

ESTUDO DE POÇOS PROFUNDOS NO CRISTALINO, DURANTE  
UM PERÍODO DE SECA, USANDO MEDIDAS ISOTÓPICAS

POR

M.F.Santiago<sup>1</sup>, H.Frischkorn<sup>2</sup>, e A.N.Serejo<sup>1</sup>

RESUMO-- Análises de carbono-14, trítio e condutividade nas águas de 29 poços no cristalino do noroeste do Ceará são utilizadas no estudo do tempo de residência da água armazenada, do mecanismo de recarga e da origem da salinização. As medidas mostram que 20 poços têm água moderna indicando recarga recente, anual, e somente 2 mostram idade acima de 1.000 anos. Os dois poços com água velha, apesar do grande tempo de contato da água com o aquífero, apresentam condutividades das mais baixas encontradas, indicando que a dissolução da rocha matriz não é o processo responsável pela salinização.

INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil, especialmente o Ceará, passou por um período de Seca, terminado em 1984, com precipitações anuais extremamente baixas em relação à média como, por exemplo, na área desta pesquisa no ano de 1983, nas estações de São Benedito com 565 mm comparados com a média de 1974 mm, em Reriutaba com 288 mm contra 943 mm e em Santa Quitéria com 125 mm contra 789 mm (DA SILVA - 1985).

Durante este período acompanhamos, com medidas de carbono-14, trítio e condutividade elétrica, o comportamento de 29 poços profundos no embasamento cristalino.

---

<sup>1</sup>Professor, Departamento de Física da UFC, Fortaleza

<sup>2</sup>Professor, Departamento de Hidráulica da UFC, Fortaleza.

## ÁREA DE ESTUDO

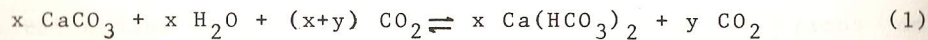
A área estudada é compreendida entre os paralelos 4° e 4°30' de Latitude Sul e os meridianos 40° e 40°45' de Longitude Oeste, abrangendo o alto da bacia hidrográfica do rio Acaraú (Figura 1). É constituída predominantemente de rochas metamórficas, principalmente ectinitos e migmatitos, com todas as unidades de rocha fortemente erodidas e sem manto de intemperismo, na maior parte da região.

O mapa de drenagem-fraturas elaborado pela SEEBLA (1980) evidencia, na área, o controle tectônico da drenagem superficial; os cursos de água coincidem com as fraturas sendo eles considerados os responsáveis pela alimentação do aquífero.

## METODOLOGIA

A utilidade do carbono-14 para investigações hidrológicas foi reconhecida primeiro por MÜNNICH (1957) que mostrou, através de um modelo, como o carbono-14 chega à água subterrânea e como pode ser utilizado no estudo de problemas hidrológicos.

O carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) fóssil (livre de carbono-14) é transformado em bicarbonato por ação de CO<sub>2</sub> (em equilíbrio com a atmosfera) dissolvido na água, proveniente da respiração das raízes e da composição da matéria orgânica, de acordo com a reação (WENDT et al.-1967)



onde x e y são as concentrações molares.

A percentagem do CO<sub>2</sub> do solo que contribui para o carbono total, chamada fator de diluição, Q, é dada por

$$Q = (x + y) / (2x + y) \quad (2)$$

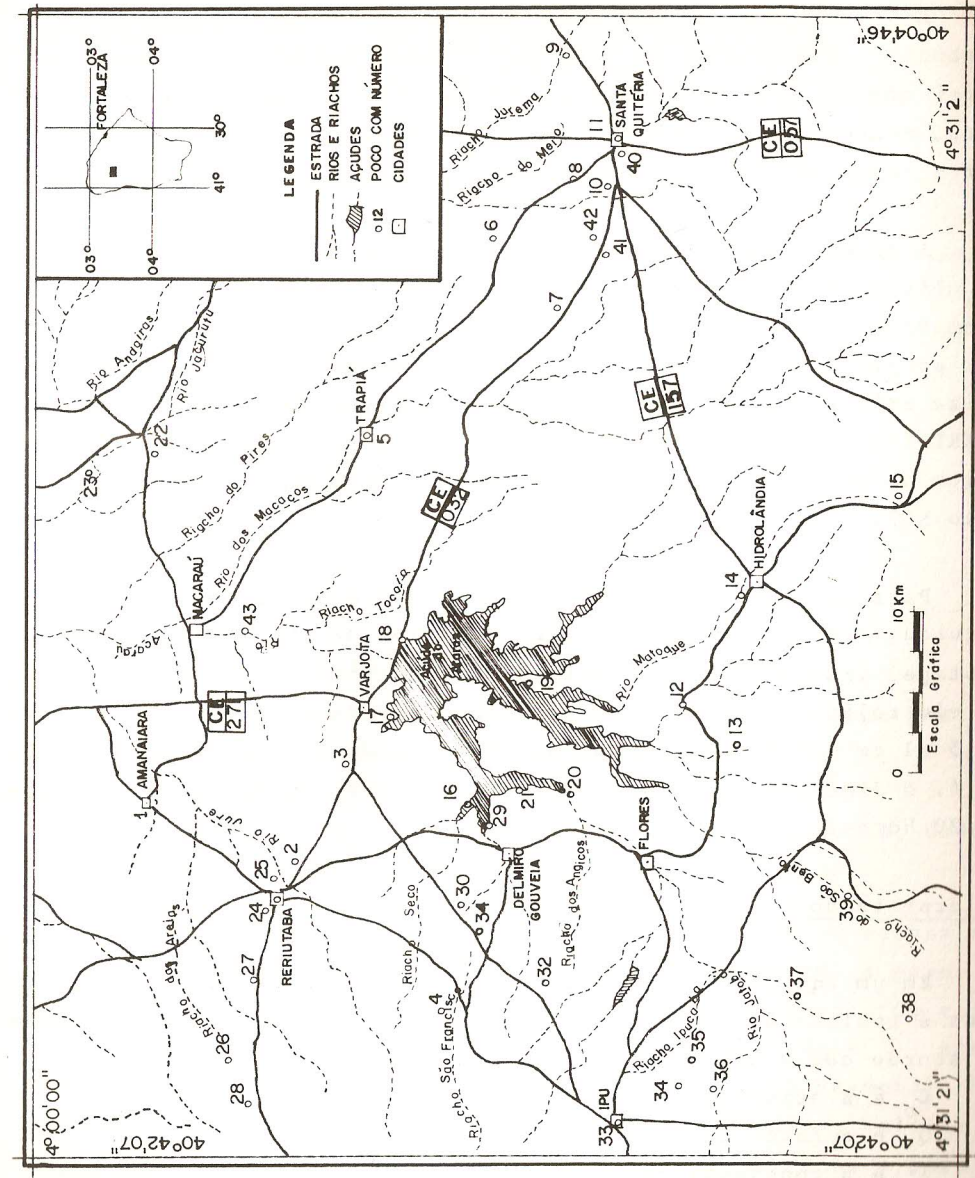


Figura 1. Localização dos poços amostrados.

Assim, a água subterrânea fica marcada pelo radioisótopo carbono-14 (meia-vida de 5730 anos) que, isolado da atmosfera, decai com a lei da radioatividade. Uma medida da atividade específica, proporcional à concentração de carbono-14, permite determinar o tempo decorrido desde a infiltração.

A amostragem consiste na precipitação dos bicarbonatos e do CO<sub>2</sub> livre, em forma de carbonato de bário. No laboratório é transformado em acetileno que é usado como gás de contagem em um contador proporcional à gás construído especialmente para medida de baixa atividade. Estes métodos experimentais são descritos em SWART (1964) e GEYH (1967). Os resultados são expressos em percentagem do moderno, em relação ao padrão ácido oxálico distribuído pelo NBS, e em anos antes de 1950.

Para as medidas de trítio utiliza-se o método de cintilação líquida, com um contador CORUFLOW CMF-101 da ICN Instruments e Instagel (Packard) como cintilador. O enriquecimento prévio é feito eletroliticamente com uma redução de volume de 380 ml para 11,5 ml em 126 horas obtendo-se um fator de enriquecimento de 28,4. O limite de detecção é de 0,5 U.T. para um tempo de contagem de 20 horas.

### Interpretação

Em um aquífero confinado, sem mistura após a infiltração, a água é isolada da atmosfera e a atividade específica, C, decresce de acordo com a lei  $C = Q C_0 \exp(-\lambda t)$ , onde

$C_0$  é a atividade da atmosfera,

$Q$  é o fator de diluição e

$\lambda$  é a constante de decaimento de carbono-14.

A "idade", t, o tempo passado desde a infiltração, é dada, neste caso, por

$$t = (1/\lambda) (\ln (C_0/C) + \ln Q) \quad (3)$$

Usa-se normalmente a "idade" como parâmetro, em vez do valor correspondente de "percentagem do moderno", por ser melhor entendida fisicamente. No entanto, para um aquífero aberto que recebe recargas periodicamente, e cuja água representa uma mistura de muitas componentes, a idade perde o sentido hidrológico.

Para um aquífero aberto, bem misturado, no equilíbrio, com entrada (e saída) constante - caso este conhecido como "modelo exponencial" - a concentração de carbono-14 na água é dada pela soma das contribuições anteriores, ponderadas com um fator de mistura e de decaimento radioativo (GEYH - 1972):

$$C_n = C_{o,1950} Q(1-1/T)^{n-1950} \exp(-\lambda(n-1950)) + \frac{Q}{T} \sum_{i=1951}^n C_{o,i} (1-1/T)^{n-i} \exp(-\lambda(n-i)) \quad (4)$$

onde  $C_{o,1950}$  é a concentração na atmosfera em 1950,

$C_{o,i}$  são as concentrações na atmosfera nos anos posteriores a 1950,

$n$  é o ano da coleta e

$T$  o parâmetro chamado de tempo de residência, dado por

$T =$  volume/recarga.

Os  $C_{o,i}$  (Tabela 1) usados neste trabalho baseiam-se nas medidas de NYDAL & LÖVSETH (1983) para o hemisfério sul e para os meses de março, abril e maio, que são os mais chuvosos. Os valores entre 1981 e 1985 foram obtidos por extrapolação e entre 1951 e 1958 de valores usados por GEYH (comunicação pessoal). Nesta Tabela encontram-se, como exemplo destes cálculos, valores de  $C_{1982}$  para tempos de residência, T, entre 2 e 100 anos e para fatores de diluição entre 0,8 e 1,0.

Foram feitos, também, cálculos do modelo exponencial para trítio. Não foi feita uma interpretação devido à falta de uma função confiável para este isótopo, uma vez que as medidas sistemáticas da IAEA, nesta área, começaram somente em 1965, dois anos

Tabela 1 - Modelo exponencial com função de entrada  $C_{oi}$ , função de reposta C, em 1982, para tempos de residência entre 2 e 100 anos, e fatores de diluição de 0,80, 0,85, 0,90, 0,95 e 1,0.

i	$C_{oi}$	T (anos)	$C_{1982}$				
			Q=0,80	0,85	0,90	0,95	1,0
1951	97	2	102	108	115	121	128
1952	97	4	105	111	118	124	131
1953	97	6	107	113	120	127	133
1954	98	8	107	114	121	127	134
1955	100	10	107	114	120	127	134
1956	102	12	106	113	119	126	133
1957	107	14	105	111	118	125	131
1958	112	16	104	110	117	123	130
1959	116	18	102	109	115	122	128
1960	119	20	101	108	114	120	127
1961	120	22	100	106	113	119	125
1962	123	24	99	105	111	118	124
1963	135	26	98	104	110	116	123
1964	156	28	97	103	109	115	121
1965	164	30	96	102	108	114	120
1966	163	32	95	101	107	113	119
1967	160	34	95	101	107	113	119
1968	157	36	94	100	106	112	118
1969	154	38	93	99	105	111	117
1970	153	40	93	99	104	110	116
1971	150	42	92	98	104	110	115
1972	147	44	92	97	103	109	115
1973	144	46	91	97	103	108	114
1974	141	48	91	96	102	108	114
1975	138	50	90	96	102	107	113
1976	136	52	90	96	101	107	113
1977	134	54	90	95	101	106	112
1978	132	56	89	95	100	106	112
1979	130	58	89	94	100	106	111
1980	129	60	89	94	100	105	111
1981	128	62	88	94	99	105	110
1982	127	64	88	93	99	105	110
1983	126	66	88	93	99	104	110
1984	126	68	87	93	98	104	109
1985	125	70	87	93	98	104	109
		72	87	92	98	103	109
		76	86	92	97	103	108
		80	86	91	97	102	108
		84	86	91	96	102	107
		88	85	91	96	101	107
		92	85	90	96	101	106
		96	85	90	95	101	106
		100	84	90	95	100	106

após a máxima concentração encontrada no hemisfério norte.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta os locais dos poços amostrados nas coletas de abril(1ª), agosto(2ª) e dezembro de 1982(3ª), outubro de 1983(4ª), janeiro(5ª) e agosto de 1984(6ª). As características destes poços encontram-se na Tabela 2.

Os resultados das medidas de carbono-14, expressos em % do moderno, estão apresentados na Tabela 3 juntamente com valores de idade aparente, calculada com a meia-vida convencional, 5567 anos, e com um fator de diluição Q=1. Adotando o critério de STUIVER & POLACH (1977) considerou-se águas a partir de 97,6% moderno, ou seja, com idade aparente menor do que 200 anos, como sendo águas modernas ("mod"). A interpretação destes resultados é feita através do modelo exponencial, em termos de tempo de residência, como discutida na metodologia, e apresentada na Tabela 4. (Amostra cuja idade foi especificada na Tabela 3 é citada nesta Tabela como "água velha").

Em vários casos a concentração de carbono-14 encontrada é compatível com fatores de diluição entre 0,85 e 1,0. No entanto, os poços 1, 2, 11 e 14 permitem somente valores entre 0,95 e 1,0. Como a área estudada é geológica e fisiograficamente homogênea, acredita-se, portanto, que esta é a faixa característica de todos os poços e nela baseia-se nossa interpretação.

Dos 29 poços amostrados 20 têm água moderna e, nos restantes, 2 têm idade acima de 1.000 anos e 7, amostrados na 5ª coleta, têm entre 200 e 500 anos. É importante observar que esta coleta foi realizada no final do período de seca. Acredita-se que estes poços estão estressados por falta de recarga e que apresentariam depois de um período de chuvas intensas, valores bem mais altos. Este efeito foi observado em vários poços com coletas repetidas até a 6ª coleta, como por exemplo, no local 5 que apresentou inicialmente(em abril de 1982) 118 % mod, baixando até



Tabela 2 - Localização e características dos poços amostrados

Local nº	LOCAL	Município	Prof. (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)
01	Amanaiara	Reriutaba	50	-	3,1	-
02	Riacho dos Porcos	Reriutaba	42	4,0	-	-
03	Campo de Aviação	Reriutaba	40	2,4	9,1	27,0
04	Taboleiro	Ipu	85	2,0	19,0	-
05	Trapiã	S.Quitéria	60	1,0	6,0	-
06	Faz.Timbauba	S.Quitéria	35	3,2	12,0	21,0
07	Faz.Surubim	S.Quitéria	32	2,4	8,4	21,0
08	Faz.Experimental	S.Quitéria	40	4,0	4,0	18,0
09	Faz.Itu	S.Quitéria	50	2,0	7,0	25,0
10	Faz.Potrinha	S.Quitéria	44	25,5	8,0	26,0
11	Pr.Sen.Pompeu	S.Quitéria	41	1,2	6,0	32,0
12	Irajã	Hidrolândia	60	14,0	2,0	14,0
13	Mulungu Velho	Hidrolândia	60	1,5	3,0	52,0
14	Faz.Nova	Hidrolândia	70	11,3	1,6	30,1
15	Faz.Jatobã	Hidrolândia	60	16,8	11,8	20,0
22	Malhada Grande	Araras	60	11,4	4,6	38,3
23	Santa Cruz	Araras				
24	Bairro Carão	Reriutaba	42	6,2	6,3	23,7
25	Bairro S.Luiz	Reriutaba	60	10,2	3,5	41,8
26	Areias	Reriutaba				
27	Quandu	Reriutaba				
28	Mufumbal	Reriutaba				
29	Otavilândia	Ipu	54	7,0	3,5	37,6
30	Amontado	Ipu	54	7,6	7,9	29,4
31	Olheiro	Ipu				
32	Faz.Refrigerio	Ipu				
33	Trav.Miguel Vitor	Ipu	48	0,25	1,9	36,8
34	Alegria	Ipu	60	9,5	1,3	44,9
35	Faz.Bom Jesus	Ipu	60	3,1	5,2	35,5
36	Faz.Barrinhas	Ipu	54	5,1	4,2	36,0
37	Faz.Jatobã	Ipu	66	14,3	5,2	37,2
38	Faz.Lagoa do Canto	Ipu	66	11,4	1,7	51,0
39	São Bento	Ipu	60	11,4	1,8	41,6
40	Inst.J.de Andrade	S.Quitéria	60	9,0	2,6	22,3
41	Faz.Nova Colômbia	S.Quitéria				
42	Faz.Lagoa	S.Quitéria	50	3,0	6,3	6,0
43	Faz.Timbauba	S.Quitéria	54	8,7	10,7	22,0

Tabela 3 - Medidas de carbono-14. (\* 6ª coleta)

Local Nº	1ª coleta		2ª coleta		3ª coleta		4ª/6ª coleta		5ª coleta	
	% mod.	idade (anos)	% mod.	idade (anos)	% mod.	idade (anos)	% mod.	idade (anos)	% mod.	idade (anos)
01	125,3	mod	109,7	mod	111,2	mod	-	-	22	109,0 mod
02	130,4	mod	131,3	mod	112,1	mod	131,0*	mod	23	102,1 mod
04	108,6	mod	105,8	mod	-	-	-	-	24	112,7 mod
05	118,3	mod	116,5	mod	104,0	mod	99,4 mod 116,2*	{ mod	25	94,4 466
06	-	-	121,6	mod	-	-	-	-	28	35,5 8322
07	79,8	1811	87,9	1035	77,8	2016	79,4 mod 89,1*	{ 1851 929	29	97,8 265
08	113,1	mod	118,4	mod	-	-	-	-	30	98,5 mod
09	-	-	107,2	mod	-	-	-	-	32	96,3 302
10	112,2	mod	114,0	mod	-	-	-	-	33	96,3 300
11	122,5	mod	-	-	124,5	mod	-	-	34	118,8 mod
12	-	-	-	-	118,6	mod	-	-	35	94,9 416
13	115,1	mod	111,1	mod	108,6	mod	-	-	38	104,6 mod
14	123,5	mod	116,4	mod	-	-	106,1	mod	39	95,9 287
15	116,0	mod	115,1	mod	-	-	129,8*	mod	40	93,9 507
									41	108,8 mod

Tabela 4 - Tempos de residência para Q = 0,95 e 1,0 (\*6.<sup>a</sup> coleta)

Local Nº	1. <sup>a</sup> coleta		2. <sup>a</sup> coleta		3. <sup>a</sup> coleta		4. <sup>a</sup> /6. <sup>a</sup> coleta		Local		5. <sup>a</sup> coleta	
	Q = 0,95	1,0	0,95	1,0	0,95	1,0	0,95	1,0	Nº		0,95	1,0
01	4 ou 14	22	40	65	38	60	-	-	22		45	73
02	-	4 ou 16	-	4 ou 14	44	72	-	4 ou 14	23		86	>100
04	44	72	58	>100	-	-	-	-	24		34	54
05	24	36	26	38	68	>100	-	>100	25		água velha	
06	-	-	18	28	-	-	*28	42	28		água velha	
07	água velha	água velha	água velha	água velha	água velha	água velha	água velha	água velha	29		água velha	
08	33	50	24	36	-	-	-	-	30		>100	>100
09	-	-	52	85	-	-	-	-	32		água velha	
10	36	55	30	47	-	-	-	-	33		água velha	
11	17	26	-	-	14	23	-	-	34		22	34
12	-	-	-	-	23	35	-	-	35		água velha	
13	28	43	38	59	46	74	-	-	38		66	>100
14	15	25	25	39	-	-	57	100	39		água velha	
15	26	40	28	43	-	-	-	*14	40		água velha	
									41		46	76

99,4 na 4.<sup>a</sup> coleta (na mesma época da 5.<sup>a</sup> coleta) e que se recuperou depois do inverno de 1984, atingindo na 6.<sup>a</sup> coleta praticamente o valor inicial. Comportamento semelhante apresentaram os poços 2, 7 e 15.

De um modo geral, os tempos de residência encontrados se situam na faixa de umas dezenas de anos. Uma avaliação mais precisa não é possível por causa das limitações da validade do modelo exponencial especialmente durante a seca. O fato de haver mudanças no período de observação indica, primeiro, que a recarga na seca foi menor do que as saídas e, segundo, que o aquífero cristalino não é bem misturado mas mostra uma estratificação, e que com a exploração excessiva as águas mais velhas foram mobilizadas.

As medidas de trício confirmam estas conclusões (Tabela 5). Todos os poços analisados, com poucas exceções, contêm trício com uma concentração acima da de chuva atual,  $\approx 2$  U.T., indicando uma "memória" do trício proveniente dos testes nucleares que provocaram um aumento de até 150 vezes acima do normal, compatível com um tempo de residência de umas dezenas de anos.

Os valores médios de 4,3 U.T. (1.<sup>a</sup> coleta), de 3,0 (2.<sup>a</sup> coleta), de 2,5 (4.<sup>a</sup> coleta) e de 2,3 (5.<sup>a</sup> coleta) mostram um decréscimo confirmando a exploração, cada vez maior, de componentes mais velhas do aquífero.

É importante notar que as componentes com maior tempo de residência normalmente não apresentam maior condutividade elétrica (Figura 2), como seria esperado. O poço 7 com idade de  $\approx 1800$  anos (1.<sup>a</sup> coleta) tem uma concentração de sais das mais baixas encontradas. Obviamente o tempo de contato com a rocha não é o parâmetro importante para a salinização, que tem, portanto, causas externas.



Tabela 5 - Concentração de Trício em U.T.

Local n°	Coletas			Local n°	Coleta 5. <sup>a</sup>
	1. <sup>a</sup>	2. <sup>a</sup>	4. <sup>a</sup>		
01	5,4	3,2	2,4	40	2,4
02	-	4,7	1,6	41	2,5
03	7,0	-	3,7	42	3,0
04	1,1	2,4	<0,5	43	1,2
05	5,0	-	2,4		
06	4,3	2,5	2,6		
07	0,7	1,1	2,0		
08	5,3	-	4,4		
09	-	3,0	3,7		
10	3,6	3,5	-		
11	7,2	4,3	2,2		
12	-	2,6	-		
13	3,7	-	3,1		
14	4,4	-	1,6		
15	3,7	-	-		

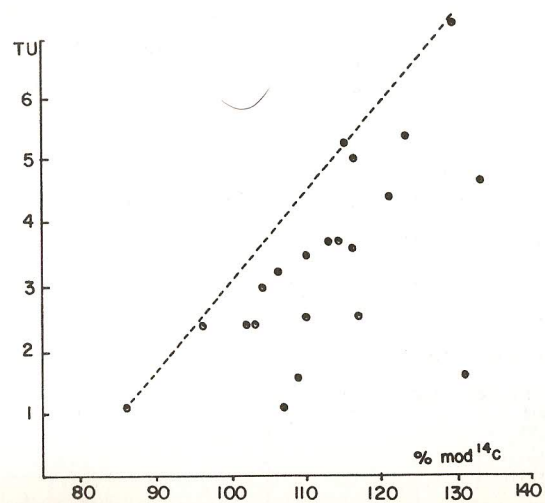


FIGURA-2 CONCENTRAÇÃO DE TRÍCIO (TU) COM CONCENTRAÇÃO DE <sup>14</sup>C (‰ mod)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FINEP o financiamento da pesquisa e ao KFA, Alemanha, o apoio ao laboratório.

REFERÊNCIAS

DA SILVA, R.A. - "Probabilidades de chuva no Estado do Ceará". Tese de Mestrado. Boletim Técnico do Departamento de Hidráulica, UFC, Fortaleza. Recursos Hídricos. 105 p, 1985.

GEYH, M.A. - "Experience gathered in the construction of low-level counters". in: Radioactive Dating and Methods of Low-level Counting, IAEA (Viena), 575-589, 1967.

GEYH, M.A. - "On the determination of the initial <sup>14</sup>C content in groundwater". in: 8<sup>th</sup> Intern. Conf. Radiocarbon Dating, New Zealand, Proceedings, 369-380, 1972.

MÜNNICH, K.O. - "Messung des <sup>14</sup>C-Gehaltes von hartem Grundwasser", Naturwiss. 44:32, 1957.

NYDAL, R. & LÖVSETH, K. - "Tracing Bomb <sup>14</sup>C in the Atmosphere 1962 - 1980". J. Geophys. Res. 88 (C6):3621-3642, 1983.

SEEBLA - Plano Diretor. Vale do Acaraú. DNOCS/SEEBLA, Fortaleza, 1980.

STUIVER, M. & POLACH, H. - "Reporting of <sup>14</sup>C data". Radiocarbon, 19 (3):355-363, 1977.

SWART, E. - "The direct conversion of wood charcoal to lithium carbide in the production of acetylene for radiocarbon dating". Experientia, 20(47):1-2, 1964.

WENDT, I.; STAHL, W.; GEYH, M.A.; FAUTH, F. - "Model experiments for <sup>14</sup>C water-age determinations". in: Isotopes in Hydrology. IAEA (Viena). 321-337, 1967.