 1982. Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. São Paulo. 9 v. (IPT, Relatório nº 15 795).

KEGEL, W. 1957. Contribuição ao estudo da bacia costeira do Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro, DNPM. 52p. (DNPM. Boletim, 170).

LEAL, J.M. et alii. 1974. Caracterização de águas do Nordeste Brasileiro com isótopos ambientais. Recife, SUDENE, Div. Documentação. 32p. (SUDENE, Hidrogeologia, 47).

LOGAN, J. 1965. Interpretação de análises químicas de água; traduzido por Arakneia Martins de Lemos. Recife, s.c.p. 74p.il.

MABESOONE, J.M. 1967. Sedimentologia da faixa costeira Recife-João Pessoa. Bol. Soc. Bras. Geol., 16 (1):57-72.

MABESOONE, J.M.; CAMPOS e SILVA, A.; BEURLIN, K. 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Rev. Bras. Geoc., 2:173.

- MAIOR, J.S. 1969. Ground water in northeastern Brazil. Recife, SUDENE. 82p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 21).
- MANOEL FILHO, J. 1970. Inventário hidrogeológico básico do nordeste; folha nº 10: Jaguaribe-NE. Recife, SUDENE. (SUDENE, Hidrogeologia, 30).
- MANOEL FILHO, J. 1972. Elementos de hidrogeologia prática. 2.ed. Recife, SUDENE. 353p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 13).
- MANOEL FILHO, J. 1973. Reconhecimento hidrogeológico da planície aluvial do Apodi, RN; definição preliminar de viabilidade para irrigação. Recife, SUDENE. 84p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 42).
- MANOEL FILHO, J. et alii. 1969. Bacia Potiguar; estudo por analogia elétrica das condições de exploração das águas subterrâneas do arenito Açu na região de Mossoró, RN. Recife, SUDENE. 78p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 23).
- MELLO, Jr, J.L. 1965. Fosforita, calcário, monazita e água subterrânea nos Estados de Pernambuco, Paraíba, Piauí, Maranhão e Rio Grande do Norte. s. L., DNPM.
- MENOR et alii. 1980. Qualificação de rochas carbonáticas aflorantes na Bacia do Apodi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Balneário Camboriú, SC. Anais... Balneário de Camboriú, SC. SBG, v.3. p.1649-1663.
- MERCADO, A. et alii. 1976. Utilização conjunta de dados hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos para avaliação do balanço de águas subterrâneas da Bacia Potiguar. Boletim de Recursos Naturais, Recife. SUDENE/DRN, 14 (1/2):33-61.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. 1969. Atlas climatológico do Brasil; redução de mapas selecionados. Rio de Janeiro, ECEPLAN, Escritório de Meteorologia, IBGE. 100p.il.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria Geral. MME/SG. 1981. Projeto RADAMBRASIL; folhas SB-24/25, Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da

terra. Rio de Janeiro. 744p.il. + Anexos. (Levantamento de Recursos Naturais, 23).

MIURA, K. & BARBOSA, J.C. 1972. Geologia da plataforma continental do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém. Anais... Belém, SBG. v.2, p.57-66.

OJEDA, H.A.O. 1981. Estrutura, estratigrafia e evolução das bacias marginais brasileiras. Rev. Bras. Geoc., 11, (4), dez. (no prelo).

OLIVEIRA, A.I. & LEONARDOS, O.H. 1943. Geologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro. p.142-148.

PAIVA, G. de. 1937. Água subterrânea: Estado do Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. p.142-148. (DNPM/DFPM, Boletim, 18).

PROJETO Rio Jaguaribe, relatório final. 1976. Recife, DNPM/CPRM. 15v.

REBOUÇAS, A. da C. 1966. Faixa sedimentar costeira; Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte: aspectos hidrogeológicos. (Trab. apres. no Simpósio de Geologia do Nordeste, 2, Recife, 1966).

REBOUÇAS, A. da C. 1967. Estudo sedimentológico e paleontológico de perfil das minas de gipsita. Mossoró. 22p. (Coleção Mossoroense. Série B, nº 61).

REBOUÇAS, A. da C. 1968. Características hidrodinâmicas de alguns aquíferos do nordeste. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 4, Recife, 1968. Resumo das comunicações... Recife, SBG/Núcleo de Pernambuco. p.50-53il.

REBOUÇAS, A. da C. 1972. Hidrologia das secas. Nordeste do Brasil. Recife, SUDENE. 126p.il. (SUDENE, Hidrogeologia, 47).

REBOUÇAS, A. da C. & GASPARY, J. 1971. As águas subterrâneas do Nordeste do Brasil: estimativas preliminares. 2.ed. Recife. SUDENE. (SUDENE, Hidrogeologia, 6).

REBOUÇAS, A. da C.; MANOEL FILHO, J.; BENOIT, H. 1967. Bacia Potiguar; estudo hidrogeológico. Recife, SUDENE. 2v.11. (SUDENE, Hidrogeologia, 15).

RIJO, L. et alii. 1977. Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brazil. Geophys. 42 (4):821-822.11.

RYZNAR, J.W. 1944. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. Journal American Water Works Association, 36:472-486, Apr.

SALAMUNI, R. 1977. Geologia e geomorfologia entre Natal e Ponta Negra, RN; relatório técnico. Curitiba. (inédito).

SALATI, E.; LEAL, J.M.; CAMPOS, M.C. 1974. Environmental isotopes used in a hydrogeological study of northeastern Brazil. In: ISOTOPE techniques in Groundwater hydrology. Vienna, International Atomic Energy Agency. v.1, p.259-283.

SALATI, E. et alii. 1976. Estudo preliminar das concentrações de O^{18} e D em águas do Nordeste brasileiro. Boletim de Recursos Naturais, SUDENE/DRN, 14 (1/2):63-92.

SALIM, J.; LIMA, M. do S.; MABESOONE, J.M. 1973. Feições morfológicas do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracaju, 1973. Anais... Aracaju, SBG. v.1, p. 421-426.

SAMPAIO, A.V. & SCHALLER, H. 1968. Introdução à estratigrafia cretácea da Bacia Potiguar. Bol. Téc. Petr., Rio de Janeiro, 11, (1):19-44, jan/mar.

SANTOS, J.; COSTA, T.B. da; HAMZA, V.M. 1983. Projeto: determinação do movimento de água subterrânea na Bacia Potiguar a partir de perfilagem de temperatura; relatório final. Natal, Convênio SUDENE/UFRN. 101p.

SANTOS, J.P. dos; AZEVEDO, S.G. de & MISTRETTA, G. 1984. Novos aspectos da salinização das águas subterrâneas do cristalino do Rio Grande do Norte. São Paulo, IPT. 40p. (Publicação IPT nº 1555 - Série Comunicação técnica, 314).

SANTOS, M.A.V. dos. 1977. Estudo hidrogeológico da planície aluvial do Apodi, RN; economicidade de poços para irrigação. Recife, MINTER-SUDENE-DRN/MEC-UFPE-CT. Anexo 1, 2. (Convênio DRN-18/73).

SIAL, A.N. 1976. The post-paleozoic vulcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM on CONTINENTAL MARGINS of ATLANTIC TYPE, São Paulo, 1975. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 48 (suplemento):229-311.

SOPPER, R.H. 1913. Geologia e suprimento d'água subterrânea do Rio Grande do Norte e Parahyba. s.L., IFOCS. (IFOCS. Boletim nº 26. Série ID).

SOUTO MAIOR, J. 1969. Ground water in northeastern Brazil. Recife, SUDENE. 82p.il. (SUDENE. Hidrogeologia, 21).

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE. Grupo de Estudos do Vale do Jaguaribe. Convênio SUDENE/ASMIC. 1967. Estudo geral de base do Vale do Jaguaribe, Recife. 245p.il. (SUDENE. Hidrogeologia, 7). Association pour L'Organisation des Missions de Cooperation Technique - ASMIC.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. 1980. Plano de aproveitamento integrado dos recursos hídricos do nordeste do Brasil; fase 1. Recife.

_____. s.d. Estudos de reconhecimento e estudos hidrogeológicos para aproveitamento integrado; região centro-leste da Bacia Potiguar e bacias costeiras da Paraíba e Pernambuco - Área A. s.L., DRN/CONESP/OESA. v.5.

THRAILKILL, J. 1968. Chemical and Hydrologic factors in the excavation of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, 79:19-46, jan.

TODD, D.K. 1959. Hidrologia de águas subterrâneas, trad. Araken Silveira e Evelyn Bloem Souto Silveira. São Paulo, Edgard Blücher.

VEGESACK, M. de. 1954. As águas subterrâneas no Estado do Rio Grande do Norte. In: VAGELER et alii. Levantamento agrogeológico do Estado. Natal, Depto. de Imprensa. p.103-118il.

WARING, G.A. 1982. Suprimento d'água no nordeste do Brasil. 4ed. Mossorô, Centro de Estudos e Debates Presidente Café Filho/ Escola Superior de Agricultura Mossorô. (Coleção Mossoroense, 199).