

THAÍS DE OLIVEIRA BUENO

**CARACTERIZAÇÃO DA RADIOATIVIDADE DAS
ÁGUAS DO AQUÍFERO GUARANI**

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências Exatas
– Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como parte das
exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de
Formatura no ano letivo de 2007.*

Orientador: Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

Rio Claro (SP)
2007

THAÍS DE OLIVEIRA BUENO

CARACTERIZAÇÃO DA RADIOATIVIDADE DAS ÁGUAS DO
AQUÍFERO GUARANI

Orientador: Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Câmpus de Rio Claro, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental.

Rio Claro
2007

551.49 Bueno, Thaís de Oliveira
B928c Caracterização da radioatividade das águas do aquífero
Guarani / Thaís de Oliveira Bueno. - Rio Claro: [s.n.], 2007
42 f. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão (bacharelado – Engenharia
Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Daniel Marcos Bonotto

1. Águas subterrâneas. 2. Radioatividade. 3. Alfa. 4. Beta.
5. Gama. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Romeu e Leila, por todo o amor e suporte dedicados a mim durante toda a minha vida, especialmente durante esses cinco anos de faculdade. Sem o apoio e incentivo deles, tudo teria sido muito mais difícil, ou até mesmo impossível.

Agradeço aos meus irmãos, Rafael e Kelly, pelo carinho e amizade infinitos. Principalmente à Tata, pelo amor tão profundo reciprocamente alimentado todos os dias.

Agradeço à minha família em geral, tios, tias, primos, primas, cunhados e avós, por sempre terem acreditado no meu potencial e, com isso, me ajudado a seguir adiante.

Agradeço ao Clayton, meu namorado, essa pessoa tão especial e importante que, durante praticamente todo o período da faculdade, me proporcionou o melhor sentimento do mundo, através do qual eu obtive o equilíbrio necessário para chegar até aqui.

Agradeço à minha segunda família, D. Rosa, Júlia, vózinha e Régis, por todo o carinho e pelos momentos agradáveis e divertidos que vivemos neste período, que me ajudaram a relaxar para pegar firme novamente na segunda-feira.

Agradeço ao Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto, meu orientador, por toda a confiança depositada em mim, pela orientação e por todas as boas oportunidades que me ofereceu.

Agradeço ao Bruce, pela ajuda incondicional no LABIDRO, e também pela bela amizade que se firmou com o passar dos anos.

Agradeço à toda a primeira turma da Engenharia Ambiental da Unesp de Rio Claro, turma esta composta por pessoas muito queridas que eu guardarei para sempre no meu coração.

Cada um deles, à sua maneira, me conquistou em definitivo!

Lari, Marcela e Natasha, minhas adoráveis parceiras de trabalhos acadêmicos e ainda mais adoráveis amigas do peito... Lari, corretíssima! Marcela, rainha dos autos e baixos...

Natasha, alopurada! Rê, Carol, Marissa e Gaby, verdinhas tão encantadoras que dá até vontade de pegar no colo! Lu, Silvinha, Talitão e Carlinha, milhas queridas, diversão a toda prova! César e Dani, sorrisos e almas cativantes... Gaúcho, “folga” em pessoa e grande amigo... Topete e Gagá, foram se revelando com o passar dos anos e se descobriram dois grandes boêmios... Gutão, e suas filosofias... Kazuo, e sua incapacidade inerente de chegar na hora marcada... Pira, e o hino do quinze! Ah, e o pintinho também! Mineiro e Rolha, sempre me azucrinando e divertindo... Rolando, esse dispensa comentários... o nome já diz tudo! Puff, que apesar de sempre monopolizar meu namorado nas festinhas, é uma criatura encantadora! E por fim, Satiê e Adriano, casal que, apesar de certa distância, eu admiro muito pela competência e sabedoria.

Agradeço à Fapesp e ao Cnpq, pelas bolsas de iniciação científica concedidas.

Agradeço ao Fábio Braz Machado, pela ajuda com os mapas...

E agradeço ao Universo, por todas as coisas boas que ele me permitiu atrair. A faculdade foi, sem dúvida, uma das coisas mais importantes que aconteceram na minha vida, e também a grande responsável pela pessoa que eu sou hoje.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de decaimento do ^{40}K	8
Figura 2: Séries de decaimento do urânio, tório e actínio.....	10
Figura 3: Localização do Aquífero Guarani.....	16
Figura 4: Pontos de Amostragem.....	18
Figura 5: Sistema de espectrometria gama utilizado.....	21
Figura 6: Espectro gama obtido para a fonte de ^{137}Cs	22
Figura 7: Espectro gama obtido para a fonte de ^{60}Co	22
Figura 8: Espectro gama obtido para a fonte de ^{40}K	22
Figura 9: Espectro gama obtido para fonte de ^{133}Ba	22
Figura 10: Curva de calibração em energia para o sistema de espectrometria gama.....	23
Figura 11: Espectro Gama KCl 1mg/L + traçador.....	24
Figura 12: Sistema de espectrometria alfa utilizado.....	27
Figura 13: Espectro alfa típico obtido através da leitura do “padrão Francês”.....	27
Figura 14: Curva de calibração em energia para o sistema de espectrometria alfa.....	29
Figura 15: Espectro Alfa KCl 1mg/L + traçador.....	30
Figura 16: Correlação da atividade beta total com o fluxo subterrâneo.....	36
Figura 17: Correlação da atividade alfa total com o fluxo subterrâneo.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados utilizados para a calibração em energia do sistema de espectrometria gama.....	23
Tabela 2: Atividade beta total das amostras de água de estâncias hidrominerais.....	25
Tabela 3: Dados utilizados para a calibração em energia do sistema de espectrometria alfa.....	28
Tabela 4: Atividade alfa total das amostras de água de estâncias hidrominerais.....	30
Tabela 5: Atividade beta total das amostras analisadas.....	32
Tabela 6: Atividade alfa total das amostras analisadas.....	33
Tabela 7: Valores do coeficiente de correlação (R^2) obtidos através das regressões lineares simples.....	35

RESUMO

Este trabalho objetivou avaliar a qualidade das águas do Aquífero Guarani no contexto da legislação brasileira vigente quanto aos aspectos radiológicos, além de correlacionar os valores obtidos com dados químicos já disponíveis, visando efetuar uma análise integrada dos dados e estabelecer possíveis tendências com direções de fluxo subterrâneo. As determinações das radioatividades beta e alfa total foram realizadas a partir do emprego da infra-estrutura disponível no LABIDRO-Laboratório de Isótopos e Hidroquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, grandemente implantada a partir de recursos fornecidos pela FAPESP e CNPq. Os sistemas foram calibrados para as determinações de interesse com traçador de atividade conhecida. Testes preliminares foram realizados em amostras de água de elevada radioatividade para se assegurar a aplicabilidade dos métodos. Concluiu-se que as águas analisadas possuem baixa radioatividade, tanto alfa quanto beta total, e, portanto, são adequadas para o consumo humano; que não há relação linear entre os dados obtidos e os dados químicos já disponíveis; e que a direção do fluxo subterrâneo do aquífero não confere nenhuma tendência aos dados gerados.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the quality of “Aquifer Guarani’s” waters in the context of the current legislation related to the radioactive aspects, besides correlating the values obtained with chemical data already available, seeking to make an integrated analysis of the data in order to establish possible tendencies with directions of underground flow. The determinations of the total radioactivity beta and alpha were accomplished through the employment of the available infrastructure at the LABIDRO – Laboratory of Isotope and Hydrochemistry of the Petrology and Metallogeny of UNESP’s Institute of Geosciences and Exact Sciences, largely implanted through resources supplied by FAPESP and CNPq. The systems were gauged for the determinations of interest with tracer of known activity. Preliminaries tests were accomplished with high radioactivity samples of water to check the applicability of the methods. It was ended that the waters analyzed possess low radioactivity, as much alpha as total beta, and, therefore, they are appropriate for the human consumption; that there is not lineal relationship between the obtained data and the chemical data already available; and that the direction of the underground flow of the Aquifer doesn't check any tendency to the generated data.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1. Radioatividade natural.....	7
1.2. Equilíbrio radioativo secular.....	9
1.3. Importância das águas subterrâneas para o abastecimento humano.....	12
1.4. Alguns valores de referência para a radioatividade nas águas.....	13
2. JUSTIFICATIVA.....	14
3. OBJETIVO.....	15
3.1. Objetivos Específicos.....	15
4. ÁREA DE ESTUDO.....	15
4.1. Geologia do Aquífero.....	16
4.2. Pontos de amostragem.....	17
5. MÉTODO E ETAPAS DE TRABALHO.....	18
5.1. Espectrometria Gama.....	19
5.1.1. Sistema Espectrométrico Utilizado.....	20
5.1.2. Calibração em Energia do Sistema Gama.....	21
5.1.3. Calibração em Atividade do Sistema Gama.....	24
5.1.4. Teste da metodologia.....	25
5.2. Espectrometria alfa.....	26
5.2.1. Sistema Espectrométrico Utilizado.....	26
5.2.2. Calibração em Energia do Sistema Alfa.....	27
5.2.3. Calibração em Atividade do Sistema Alfa.....	29
5.2.4. Teste da metodologia.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
6.1. Atividade beta total.....	31
6.2. Atividade alfa total.....	32
6.3. Correlação com os dados físicos e físico-químicos.....	33
6.4. Correlação com o fluxo subterrâneo.....	36
6.5. Avaliação da qualidade das águas do Aquífero Guarani no contexto da legislação brasileira vigente quanto aos aspectos radiológicos.....	37
7. CONCLUSÕES.....	38
8. REFERÊNCIAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

1.1. Radioatividade natural

Durante toda a história da vida na Terra, os organismos têm sido expostos a fontes naturais de radioatividade, estando, por isso, geralmente aptos a tolerar certos níveis de atividade, sem conseqüências prejudiciais. Citam-se, por exemplo, os raios cósmicos, também conhecidos como radiação galáctica, de origem extraterrestre (Sol e Via Láctea) e consistindo principalmente de prótons de alta energia (cerca de 85%), partículas alfa (cerca de 14%) e núcleos atômicos mais pesados (cerca de 1%). Da sua interação com a atmosfera, muitos radionuclídeos são gerados na estratosfera ou troposfera, como o ^3H , o ^{14}C e o ^{36}Cl , os quais são extensivamente utilizados em hidrologia, sobretudo para a datação de águas subterrâneas, onde o primeiro (meia-vida de 12,26 anos) é utilizado para estabelecer se a origem é recente, o segundo (meia-vida de 5730 anos) numa escala de tempo de ~ 40.000 anos atrás, e o terceiro (meia-vida de 301.000 anos) no estudo de aquíferos confinados onde é longo ($\sim 1-1,5 \times 10^6$ anos) o tempo de residência das águas subterrâneas (IVANOVICH; HARMON, 1992).

Além destes radionuclídeos cosmogênicos, contribuem como fonte natural de radioatividade nas águas elementos que estão presentes na Terra desde a sua formação, há cerca de 4500 milhões de anos atrás, inserindo-se nesse contexto apenas aqueles que possuem isótopos radioativos cuja meia-vida é suficientemente longa para permitir que a atividade permaneça existindo mesmo nos dias de hoje. Os mais importantes destes elementos primordiais são o urânio, tório e potássio, que são litófilos e se concentram preferencialmente nas rochas ígneas ácidas ao invés das básicas e ultrabásicas (IVANOVICH; HARMON, 1992).

A abundância crustal média do urânio corresponde a $2,5 \mu\text{g/g}$ (BOWIE; PLANT, 1983), possuindo esse elemento dois isótopos primários, o ^{238}U (abundância de 99,3%) e o ^{235}U (abundância de 0,7%). Ambos são geradores de séries de decaimento radioativo, possuindo o ^{238}U um número maior de produtos de decaimento, muitos dos quais de longa meia-vida. O tório possui apenas um isótopo primordial, o ^{232}Th , contudo, ele é aproximadamente quatro vezes mais abundante que o urânio nas rochas crustais; esse nuclídeo também gera uma série de decaimento radioativo, a qual é relativamente simples quando comparada com a do ^{238}U . O nível médio de potássio nas rochas crustais corresponde cerca de 2,5%, porém, dos três isótopos de ocorrência natural, isto é, ^{39}K , ^{40}K e ^{41}K , apenas o

^{40}K é radioativo. As respectivas abundâncias isotópicas são 93,08, 0,012 e 6,9%, decaindo o ^{40}K por emissão β^- para ^{40}Ca e por captura eletrônica para ^{40}Ar . (DALRYMPLE; LANPHERE, 1969).

Dessa forma, os principais radioelementos de ocorrência significativa no material crustal da Terra são o potássio, o urânio e o tório. O ^{40}K é o isótopo radioativo do potássio de ocorrência natural, constituindo cerca de 0,012% do total de potássio presente na natureza. Sua meia-vida é de $1,3 \times 10^9$ anos. Aproximadamente 89% dos átomos de ^{40}K decaem por emissão de uma partícula β^- para formar átomos de ^{40}Ca , enquanto que os 11% restantes desintegram-se por captura eletrônica para formar átomos de ^{40}Ar , com emissão de um fóton gama de energia 1,46 MeV, conforme esquema da Figura 1. Desde que não ocorra separação de isótopos de potássio no ambiente natural, o fluxo de radiação gerado pelo ^{40}K no volume de rocha está na proporção direta da quantidade de potássio presente (HIODO, 1989).

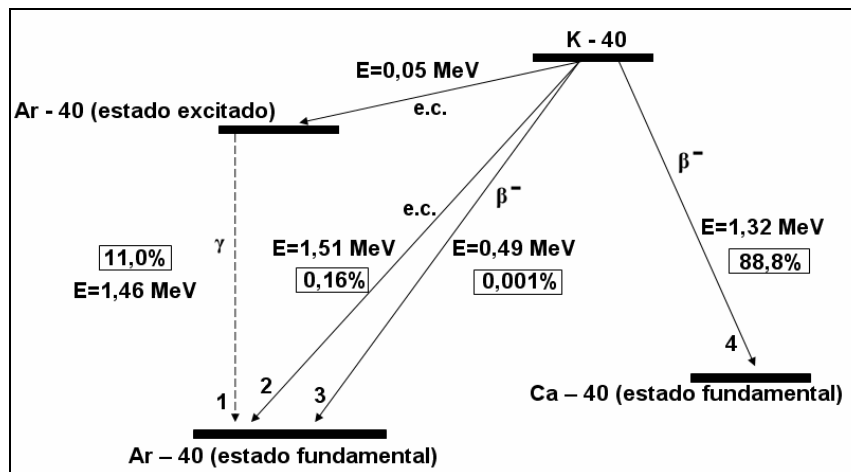


Figura 1: Esquema de decaimento do ^{40}K , por intermédio dos seguintes modos: (1) captura eletrônica com emissão de raios γ , (2) captura eletrônica sem emissão de raios γ , (3) emissão de pósitron, e (4) emissão beta (Também estão indicadas as energias (E) para cada modo de decaimento e a porcentagem de ^{40}K que decai para cada modo). Fonte: Dalrymple e Lanphere (1969).

O urânio natural compreende três isótopos: ^{238}U , ^{235}U e ^{234}U . Quando em equilíbrio radioativo, esses isótopos correspondem, respectivamente, a 99,28%, 0,72% e 0,0054% da abundância do elemento. Os isótopos ^{238}U e ^{235}U dão origem às séries de decaimento do urânio e do actínio, respectivamente, nas quais seus descendentes apresentam meias-vidas que variam de frações de segundo a milhares de anos. As duas séries de decaimento finalizam no elemento estável chumbo, sendo que o ^{238}U , após 11 desintegrações (7 do tipo α e 4 do tipo β^-

), origina o ^{206}Pb . O ^{234}U , citado como um dos três isótopos naturais de urânio, é um nuclídeo radiogênico, pertencente à cadeia do ^{238}U (BONOTTO, 1986).

O tório é um elemento instável, sendo o ^{232}Th o precursor da série natural de decaimento que, após 12 desintegrações (7 do tipo α e 5 do tipo β^-), origina o ^{208}Pb . Na mesma série ocorre outro isótopo natural de tório, o ^{228}Th (IVANOVICH; HARMON, 1992).

A Figura 2 apresenta estas três séries de decaimento (urânio, tório e actínio), onde estão representados os nuclídeos radiogênicos formados e suas respectivas meias-vidas (KU, 1976).

1.2. Equilíbrio radioativo secular

Numa série natural, a radioatividade pode ser medida através da atividade A dos nuclídeos, definida como sendo:

$$A = |dN/dt| \quad (1)$$

Na expressão (1), dN/dt é a taxa de variação do número de nuclídeos por unidade de tempo:

$$dN/dt = -\lambda N \quad (2)$$

onde λ é a constante de decaimento, que representa a probabilidade de um nuclídeo desintegrar-se espontaneamente por unidade de tempo e N é o número de átomos no sistema num tempo t .

A integração da equação (2) fornece a expressão:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

onde N_0 representa o número de átomos inicialmente presentes no sistema. Se $T_{1/2}$ é o tempo para a desintegração de metade dos átomos do sistema (meia-vida do nuclídeo), então é possível escrever:

$$\lambda = 0,693/T_{1/2} \quad (4)$$

Uma situação interessante ocorre quando se permite que um nuclídeo “filho” seja acumulado num recipiente juntamente com o seu “pai”. No início do processo de acumulação tem-se apenas o nuclídeo “pai” puro, sendo o “filho” gerado na mesma proporção em que o “pai” se desintegra. Entretanto, à medida que se tem o acúmulo do “filho”, sua taxa uniforme de criação entra em equilíbrio com a taxa crescente de decomposição do “pai”. Após um intervalo de tempo, as duas taxas tornam-se praticamente iguais e a atividade do “filho” entra em equilíbrio com a do “pai”. A atividade do nuclídeo “filho” fica condicionada à do nuclídeo “pai”, não ultrapassando-a.

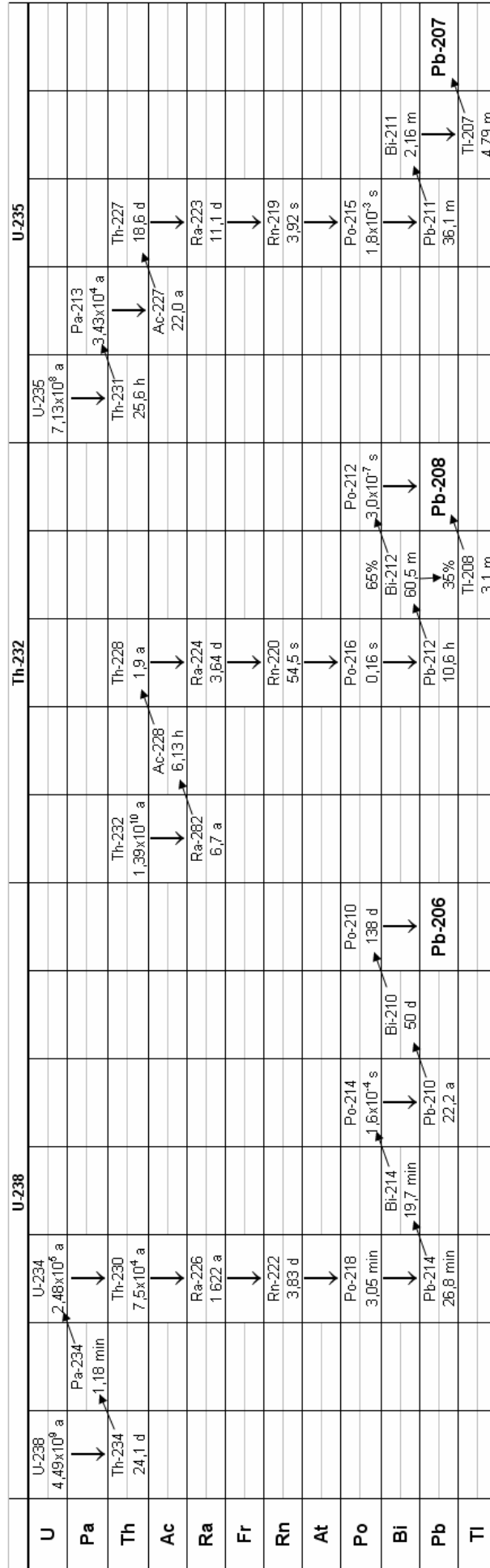


Figura 2: Séries de decaimento do urânio, tório e actínio.
Fonte: Ku, 1976.

O acúmulo dos produtos de decaimento em uma série radioativa, para um número muito grande de átomos, é descrito pelo sistema de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= \lambda_1 N_1 \\ dN_2/dt &= (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \\ dN_3/dt &= (\lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3) \\ &\dots \dots \dots \\ dN_i/dt &= (\lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i) \end{aligned} \quad (5)$$

Cada N_i é o número de átomos do i -ésimo elemento da série radioativa presente no instante t e λ_i é a sua respectiva constante de decaimento.

Se o índice “o” corresponder ao estado inicial no instante $t = 0$, então, assumindo $N_2 = 0$, a integração da segunda equação fornece o número de núclídeos produzidos a partir do decaimento radioativo de um determinado “pai”:

$$N_2 = [\lambda_1 N_1^0 / (\lambda_2 - \lambda_1)] [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (6)$$

No caso em que $\lambda_2 \gg \lambda_1$, é possível simplificar a expressão para:

$$N_2 = (\lambda_1 N_1^0 / \lambda_2) (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (7)$$

Se o sistema existe há muito tempo ($t \rightarrow \infty$), pode-se escrever:

$$N_2 = (\lambda_1 N_1^0 / \lambda_2) \quad (8)$$

Nessas condições $dN_2/dt = 0$ e o número de átomos do produto permanece inalterado. O conjunto de equações diferenciais (5) indica um estado estacionário, valendo as relações:

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= \lambda_1 N_1 \\ dN_2/dt &= 0 \\ dN_3/dt &= 0 \\ &\dots \dots \dots \\ dN_i/dt &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Tal situação, como referida por Bonotto (1982) e Torquato e Kawashita (1990), define a condição de “equilíbrio radioativo” ou “equilíbrio secular”. Assim, nota-se que o número de átomos que decai por unidade de tempo é igual ao número de átomos formados no mesmo intervalo de tempo, situação que ocorre em sistema fechado para os membros de uma série radioativa natural. A condição de equilíbrio radioativo secular pode, então, ser expressa por:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \dots \lambda_{i-1} N_{i-1} \quad (10)$$

Assim, as atividades de todos os núclídeos em filiação são iguais, isto é, o número de núclídeos que se desintegram por unidade de tempo é o mesmo qualquer que seja o radionuclídeo.

Portanto, se um sistema é constituído por uma série de decaimento em equilíbrio radioativo secular, as atividades dos produtos de decaimento são iguais entre si. Como as λ 's

dos “pais” das séries radioativas naturais são extremamente menores que as de seus “filhos”, a equação (7) é uma boa aproximação que possibilita determinar o tempo para os núclídeos de cada série atingir o equilíbrio radioativo com seus “pais”.

1.3. Importância das águas subterrâneas para o abastecimento humano

Nunca foi tão discutido quanto nos dias de hoje a questão da disponibilidade de água potável. Constituinte essencial à vida, a água se torna, atualmente, motivo de grandes preocupações e conflitos, na medida em que sua demanda aumenta cada vez mais em decorrência do aumento da população mundial, e que os estilos de vida utilizam cada vez mais o recurso.

O abastecimento de água ocorre utilizando-se as águas superficiais (rios) e subterrâneas (aquíferos). A pressão observada sobre os recursos hídricos superficiais é enorme e a sua poluição, cada vez maior, é resultante, principalmente, da descarga de esgotos e de resíduos industriais sem prévio tratamento. Mais uma vez, seguindo o que se parece transformar em regra no âmbito das questões ambientais no Brasil, felizmente há legislações que regulamentam os recursos hídricos, protegendo-os de degradação. Porém, a fiscalização, que tornaria prática e real a teoria prevista na lei, ainda é extremamente incipiente.

Tais águas poluídas, para se adequarem aos padrões de consumo humano, devem passar por tratamentos específicos e complexos, que podem tornar o tratamento inviável economicamente.

Analisando esse cenário, os aquíferos (formações geológicas portadoras e condutoras de água subterrânea) tornam-se elementos de extrema importância para o abastecimento humano. Estes representam reservas valiosíssimas de água com potencial de utilização para abastecimento humano, uma vez que 98% da água doce disponível para consumo humano na Terra estão presentes nos aquíferos (CETESB, 2007).

O Brasil é um país privilegiado porque possui 12% das reservas mundiais de água doce apresentando disponibilidade hídrica de 40.732 m³/hab/ano. Aproximadamente 80% das águas brasileiras estão na Bacia Amazônica, e 1,6% no Estado de São Paulo (BRASIL, 2005). Entretanto, como no resto do mundo, as interferências no ciclo de renovação, principalmente das águas superficiais, vem diminuindo a quantidade e a qualidade de água disponível para consumo. Tais interferências são: extração excessiva, uso inadequado, lançamento de efluentes domésticos e industriais nos corpos de água, ausência de controle de erosão, ausência de matas ciliares, crescente aumento de custo no seu tratamento.

Apesar da disponibilidade hídrica do Brasil, a sua distribuição não coincide com as áreas onde existe maior demanda pelo recurso hídrico. Além disso, segundo Rebouças (2003), mesmo as cidades localizadas na Região Norte do País enfrentam crises de abastecimento.

Nesse cenário, a água subterrânea vem assumindo importância relevante como fonte de abastecimento doméstico, industrial e agrícola. Segundo a Agência Nacional das Águas (BRASIL, 2005), mais da metade da água de abastecimento público no Brasil provém das reservas subterrâneas. De acordo com levantamento realizado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (CETESB), atualmente, aproximadamente 72% dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por águas subterrâneas, atendendo uma população de mais de 5,5 milhões habitantes. (CETESB, 2007).

1.4. Alguns valores de referência para a radioatividade nas águas

O aumento de radionuclídeos nos recursos hídricos em decorrência de processos tecnológicos (por exemplo, mineração/processamento de minerais portadores de radioelementos/fertilizantes fosfatados), testes nucleares, descarga de efluentes em instalações nucleares, conflitos armados utilizando artefatos nucleares ou manuseio de fontes radioativas manufaturadas tem exigido a determinação e revisão dos limites para a exposição a fontes de radiação.

Em 1928 foi formado o *International Committee on X Ray and Radium Protection*, hoje conhecido como *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), o qual, desde então, tem estabelecido os limites para a exposição (utilização e ingestão) a fontes de radiação (ICRP, 1980). Desde a primeira edição das diretrizes para a qualidade radiológica das águas visando o consumo, várias revisões ocorreram (ICRP, 1991), as quais têm sido levadas em conta pela Organização Mundial de Saúde em sua legislação (WHO, 1993, 1996).

A legislação atual da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2004) estabelece um nível de dose efetiva de referência expressa em sieverts (Sv) e correspondente a 0,1 mSv para o consumo humano anual de água baseado na ingestão de 2 litros por dia. Esse valor corresponde ao recomendado pela ICRP (1991) e pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1996), tendo sido aceito pela Organização Mundial da Saúde e seus Estados membros, FAO e Comunidade Européia.

Diferentemente das legislações anteriores, a atual da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2004) faz referência explícita a valor limite para a presença do gás ^{222}Rn em águas para consumo humano, o qual é um membro intermediário da série de decaimento do ^{238}U . Do ponto de vista dos valores de referência sugeridos para a caracterização dos radionuclídeos

presentes e estabelecimento de medidas para a sua redução, na legislação atual permaneceu recomendado o valor de 1 Bq ¹/L para a atividade beta total, enquanto que para a atividade alfa total o valor foi alterado, passando de 0,1 Bq/L para 0,5 Bq/L.

2. JUSTIFICATIVA

Uma questão importante do ponto de vista da avaliação radiológica da qualidade das águas refere-se às medidas da atividade alfa e beta total efetuadas nos resíduos evaporados/secos das amostras (WANTY; NORDSTROM, 1993; JANZER, 1980).

O procedimento de calibração é crítico (IOS, 1990a, 1990b), pois, erros analíticos de até 100% têm sido identificados na determinação da atividade alfa total, dependendo do tipo de padrão utilizado, por exemplo, ²⁴¹Am ou urânio natural. Além disso, uma vez que as medidas são feitas no resíduo evaporado/seco, um problema potencial surge relacionado com o processo de absorção: amostras que possuem maior resíduo evaporado/seco tendem a absorver a radiação emitida antes que ela seja dirigida ao contador, o que ocasiona um decréscimo na eficiência da contagem da amostra, propiciando, assim, a geração de resultados “artificialmente” baixos (WANTY; NORDSTROM, 1993).

Os resultados dos estudos prévios conduzidos por Bonotto (2003, 2004, 2006), Bonotto e Caprioglio (2002) e Bonotto e Mello (2005) permitiram enfocar a presença de ²³⁸U, ²³⁴U, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²²Rn, ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi nas águas subterrâneas do aquífero Guarani, sob diferentes aspectos. Por exemplo, variações na razão de atividade ²³⁴U/²³⁸U para o urânio dissolvido nas águas permitiram estimar um tempo de residência tão longo quanto 600.000 anos (BONOTTO, 2006). Porém, a despeito dos avanços obtidos, verifica-se que as abordagens realizadas contemplando a qualidade radiológica das águas não foram efetuadas de maneira a integrar todos os radionuclídeos analisados até o momento, ou seja, elas não foram realizadas visando-se obter medidas de atividade alfa e beta total. Adicionalmente, outras questões surgiram em decorrência das investigações realizadas, por exemplo, a influência de fatores afetando a exalação do ²²²Rn dissolvido nas águas, como a temperatura e pressão.

Um outro aspecto igualmente não considerado nas investigações anteriormente realizadas no aquífero Guarani foi o de que o ²²²Rn dissolvido nas águas além de ingerido pode também ser inalado, sobretudo nos locais de pouca ventilação como as saunas/piscinas em balneários utilizando as águas do aquífero.

¹ 1 Bq (Becquerel) = 1dps (desintegração nuclear por segundo).

Embora do ponto de vista geoquímico os resultados de atividade alfa e beta total não forneçam muitas informações, pois não possibilitam a caracterização individual dos radionuclídeos presentes na amostra, verifica-se que tem ocorrido no Brasil uma demanda crescente visando a sua obtenção, de maneira que uma avaliação comparativa integrada é importante. Tendo em vista os dados disponíveis oriundos das pesquisas já efetuadas, o aquífero Guarani é ideal para esta análise integrada.

3. OBJETIVO

Avaliar a qualidade das águas do aquífero Guarani no contexto da legislação brasileira vigente quanto aos aspectos radiológicos.

3.1. Objetivos Específicos

- Coletar amostras de água do aquífero Guarani;
- Determinar as radioatividades beta e alfa total em amostras de águas subterrâneas do aquífero Guarani;
- Correlacionar os valores obtidos com parâmetros físicos e físico-químicos já disponíveis, visando efetuar uma análise integrada dos dados e estabelecer possíveis tendências com as direções de fluxo subterrâneo;
- Empregar os dados obtidos na avaliação da qualidade das águas, relacionando os resultados obtidos no contexto da legislação brasileira vigente quanto aos aspectos radiológicos das águas.

4. ÁREA DE ESTUDO

O aquífero Guarani é talvez o maior manancial transfronteiriço de água doce subterrânea do planeta, estendendo-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná até a Bacia do Chaco-Paraná. Está localizado no centro-leste da América do Sul, entre 12° e 35° de latitude Sul e 47° e 65° de longitude Oeste, subjacente a quatro países: Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. Tem extensão total aproximada de 1,2 milhão de km², sendo 840 mil km² no Brasil, 225,500 mil km² na Argentina, 71,700 mil km² no Paraguai e 58.500 km² no Uruguai. A porção brasileira integra o território de oito Estados: MS (213.200 km²), RS (157.600 km²),

SP (155.800 km²), PR (131.300 km²), GO (55.000 km²), MG (51.300 km²), SC (49.200 km²) e MT (26.400 km²). A população atual do domínio de ocorrência do aquífero é estimada em 15 milhões de habitantes (BRASIL, 2007).

A Figura 3 destaca a localização do aquífero Guarani em azul.



Figura 3: Localização do aquífero Guarani.

Fonte: São Paulo, 2007.

O aquífero Guarani, denominação do geólogo uruguaio Danilo Anton em memória do povo indígena da região, tem uma área de recarga de 150.000 Km². Constitui-se em uma importante reserva estratégica para o abastecimento da população, para o desenvolvimento das atividades econômicas e de lazer. Sua recarga natural anual (principalmente pelas chuvas) é de 160 Km³/ano, sendo que desta, 40 Km³/ano constitui o potencial explotável sem riscos para o sistema aquífero (SÃO PAULO, 2007).

A proteção contra os agentes de poluição que comumente afetam os mananciais de água na superfície, que decorre de mecanismos naturais de filtração e autodepuração bio-geoquímica que ocorrem no subsolo, resulta numa água de excelente qualidade. A qualidade da água e a possibilidade de captação nos próprios locais onde ocorrem as demandas fazem com que o aproveitamento das águas do aquífero Guarani assumam características econômicas, sociais e políticas destacadas para abastecimento da população (BRASIL, 2007).

4.1. Geologia do Aquífero

A denominação de aquífero Guarani, ou aquífero Gigante do Mercosul, foi introduzida para representar o Sistema Hidroestratigráfico Mesozóico constituído por estratos do Triássico (formações Pirambóia e Rosário do Sul no Brasil, Buena Vista no Uruguai) e do Jurássico (formações Botucatu no Brasil, Misiones no Paraguai e Tacuarembó no Uruguai e Argentina) (ARAÚJO; FRANÇA; POTTER, 1995).

A Formação Pirambóia tem espessura máxima em torno de 300 m na bacia do Tietê, reduzindo-se para sul e nordeste do Estado de São Paulo, onde atinge 150 m em Analândia e 60 m em Franca (SOARES, 1975). A Formação Botucatu constitui-se quase inteiramente de arenitos de granulação fina a média, uniforme, com boa seleção de grãos foscos com alta esfericidade; são avermelhados, apresentam estratificação cruzada de grande a médio porte, são muito friáveis ou silicificados e exibem na parte basal corpos de arenitos conglomeráticos e conglomerado. O pacote sedimentar desta formação constitui uma unidade genética depositada em ambiente desértico; sua espessura é bastante variável (média em torno de 50-70 m), porém, não ultrapassa 150 m em sua faixa de afloramentos no Estado de São Paulo. Seu conteúdo de fósseis no Estado de São Paulo restringe-se geralmente a alguns crustáceos, pistas de vermes e pegadas de vertebrados (ALMEIDA; MELO, 1981).

O aquífero Guarani está confinado na maior parte da sua extensão pelos basaltos da Formação Serra Geral e por rochas permo-triássicas de baixa permeabilidade. A espessura do aquífero aumenta no sentido do centro da Bacia do Paraná, onde a superfície potenciométrica da água chega a apresentar características de artesianismo (REBOUÇAS, 1988).

4.2. Pontos de amostragem

Para se avaliar de maneira integrada a radioatividade nas águas subterrâneas do aquífero Guarani, coletaram-se 29 amostras de água deste aquífero, oriundas de 23 municípios do Estado de São Paulo, visando complementar dados ainda não levantados durante as investigações previamente conduzidas.

Embora esse número de amostras não contemple todos os poços perfurados no aquífero, devido a sua extensão e às limitações analíticas, ele permite a integração dos dados obtidos aos já disponíveis, e permite relacionar a distribuição espacial dos pontos de amostragem com as direções gerais de fluxo das águas subterrâneas da Bacia do Paraná distribuídas no Estado de São Paulo.

As amostras foram coletadas em poços tubulares profundos já perfurados. A maioria desses poços destina-se ao abastecimento das populações urbanas dos municípios onde se localizam, sendo a água utilizada principalmente para consumo doméstico e industrial.

Os municípios do Estado de São Paulo onde se coletaram amostras de água do aquífero Guarani foram: Fernandópolis, Jales, Olímpia, São José do Rio Preto, Catanduva, Novo Horizonte, São Simão, Serra Azul, Serrana, Guatapar, Ibaté, Itirapina, São Pedro, Américo Brasiliense, Barra Bonita, Batatais, Bocaina, Descalvado, Jaú, Pederneiras, Ribeirão Preto, Sertãozinho e Agudos, como mostra a Figura 4.

Nos municípios de Itirapina, Fernandópolis, São José do Rio Preto e Pederneiras foram coletadas duas amostras de diferentes poços, sendo que, em Pederneiras, um dos poços utilizados na amostragem localiza-se em Vanglória, distrito desse município.

Por fim, no município de Ribeirão Preto foram coletadas 3 amostras de diferentes poços, totalizando as 29 amostras.

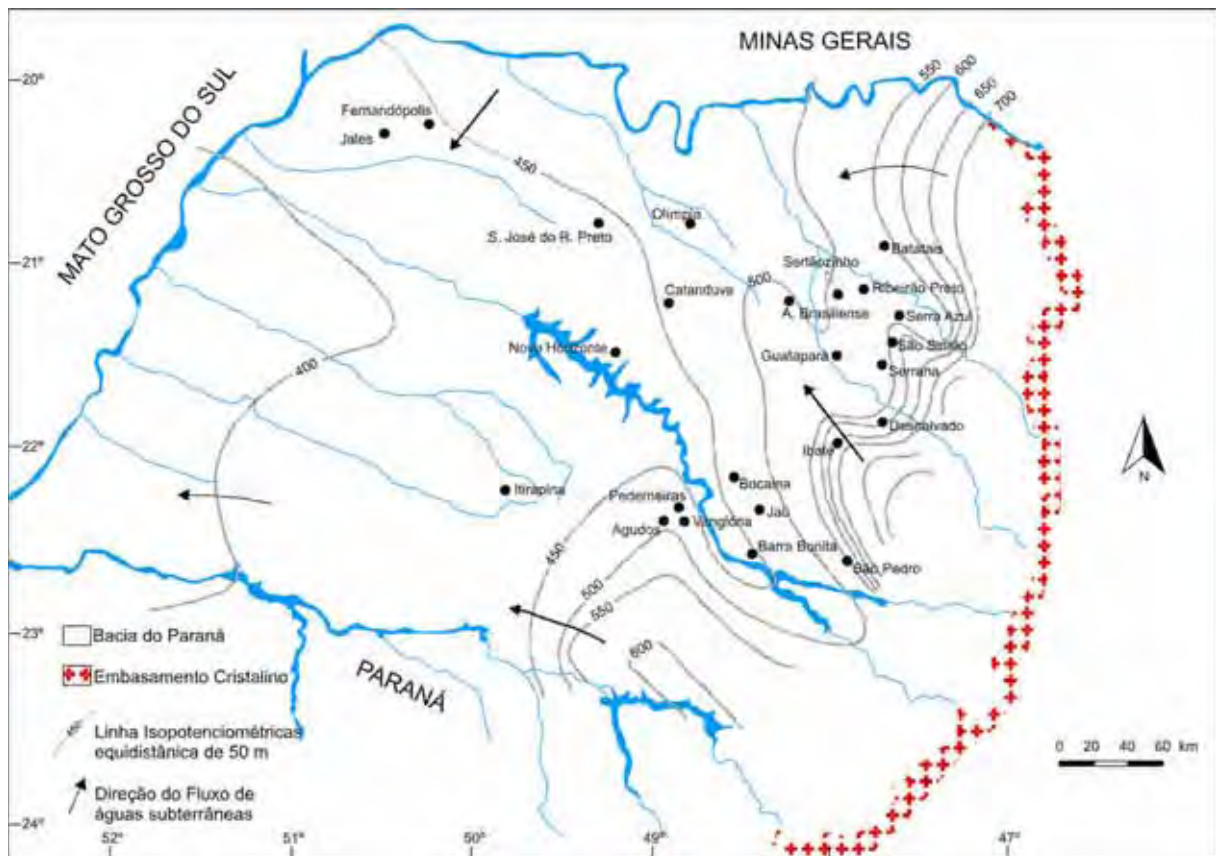


Figura 4: Pontos de Amostragem.

Modificado de Bonotto (1996).

5. MÉTODO E ETAPAS DE TRABALHO

As determinaes das radioatividades beta e alfa total foram realizadas utilizando-se a infra-estrutura disponível no LABIDRO-Laboratório de Isótopos e Hidroquímica do

Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, a qual foi grandemente implantada a partir de recursos fornecidos pela FAPESP e CNPq.

Essas determinações foram realizadas usando-se a técnica da espectrometria. Em termos gerais, o propósito da espectrometria é de identificação e quantificação de elementos, e, em se tratando de elementos radioativos, a medida espectrométrica é feita com base na propriedade da radioatividade. Este método tem provado ser de fácil uso, altamente sensível e rápido, sendo aplicado rotineiramente com sucesso na solução de problemas analíticos em radioquímica. (DUARTE, 1997).

Tanto a espectrometria gama quanto a alfa foram empregadas na análise de amostras correspondentes a um volume de 1 litro. Os sistemas foram calibrados para as determinações de interesse com traçador de atividade conhecida. Testes preliminares foram realizados em amostras de água de elevada radioatividade para se assegurar a aplicabilidade dos métodos.

As etapas de trabalho foram:

- Calibração do sistema de espectrometria gama, tanto em atividade quanto em energia;
- Coleta de amostras de água de estâncias hidrominerais para testar a eficácia da calibração do sistema de espectrometria gama;
- Teste da eficácia da calibração do sistema de espectrometria gama;
- Calibração do sistema de espectrometria alfa, tanto em atividade quanto em energia;
- Teste da eficácia da calibração do sistema de espectrometria alfa;
- Coleta de 29 amostras de água do aquífero Guarani;
- Determinação da atividade beta total das amostras de água coletadas;
- Determinação da atividade alfa total das amostras de água coletadas;
- Correlação dos dados obtidos com dados físicos e físico-químicos previamente obtidos através de estudos já realizados;
- Correlação dos dados obtidos com o fluxo subterrâneo;
- Avaliação da qualidade das águas do aquífero Guarani no contexto da legislação brasileira vigente quanto aos aspectos radiológicos.

5.1. Espectrometria Gama

A técnica empregada para a medida da atividade beta total é indireta, baseando-se em emissões gama associadas com os nuclídeos que sofrem decaimento beta. Por exemplo, o ^{40}K produz ^{40}Ca por intermédio de decaimento beta, mas também ^{40}Ar por intermédio de captura

eletrônica. Uma emissão gama de $1,46 \text{ MeV}^2$ aparece durante a produção de ^{40}Ar , a qual pode fornecer informações sobre a presença de ^{40}K na amostra. Assim, a espectrometria gama pode ser utilizada para realizar medidas de atividade relacionada com núclídeos emissores de partículas beta.

A espectrometria gama, utilizando a análise da altura de picos, possibilita a determinação direta dos radionuclídeos em amostras que emitem radiação gama. Tais determinações, assim como a espectrometria alfa ou beta, são possíveis porque as transições nucleares relacionadas com a emissão gama são específicas para cada radionuclídeo. Entretanto, a espectrometria gama tem algumas vantagens sobre os outros métodos, principalmente por causa da grande penetração dos raios gama se comparada com a das partículas alfa e beta (IVANOVICH; HARMON, 1992).

A preparação das amostras para posterior inserção no sistema de espectrometria gama consistiu em evaporar 1 litro de amostra, utilizando-se uma chapa aquecedora mantida a uma temperatura em torno de 50°C , até um volume de aproximadamente 12 mL (resíduo evaporado). Este volume de 12 mL foi, então, transferido para um recipiente de vidro próprio para inserção no sistema gamaespectrométrico.

Os espectros gama possuem um intervalo de canal de 0 a 1600.

5.1.1. Sistema Espectrométrico Utilizado

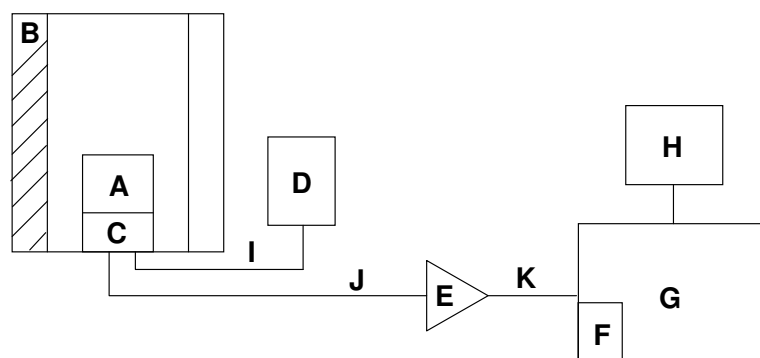
O sistema de espectrometria gama utilizado é formado por um sensor gama e circuitos eletrônicos que separam a radiação incidente em um cristal em dois ou mais componentes de energia.

Em decorrência da interação entre a radiação gama emitida por uma fonte radioativa e um cristal cintilador de NaI(Tl) são produzidos pulsos de pequena amplitude no ânodo de uma fotomultiplicadora. Para que não ocorram perdas significativas, cada pulso é pré-amplificado e dirigido a um amplificador, onde tem sua forma adequada para ser analisado no próximo estágio. Os pulsos produzidos apresentam alturas variáveis que dependem diretamente da energia das radiações; portanto, depois que são separados de acordo com suas alturas, fornecem espectros relacionados com a energia de radiação gama emitida nas transições nucleares. O dispositivo que realiza esta separação é o analisador de altura de pulsos. (BONOTTO, 1990).

A Figura 5 ilustra o sistema de espectrometria gama utilizado. Este sistema é formado por uma blindagem de chumbo onde estão colocados o pré-amplificador e um cristal tipo poço de NaI(Tl), sendo que estes estão conectados a uma fonte de alta tensão. É no cristal que

² Milhões de elétrons Volt.

se insere a amostra acondicionada em recipiente de vidro que comporta um volume aproximado de 12 mL. Do pré-amplificador parte um cabo que conduz o sinal ao amplificador, e deste para a placa ligada ao microcomputador que processa o sinal transformando-o em contagem. O processamento dos dados obtidos é efetuado através do software Maestro II, da EG & G – ORTEC, acoplado ao sistema instalado no LABIDRO.



LEGENDA

- A: Cristal de NaI(Tl) 2" x 2"
- B: Blindagem de chumbo
- C: Pré-amplificador
- D: Fonte de alta tensão (1000 V)
- E: Amplificador ORTEC
- F: Placa ACE 2 k ORTEC
- G: Microcomputador
- H: Impressora
- I, J, K: Cabos

Figura 5: Sistema de espectrometria gama utilizado.

5.1.2. Calibração em Energia do Sistema Gama

A fim de tornar a leitura gamaespectrométrica exeqüível, procedeu-se uma calibração em energia do sistema de espectrometria gama. A calibração foi feita utilizando-se fontes unielementares de energia gama conhecida, consistindo de ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{40}K e ^{133}Ba .

As Figuras 6 a 9 ilustram, respectivamente, os espectros gama obtidos para as fontes de ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{40}K e ^{133}Ba .

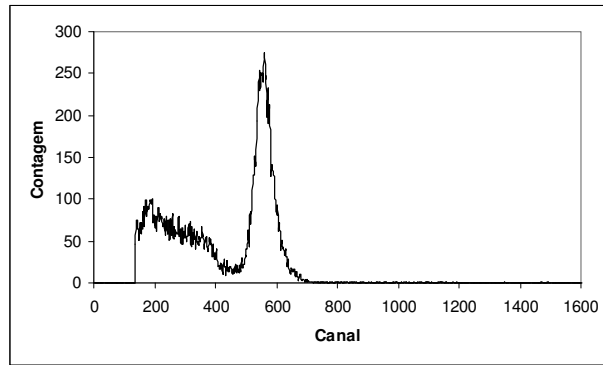


Figura 6: Espectro gama obtido para a fonte de ^{137}Cs .

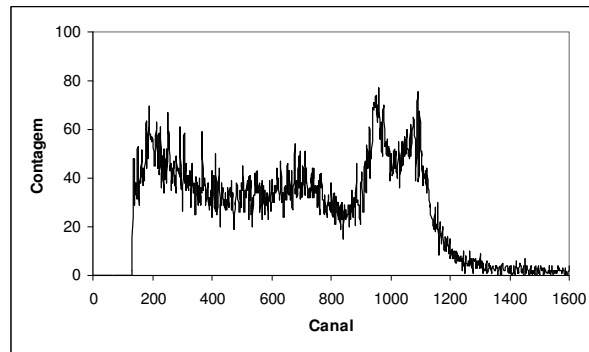


Figura 7: Espectro gama obtido para a fonte de ^{60}Co .

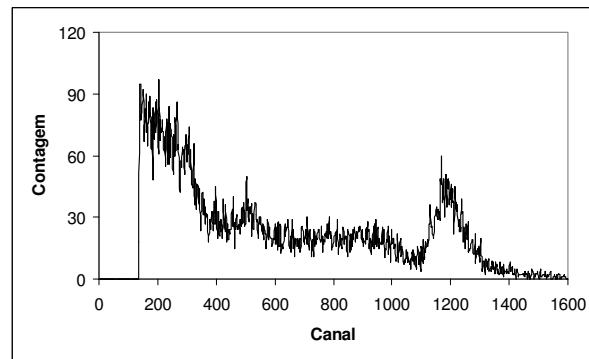


Figura 8: Espectro gama obtido para a fonte de ^{40}K .

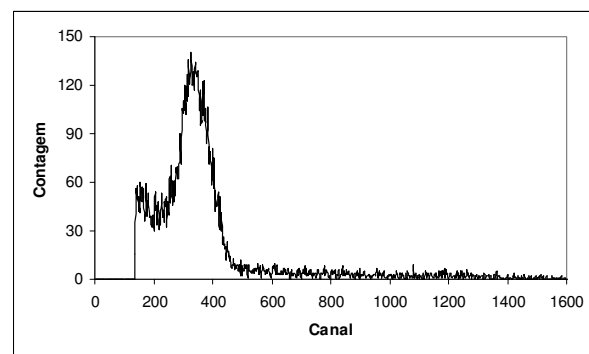


Figura 9: Espectro gama obtido para fonte de ^{133}Ba .

A Tabela 1 apresenta os dados utilizados para a confecção da curva de calibração do sistema de espectrometria gama. Nela, a energia refere-se à energia com que raios gama são emitidos em função da desintegração nuclear dos núclídeos listados na primeira coluna, e o respectivo canal do espectro onde ocorre este pico de energia.

Tabela 1: Dados utilizados para a calibração em energia do sistema de espectrometria gama.

Núclídeo	Canal	Energia (MeV)
^{60}Co	955	1,173
^{60}Co	1073	1,332
^{137}Cs	559	0,661
^{40}K	1170	1,46
^{133}Ba	326	0,372

Fonte: Michel; King e Moore (1982).

A Figura 10 representa a curva de calibração em energia elaborada a partir desses dados, através do software Grace (Plataforma Linux). Esta curva foi feita cruzando-se os valores de energia de emissão gama de Michel; King e Moore (1982), com os canais dos espectros obtidos através da leitura das fontes unielementares onde ocorreram os respectivos picos de energia. Ao cruzamento destes dados ajustou-se uma linha de tendência, através de regressão linear simples, o que gerou a equação apresentada abaixo e que, por sua vez, permitiu calibrar o sistema de espectrometria gama em energia.

$$\text{Energia (MeV)} = (-0,02 \pm 0,01) + (0,00126 \pm 0,00002) \cdot \text{Canal}$$

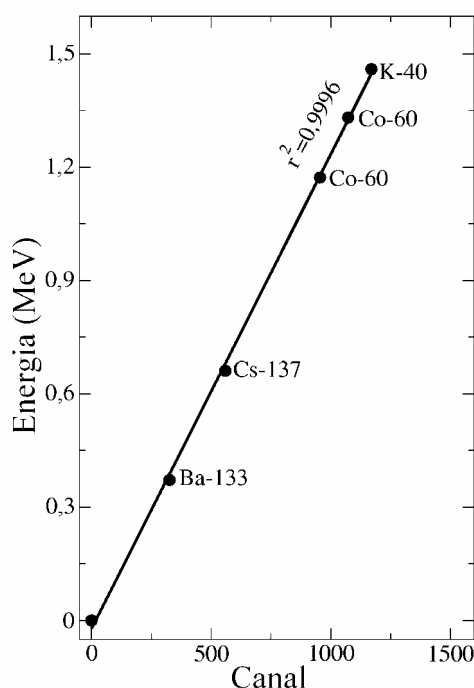


Figura 10: Curva de calibração em energia para o sistema de espectrometria gama.

5.1.3. Calibração em Atividade do Sistema Gama

A etapa seguinte para a realização de medidas relacionadas com a atividade beta total nas amostras de água consistiu na calibração em atividade do sistema de espectrometria gama. Para tanto, foi utilizada uma solução 1mg/L em KCl (volume de 1 L) à qual se adicionou o traçador artificial $^{232}\text{U} + ^{228}\text{Th}$ de atividade beta correspondente a 16,95 dpm³. Esta concentração de sal foi utilizada objetivando-se simular a salinidade natural das águas subterrâneas.

A solução foi, então, evaporada em chapa aquecedora a uma temperatura de 50°C, até a obtenção de volume aproximado de 12 mL. Em seguida, este volume foi transferido para um recipiente de vidro de dimensões adequadas à sua inserção no cristal cintilador, sendo, finalmente, inserido no sistema espectrométrico ilustrado na Figura 5.

A Figura 11 ilustra o espectro gama obtido, o qual permite relacionar a contagem líquida obtida na leitura desta solução preparada com a atividade do traçador. Esta relação se dá através da regra de três simples apresentada a seguir, que permitiu calibrar o sistema de espectrometria gama em atividade.

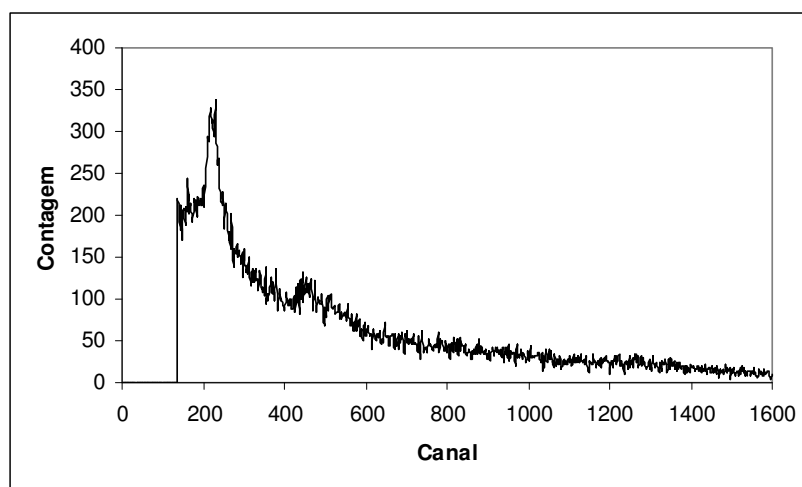


Figura 11: Espectro Gama KCl 1mg/L + traçador.

Taxa de contagem líquida obtida no espectro gama KCl 1mg/L + traçador - 16,95 dpm
Taxa de contagem líquida obtida no espectro gama de uma amostra de água qualquer - X dpm

O termo “contagem líquida” refere-se à contagem obtida no espectro gerado através da leitura de uma amostra subtraída do ruído eletrônico associado ao detector utilizado na leitura. Este ruído eletrônico, também chamado de ruído de fundo ou background (BG), é a contagem que se obtém quando o sistema opera sem nenhuma amostra inserida.

³ Desintegração nuclear por minuto.

5.1.4. Teste da metodologia

Para averiguar a aplicabilidade da metodologia utilizada para medir atividade beta total em águas subterrâneas, realizou-se teste utilizando amostras de água de estâncias hidrominerais situadas nos municípios de Águas da Prata, Águas de Lindóia, Águas de São Pedro e Poços de Caldas.

Esses locais foram selecionados porque neles a hidroquímica tem sido já bastante investigada, em função dos estudos prévios anteriormente conduzidos por inúmeros pesquisadores.

Foram coletadas 19 amostras de água dessas estâncias hidrominerais. As amostras foram evaporadas até a obtenção de um volume aproximadamente igual a 12 mL, e em seguida foram inseridas no sistema de espectrometria gama. Após obtidos os espectrogramas, estes foram analisados visando-se obter a atividade beta total de cada amostra, através da regra de três simples supracitada. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 2: Atividade beta total das amostras de água de estâncias hidrominerais.

Município	Amostra	Atividade beta total (dpm)	Atividade beta total (Bq)
Águas de São Pedro	Gioconda	15,526	0,258767
Águas de São Pedro	Juventude	15,697	0,261617
Águas de São Pedro	Almeida Salles	15,549	0,25915
Águas da Prata	Boi	15,592	0,259867
Águas da Prata	Paiol	15,245	0,254083
Águas da Prata	Platina	15,258	0,2543
Águas da Prata	Prata Antiga	15,215	0,253583
Águas da Prata	Villela	18,484	0,308067
Águas da Prata	Vitória	15,950	0,265833
Águas de Lindóia	Beleza	15,530	0,258833
Águas de Lindóia	Filomena	15,411	0,25685
Águas de Lindóia	Levíssima	15,750	0,2625
Águas de Lindóia	Lindália	15,496	0,258267
Águas de Lindóia	Santa Isabel	15,151	0,252517
Águas de Lindóia	São Roque	15,097	0,251617
Poços de Caldas	Sinhazinha	15,378	0,2563
Poços de Caldas	Macacos	15,856	0,264267
Poços de Caldas	Quisisana Ferruginosa	15,290	0,254833
Poços de Caldas	Quisisana Sulfurosa	15,492	0,2582

Segundo se verifica, a maior atividade foi encontrada para a amostra de água subterrânea da Fonte Villela, no município de Águas da Prata (SP), o que é compatível com o conhecimento que se dispõe acerca da radioatividade das águas das amostras selecionadas para análise. Dessa forma, a técnica utilizada é apropriada para emprego nas amostras de águas subterrâneas do aquífero Guarani.

5.2. Espectrometria alfa

A espectrometria alfa, assim como a espectrometria gama, utiliza-se da análise da altura de picos para determinar os radionuclídeos em amostras que emitem partículas alfa. Tais determinações são possíveis porque as transições nucleares relacionadas com a emissão de partículas alfa são específicas a cada radionuclídeo (IVANOVICH; HARMON, 1992).

A preparação das amostras para posterior inserção no sistema de espectrometria alfa consistiu em continuar o processo de evaporação dos 12 mL previamente evaporados (espectrometria gama). Este volume foi sendo gradativamente depositado num disco de alumínio, mantido sob uma chapa aquecedora à 50°C, até a completa produção de resíduo seco relacionado com a solução original.

O disco contendo o resíduo seco foi, então, inserido numa câmara de vácuo portadora de detector semicondutor, sendo posicionado a uma distância de alguns milímetros em direção frontal do detector, previamente calibrado em energia.

Os espectros alfa possuem um intervalo de canal de 0 a 1000.

5.2.1. Sistema Espectrométrico Utilizado

O sistema de espectrometria alfa utilizado consiste de quatro conjuntos para medidas de partículas alfa. Cada um deles é formado por um detector semicondutor que opera dentro de uma câmara de vácuo. Os detectores são constituídos por um cristal de Si(Au), criando-se nas vizinhanças da superfície do cristal uma junção abrupta, a barreira de superfície.

As emissões alfa são captadas por um pré-amplificador, ligado à fonte de polarização. Após o estágio de pré-amplificação, os pulsos são amplificados por um determinado fator de ganho, apresentando alturas variáveis que dependem da energia associada às partículas alfa e sendo analisadas por um multicanal que efetua a separação de acordo com suas alturas. O analisador multicanal possui um conversor analógico-digital que transforma a altura do pulso recebido num “trem” de pulsos, determinando o número de canal onde o sinal deve ser registrado. Esses sinais são contados e a informação é armazenada em uma unidade que passa a conter o número de contagens realizada por canal (BONOTTO, 1986).

Depois de amplificado, o sinal é conduzido a um espectro “Master”, que o decodifica e possibilita sua leitura pelo *software* Maestro II da EG & G - ORTEC.

A Figura 12 ilustra o sistema de espectrometria alfa utilizado.

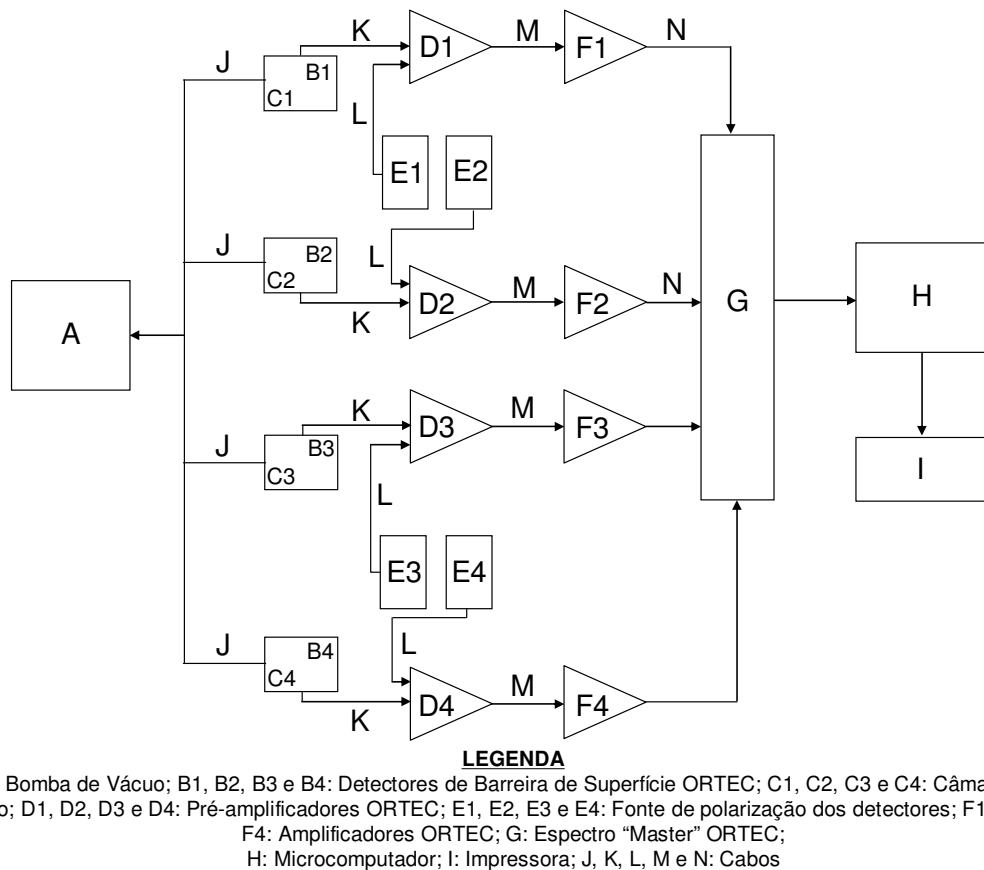


Figura 12: Sistema de espectrometria alfa utilizado.

5.2.2. Calibração em Energia do Sistema Alfa

A fim de tornar a leitura alfaespectrométrica exequível, realizou-se uma calibração em energia do sistema utilizado. A calibração foi feita utilizando-se um disco padrão preparado na França, chamado de "padrão francês", que contém os isótopos de urânio ^{238}U , ^{234}U e ^{232}U e os principais emissores alfa descendentes do ^{232}U . A Figura 13 ilustra o espectro alfa típico do urânio natural e o radionuclídeo artificial ^{232}U (e seus descendentes), obtido através da leitura do "padrão francês".

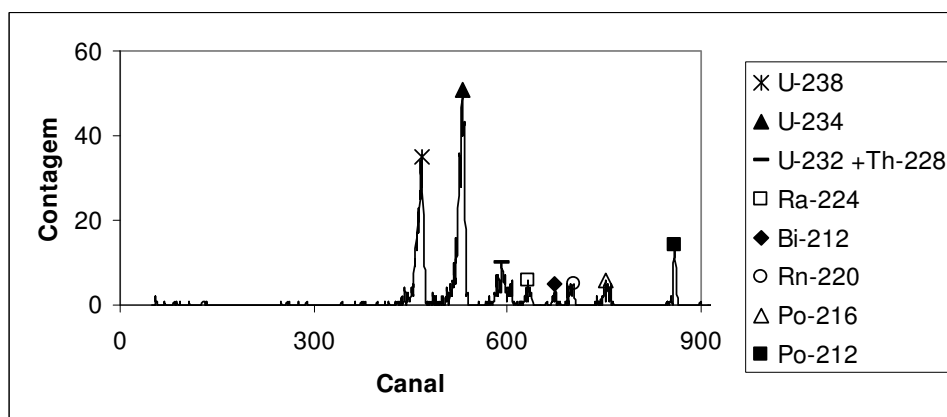


Figura 13: Espectro alfa típico obtido através da leitura do "padrão francês".

A Tabela 3 apresenta os dados utilizados para a confecção da curva de calibração em energia do sistema de espectrometria alfa. Nela, a energia, em milhões de elétrons volt (MeV), refere-se à energia com que partículas alfa são emitidas em função da desintegração nuclear dos núclídeos listados na primeira coluna, e o respectivo canal do espectro onde ocorre este pico de energia. Nesta tabela, o ^{228}Th está sem canal porque seu pico de energia se sobrepõe ao pico de energia do ^{232}U .

Tabela 3: Dados utilizados para a calibração em energia do sistema de espectrometria alfa.

Nuclídeo	Energia (MeV)	Canal
^{238}U	4,19	398
^{234}U	4,77	453
^{232}U	5,32	503
^{228}Th	5,42	-
^{224}Ra	5,58	536
^{212}Bi	6,05	574
^{220}Rn	6,29	595
^{216}Po	6,78	643
^{212}Po	8,79	804

Fonte: Adams e Gasparini (1970).

A Figura 14 representa a curva de calibração em energia elaborada a partir desses dados, através do software Grace (Plataforma Linux). Esta curva foi feita cruzando-se os valores de energia de emissão de partículas alfa, de Adams e Gasparini (1970), com os canais do espectro obtido através da leitura do “padrão Francês” onde ocorreram os respectivos picos de energia. Ao cruzamento destes dados ajustou-se uma linha de tendência, através de regressão linear simples, o que gerou a equação apresentada abaixo e que, por sua vez, permitiu calibrar o sistema de espectrometria alfa em energia.

$$\text{Energia (MeV)} = (-0,10 \pm 0,09) + (0,0110 \pm 0,0001) \cdot \text{Canal}$$

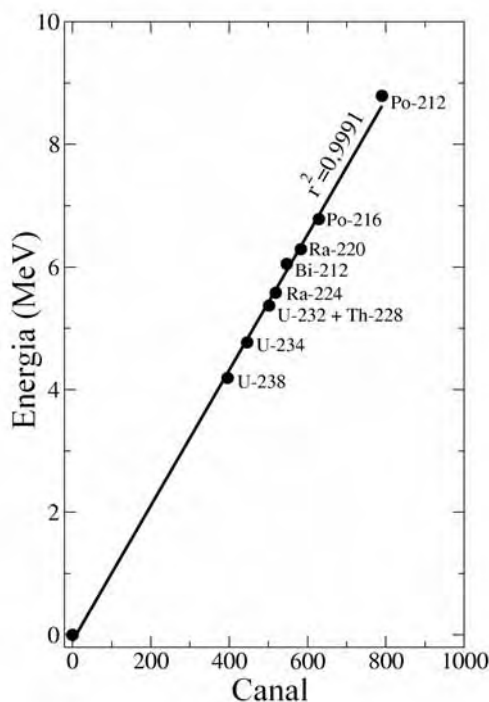


Figura 14: Curva de calibração em energia para o sistema de espectrometria alfa.

5.2.3. Calibração em Atividade do Sistema Alfa

A etapa seguinte para a realização de medidas relacionadas com a atividade alfa total nas amostras de água consistiu na calibração em atividade do sistema utilizado. Para tanto, foi preparada uma solução de 1 litro de KCl 1mg/L, à qual se adicionou o traçador artificial $^{232}\text{U} + ^{228}\text{Th}$ de atividade alfa correspondente a 16,95 dpm. Os valores de atividades beta e alfa total do traçador coincidem em função do equilíbrio secular radioativo entre o nuclide pai (^{232}U) e seus descendentes. Novamente, esta concentração do sal foi utilizada objetivando-se simular a salinidade natural das águas subterrâneas.

A seguir, esta solução foi evaporada em chapa aquecedora, mantida a uma temperatura constante de 50°C, até a obtenção de um volume aproximado de 12 mL. Em seguida, este volume foi gradativamente depositado num disco de alumínio para sofrer nova evaporação, até a completa produção de resíduo seco relacionado com a solução original.

O disco contendo o resíduo seco foi, então, inserido numa câmara de vácuo portadora de detector semicondutor, sendo posicionado a uma distância de alguns milímetros em direção frontal do detector, previamente calibrado em energia.

A Figura 15 ilustra o espectro alfa obtido através da leitura desta solução preparada, o qual permite relacionar a contagem líquida obtida no espectro com a atividade do traçador.

Esta relação se dá através da regra de três simples apresentada a seguir, que permitiu calibrar o sistema de espectrometria alfa em atividade.

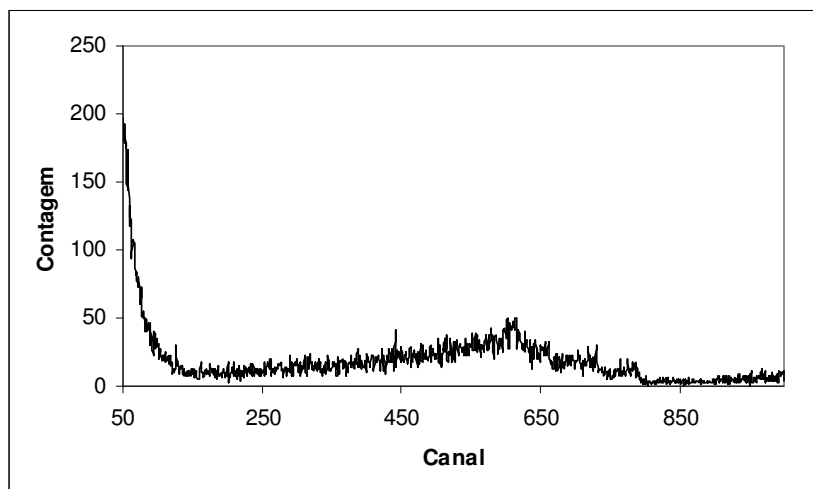


Figura 15: Espectro Alfa KCl 1mg/L + traçador.

Taxa de contagem líquida obtida no espectro alfa KCl 1mg/L + traçador - 16,95 dpm
Taxa de contagem líquida obtida no espectro alfa de uma amostra de água qualquer - X dpm

5.2.4. Teste da metodologia

O teste da aplicabilidade da metodologia utilizada para medir atividade alfa total em águas subterrâneas foi o mesmo utilizado para medir atividade beta total. Realizou-se teste com amostras de água de estâncias hidrominerais situadas nos municípios de Águas da Prata, Águas de Lindóia, Águas de São Pedro e Poços de Caldas, pelo mesmo motivo citado no tópico 5.1.4.

Foram coletadas 19 amostras de água dessas estâncias hidrominerais. As amostras foram evaporadas até a total produção de resíduo seco, e em seguida foram inseridas no sistema de espectrometria alfa. Após obtidos os espectrogramas, estes foram analisados visando-se obter a atividade alfa total de cada amostra, através da regra de três simples apresentada na Figura 19. Na Tabela 4 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4: Atividade alfa total das amostras de água de estâncias hidrominerais.

Município	Amostra	Atividade alfa total (dpm)	Atividade alfa total (Bq)
Águas de São Pedro	Gioconda	0,297	0,00495
Águas de São Pedro	Juventude	3,746	0,062433
Águas de São Pedro	Almeida Salles	0,035	0,000583
Águas da Prata	Boi	0,263	0,004383
Águas da Prata	Paiol	0,050	0,000833

Águas da Prata	Platina	0,058	0,000967
Águas da Prata	Prata Antiga	0,452	0,007533
Águas da Prata	Villela	12,37	0,206167
Águas da Prata	Vitória	0,778	0,012967
Águas de Lindóia	Beleza	0,058	0,000967
Águas de Lindóia	Filomena	0,072	0,0012
Águas de Lindóia	Levíssima	1,319	0,021983
Águas de Lindóia	Lindália	0,243	0,00405
Águas de Lindóia	Santa Isabel	0,089	0,001483
Águas de Lindóia	São Roque	0,133	0,002217
Poços de Caldas	Sinhazinha	0,036	0,0006
Poços de Caldas	Macacos	0,466	0,007767
Poços de Caldas	Quisisana Ferruginosa	0,377	0,006283
Poços de Caldas	Quisisana Sulfurosa	0,058	0,000967

Novamente, segundo se verifica, a maior atividade foi encontrada para a amostra de água subterrânea da Fonte Villela, no município de Águas da Prata (SP), o que é compatível com o conhecimento que se dispõe acerca da radioatividade das águas das amostras selecionadas para análise. Dessa forma, a técnica utilizada é apropriada para emprego nas amostras de águas subterrâneas do aquífero Guarani.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Atividade beta total

Após obtidos os espectros gama para as amostras de água analisadas, estes foram examinados visando-se obter a atividade beta total. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5: Atividade beta total das amostras analisadas.

Amostra	Contagem	Tempo de Contagem (s)	Taxa de Contagem	Taxa de contagem líquida	Atividade beta total (dpm)	Atividade beta total (Bq)
Background	160054	70161,34	2,28122781	N. A. ⁴	N. A.	N. A.
Fernandópolis (p1)	112852	47880,22	2,356964943	0,075737133	4,544321372	0,07573869
Fernandópolis (p2)	119890	51103,54	2,34602143	0,06479362	3,887697114	0,064794952
Jales	121341	52014,78	2,332817711	0,051589901	3,095457658	0,051590961
Olímpia	95514	40940,56	2,332992026	0,051764216	3,105916764	0,051765279
São José do Rio Preto (p1)	103328	44020,94	2,34724656	0,06601875	3,961206435	0,066020107
São José do Rio Preto (p2)	88558	37806,98	2,3423717	0,06114389	3,668708777	0,061145146
Catanduva	95894	41223,98	2,32617035	0,04494254	2,696607843	0,044943464
Novo Horizonte	91798	39445,24	2,327226302	0,045998492	2,759966218	0,045999437
Pederneiras	96131	41120,48	2,337788858	0,056561048	3,393732659	0,056562211
Vanglória	104136	45026,32	2,312780614	0,031552804	1,893207129	0,031553452
São Simão	89271	37877,76	2,356818355	0,075590545	4,535525893	0,075592098
Serra Azul	97272	41291,24	2,355753908	0,074526098	4,471657788	0,07452763
Serrana	109880	46925,72	2,341573022	0,060345212	3,620787148	0,060346452
Batatais	91704	40007,72	2,292157614	0,010929804	0,655801693	0,010930028
Ribeirão Preto (p1)	95729	40229,92	2,379547362	0,098319552	5,89929435	0,098321572
Ribeirão Preto (p2)	95502	41129,76	2,321968327	0,040740517	2,444481235	0,040741354
Ribeirão Preto (p3)	96840	41565,14	2,329836974	0,048609164	2,916609781	0,048610163
Guatapar	89381	38783,04	2,30464141	0,0234136	1,404844889	0,023414081
Ibat	89381	38783,04	2,30464141	0,0234136	1,404844889	0,023414081
Amrico Brasiliense	97926	42397,06	2,309735628	0,028507818	1,710504228	0,028508404
Descalvado	94206	40895,52	2,303577507	0,022349697	1,341009367	0,022350156
Bocaina	99042	43414,26	2,281324155	0,000096345	0,005780819	0,000096347
Barra Bonita	103176	44446,22	2,321367261	0,040139451	2,408416581	0,040140276
Agudos	113497	49502,78	2,292739923	0,011512113	0,69074097	0,011512349
Ja	108540	46366,12	2,340933423	0,059705613	3,582410403	0,05970684
Itirapina (p1)	96442	41470,38	2,32556345	0,04433564	2,660193094	0,044336552
Itirapina (p2)	242762	104053,44	2,333051171	0,051823361	3,109465544	0,051824426
Sertãozinho	308139	134509	2,290842992	0,009615182	0,576922772	0,00961538
São Pedro	96281	41680,88	2,309956028	0,028728218	1,723728494	0,028728808
KCL 1 mg/L + traçador	95523	37259,5	2,563722	0,282494194	16,94999999	0,2825

Analisando-se a Tabela 5, verifica-se que as amostras de água analisadas possuem baixa atividade beta total.

6.2. Atividade alfa total

Após obtidos os espectros alfa para as amostras de água analisadas, estes foram examinados visando-se obter a atividade alfa total. Na Tabela 6 estão apresentados os resultados obtidos.

⁴ Não Aplicável.

Tabela 6: Atividade alfa total das amostras analisadas.

Amostra	Detector	Contagem	Tempo de Contagem (s)	Taxa de contagem	Taxa de contagem líquida	Atividade alfa total (dpm)	Atividade alfa total (Bq)
Background 1	1	537	89736,24	0,005984204	0	N. A.	N. A.
Background 2	2	69	190996,1	0,000361264	0	N. A.	N. A.
Background 3	3	214	154570,8	0,001384479	0	N. A.	N. A.
Background 4	4	99	106393,52	0,000930508	0	N. A.	N. A.
Fernandópolis (p1)	2	62	84321,86	0,000735278	0,000374014	0,032083065	0,000534718
Fernandópolis (p2)	1	541	84282,44	0,006418893	0,000434689	0,037287796	0,000621463
Jales	2	53	92595,1	0,000572384	0,000211121	0,018110005	0,000301833
Olímpia	2	42	93564,22	0,00044889	0,000087625	0,007516558	0,000125276
São José do Rio Preto (p1)	3	66	93603,82	0,000705099	-0,000679379	N. D ⁵ .	N. D.
São José do Rio Preto (p2)	4	88	84391,98	0,001042753	0,000112245	0,009628447	0,000160474
Catanduva	1	587	92277,08	0,006361276	0,000377072	0,032345375	0,00053909
Novo Horizonte	4	74	92678	0,000798463	-0,000132044	N. D.	N. D.
Pederneiras	4	102	87394,78	0,001167118	0,00023661	0,020296495	0,000338275
Vanglória	2	32	77992,56	0,000410296	0,000049031	0,004205952	0,000070099
São Simão	4	217	89831,36	0,002415637	0,00148513	0,127395002	0,00212325
Serra Azul	3	69	84368,84	0,000817837	-0,000566641	N. D.	N. D.
Serrana	2	40	89787,42	0,000445497	0,000084232	0,007225521	0,000120425
Batatais	1	438	71253,66	0,006147053	0,000162848	0,013969189	0,00023282
Ribeirão Preto (p1)	2	71	71289,56	0,000995938	0,000634674	0,054442611	0,000907377
Ribeirão Preto (p2)	1	516	87536,08	0,005894712	0,000089492	N. D.	N. D.
Ribeirão Preto (p3)	1	541	84764,4	0,006382396	0,000398192	0,034157066	0,000569284
Guatapar	1	453	82647,84	0,005481087	-0,000503117	N. D.	N. D.
Ibaté	3	150	86531,24	0,001733478	0,000348999	0,029937284	0,000498955
Amrico Brasiliense	3	41	87446,7	0,000468857	-0,000915622	N. D.	N. D.
Descalvado	3	77	84707,78	0,000909007	-0,000475471	N. D.	N. D.
Bocaina	4	70	78046,28	0,000896904	-0,000033604	N. D.	N. D.
Barra Bonita	2	26	87490,9	0,000297174	-0,000064090	N. D.	N. D.
Agudos	4	77	84681,9	0,000909285	-0,000021222	N. D.	N. D.
Ja	3	65	78020,76	0,000833112	-0,001384479	N. D.	N. D.
Itirapina (p1)	4	95	105214,02	0,000902921	-0,000027583	N. D.	N. D.
Itirapina (p2)	2	140	105190,88	0,001330914	0,00096965	0,083176949	0,001386282
Sertãozinho	2	32	84736,3	0,000377642	0,000016378	0,001404932	0,000023415
São Pedro	2	103	186603,64	0,000551972	0,000190708	0,01635902	0,00027265
KCl 1 mg/L + traçador	4	14989	75500,6	0,19852812	0,19759761	16,95	0,2825

Analisando-se a Tabela 6, verifica-se que as amostras de água analisadas possuem baixa atividade alfa total. Nesta Tabela, N. D. corresponde a “não detectado”, o que significa que a atividade alfa total  menor que o limite de detecção do sistema utilizado, podendo inclusive ser nula.

6.3. Correlação com os dados físicos e físico-químicos

Um dos objetivos deste trabalho foi correlacionar os dados de atividade obtidos com outros dados já disponíveis. Isto porque vários radionuclídeos naturais possuem tendências de mobilidade que variam de acordo com parâmetros físicos e físico-químicos.

⁵ Não detectado.

Posteriormente à obtenção dos dados de atividades beta e alfa total das amostras de água analisadas, estes foram correlacionados, um a um, com os dados oriundos de pesquisa previamente conduzida por Bonotto (1996). Esta correlação foi feita empregando-se o programa Microsoft Office Excel, através de regressão linear simples.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de R^2 obtidos.

Tabela 7: Valores do coeficiente de correlação (R^2) obtidos através das regressões lineares simples.

Amostra	Atividade alfa		Atividade beta total (Bq)	pH	Conduct. ($\mu\text{s}/\text{cm a } 25^\circ\text{C}$)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	CO ₃ ²⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	F ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	RS ⁶
	total (Bq)																
Fernandópolis (p1)	0,000534718		0,07573869	9,26	461	102	0,8	1,5	0,2	92	30	36	46,5	0,01	0,58	8,7	337
Fernandópolis (p2)	0,000621463		0,064794952	9,46	604	126	1,8	3,7	0,8	81	38	56	61,7	<0,2	0,78	31	377
Jales	0,000301833		0,051590961	8,7	434	86	3,1	1	0,4	98	36	26	23	0,24	0,69	8,5	263
Olimpia	0,000125276		0,051765279	9,15	322	82	<0,1	0,4	<0,1	95	68	2,4	8	5	0,33	4,1	236
São José do Rio Preto (p1)	N. D.		0,066020107	9,25	396	92,5	0,5	0,8	0,4	109	65	9	11	-	1,18	26	246
São José do Rio Preto (p2)	0,000160474		0,061145146	9,22	410	90	1,2	1,6	0,2	113	65	15	12	0,1	0,78	35	270
Catanduva	0,00053909		0,044943464	8,87	280	74	0,6	<1	<0,1	104	68	3	1	0,01	0,45	29	214
Novo Horizonte	N. D.		0,045999437	9,15	418	98	0,7	2,4	1	102	69	15	11,2	-	1,09	27	535
Pederneras	0,000338275		0,056562211	6,84	204	1,8	5,2	37	2,1	104	-	10	0,4	0,08	0,1	24	148
Vanglória	0,000070099		0,031553452	6,77	139	5,7	2	14,8	2,7	59	-	-	3,6	0,04	-	38	98
São Simão	0,00212325		0,075592098	4,91	62	3	2,2	4	2	12	-	-	2,5	2,6	0,1	11	34
Serra Azul	N. D.		0,07452763	5,2	49	1,8	3	5,2	0,7	21	-	-	0,5	0,01	0,08	24,6	58
Serrana	0,000120425		0,060346452	5,53	77	3,1	1	8	2	23	-	-	4	1,81	0,18	-	80
Batatais	0,00023282		0,010930028	6,78	84	12,8	4,6	3,2	<0,1	33	-	1	0,5	0,01	0,2	1,2	61
Ribeirão Preto (p1)	0,000907377		0,098321572	5,4	45	1,2	4,6	<0,1	0,7	14	-	0,1	5	5,55	0,14	27,8	100
Ribeirão Preto (p2)	N. D.		0,040741354	5,61	36	1,1	10,8	0,4	0,5	13	-	<0,1	2,5	0,31	0,14	24,2	120
Ribeirão Preto (p3)	0,000569284		0,048610163	5,57	61	3,1	6,8	<0,1	0,8	18	-	<0,1	4,5	5,5	0,11	26,9	120
Guataporá	N. D.		0,023414081	6,09	28	0,7	2	4	<1	14	-	-	0,2	0,12	0,1	18	40
Ibaté	0,000498955		0,023414081	6,43	61	1,5	3,1	6	2	18	-	-	0,5	2,27	0,1	29	70
Américo Brasileiro	N. D.		0,028508404	6,41	107	7,4	4	10	<1	50	-	-	0,1	0,02	0,1	25	282
Descalvado	N. D.		0,022350156	5,88	45	2	4,3	0,5	0,6	18	-	<0,1	2	0,03	0,54	26	72
Bocaina	N. D.		0,000096347	6,9	311	7,2	2	50,4	5,1	158	-	-	3,5	-	0,2	44	222
Barra Bonita	N. D.		0,040140276	6,08	200	5,4	2,7	24	6	88	-	-	3,5	1,13	0,26	58	144
Agudos	N. D.		0,011512349	6,83	180	10,8	2,1	22,3	3,1	91	-	3	0,9	0,04	0,1	11,2	120
Jauú	N. D.		0,05970684	6,56	143	7,3	2,7	19	1,9	72	-	-	1	0,01	0,12	21	94
Itirapina (p1)	N. D.		0,044336552	4,03	5,6	<0,1	2	0,3	0,6	2	-	<2	0,5	0,04	<0,1	7,3	31
Itirapina (p2)	0,001386282		0,051824426	4,76	12	0,3	1,4	0,8	0,4	5	-	<2	0,5	0,04	<0,1	13,9	39
Sertãozinho	0,0000234155		0,009615379	7,28	205	10,5	5,8	<0,1	0,6	11	-	<0,1	0,8	0,01	0,3	24,3	140
São Pedro	0,00027265		0,028728808	5,89	14	<0,1	0,7	0,3	1	6	-	<2	1,5	0,32	<0,1	12,4	30
CORRELAÇÃO COM ATIVIDADE BETA TOTAL				R²=0,006	R²=0,035	R²=0,11	R²=0,02	R²=0,1	R²=0,09	R²=0,00	R²=0,76	R²=0,41	R²=0,14	R²=0,14	R²=0,38	R²=0,05	R²=0,02
CORRELAÇÃO COM ATIVIDADE ALFA TOTAL				R²=0,04	R²=0,01	R²=0,001	R²=0,005	R²=0,05	R²=0,02	R²=0,07	R²=0,41	R²=0,02	R²=0,02	R²=0,11	R²=0,03	R²=0,05	R²=0,03

6 Resíduo seco a 105°C.

Em termos gerais, os valores de R^2 encontrados são bastante baixos. O valor mais elevado de R^2 (0,76) refere-se à correlação entre a atividade beta total e os dados de CO_3^{2-} , entretanto, havia dados disponíveis de CO_3^{2-} para apenas oito das amostras analisadas.

Desta forma, verifica-se que não há relação linear entre os dados de atividades beta e alfa total gerados e os dados físicos e físico-químicos já disponíveis.

6.4. Correlação com o fluxo subterrâneo

Os dados de atividades beta e alfa total gerados foram lançados no mapa potenciométrico do aquífero Guarani, extraído de Bonotto (1996), utilizando-se o software Auto Cad Map. Como resultado, foram obtidas as Figuras 16 e 17, respectivamente.

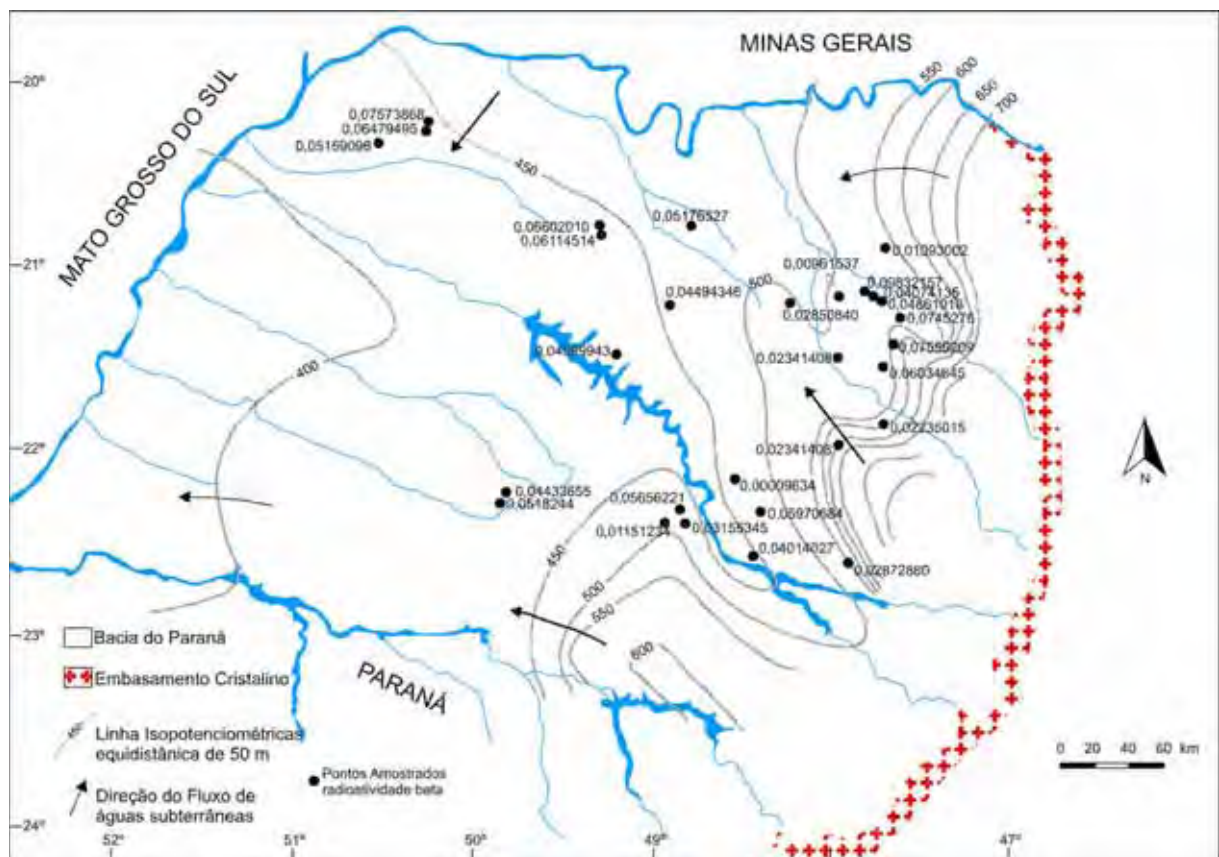


Figura 16: Correlação da atividade beta total com o fluxo subterrâneo.

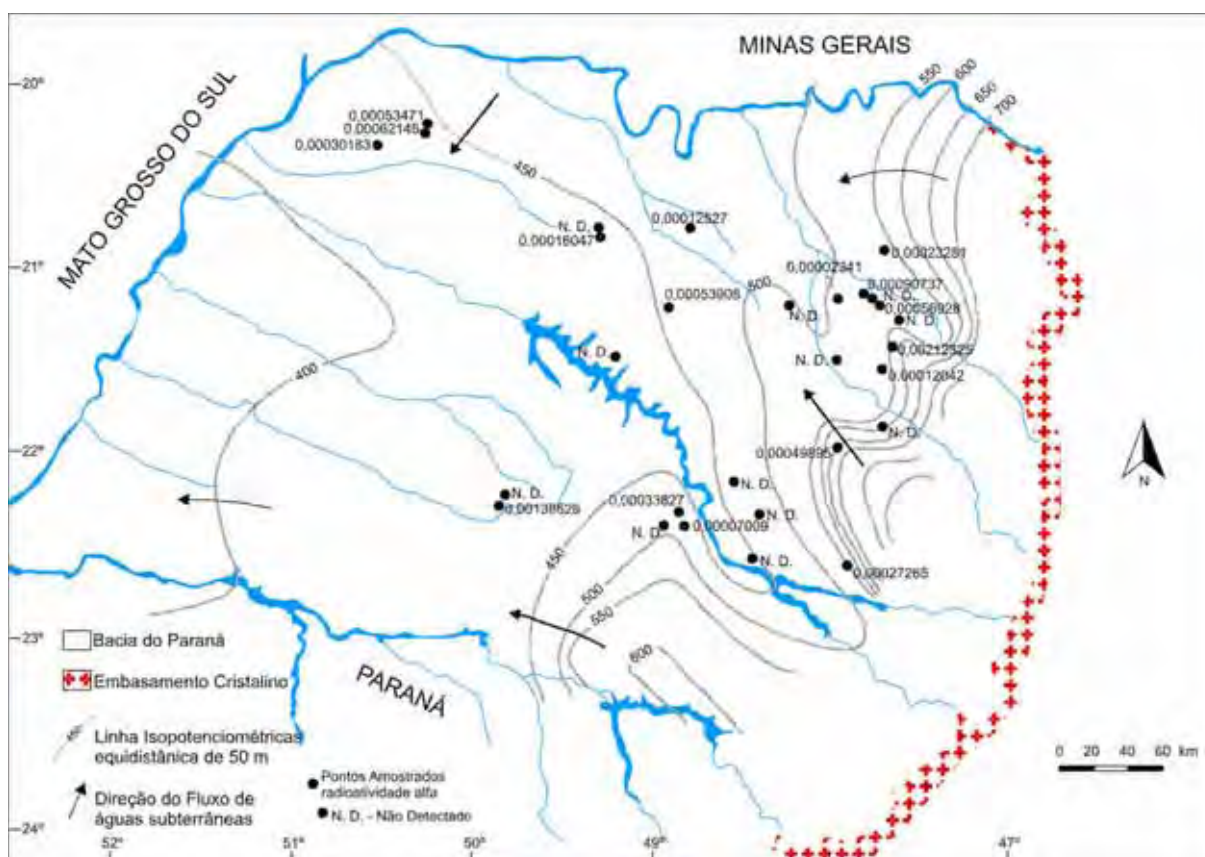


Figura 17: Correlação da atividade alfa total com o fluxo subterrâneo.

Para averiguar se as direções gerais de fluxo subterrâneo do aquífero Guarani conferia alguma tendência aos dados de atividades beta e alfa total obtidos, tomou-se todas as linhas de fluxo das Figuras 16 e 17, uma a uma, e avaliou-se variação dos dados ao longo delas.

Verificou-se, assim, que a variação dos dados de atividades beta e alfa total ao longo das linhas de fluxo é totalmente irregular. Dessa forma, os valores obtidos não se relacionam com o sentido do fluxo das águas do aquífero Guarani.

6.5. Avaliação da qualidade das águas do Aquífero Guarani no contexto da legislação brasileira vigente quanto aos aspectos radiológicos

A Organização Mundial da Saúde realizou sua última atualização no que se refere aos valores máximos de radioatividade recomendados para águas de consumo humano no ano de 2004. Nesta atualização, permaneceu recomendado o valor de 1 Bq/L para a atividade beta total, enquanto que para a atividade alfa total o valor foi alterado, passando de 0,1 Bq/L para 0,5 Bq/L.

Os dados de atividades beta e alfa total foram gerados a partir de um volume inicial de 1 L de amostra, que foi posteriormente evaporado até 12 mL e até a total produção de resíduo

seco, respectivamente. Portanto, a avaliação da qualidade das águas do aquífero Guarani no contexto da legislação citada dá-se de maneira direta, ou seja, em Bq/L, não havendo a necessidade de transformar unidades.

Comparando-se os dados de atividades beta e alfa total obtidos (Tabelas 5 e 6, respectivamente) com os valores máximos de radioatividade recomendados pela Organização Mundial da Saúde, conclui-se que nenhuma das amostras de água do aquífero Guarani analisadas neste trabalho encontra-se inadequada para o consumo humano no que refere-se aos aspectos radiológicos.

7. CONCLUSÕES

Analisando-se os dados de atividades beta e alfa total obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que, nos municípios onde se realizaram análises, as águas do aquífero Guarani encontram-se com baixa radioatividade, tanto beta quanto alfa total. Ocorreram, inclusive, amostras cuja atividade alfa total foi menor que o limite de detecção do sistema espectrométrico utilizado.

A correlação dos dados obtidos com os dados físicos e físico-químicos já disponíveis para as águas analisadas indicou que não há relação linear entre eles. O valor mais elevado de R^2 foi encontrado para a correlação entre os dados de atividade beta total e de CO_3^{-2} (0,76), porém, este valor refere-se à dados de apenas oito amostras.

A análise resultante da inserção dos dados obtidos no mapa potenciométrico permitiu concluir que os valores de atividades beta e alfa total não se relacionam com o sentido do fluxo das águas subterrâneas do aquífero Guarani.

Concluiu-se, também, que nos municípios onde se realizaram análises, as águas do aquífero Guarani encontram-se adequadas para o consumo humano no que se refere aos aspectos radiológicos, segundo o recomendado pela Organização Mundial da Saúde.

Finalmente, recomenda-se dar continuidade a esta pesquisa, caracterizando as atividades beta e alfa total em mais poços tubulares profundos perfurados no aquífero Guarani, correlacionando-se os dados de atividade com os dados físicos e físico-químicos através de outros tipos de regressão, como por exemplo a regressão logarítmica, e correlacionando os valores obtidos com outras variáveis, como profundidade e pressão geostática.

8. REFERÊNCIAS

ADAMS, J.A.S.; GASPARINI, P. *Gamma ray spectrometry of rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1970. 279 p.

ALMEIDA, F. F. M. de; MELO, M. S. A bacia do Paraná e o vulcanismo Mesozóico. In: PROMOCET. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais - Pró Minério, 1981. v. 1, p. 46-81.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P.E. *Giant mercosul aquifer of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay: hydrogeologic maps of Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones and Tacuarembó Formations*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1995. Paginação irregular.

BONOTTO, D. M. *Aplicações dos dados de fracionamento isotópico $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ nos problemas geoquímicos dos aquíferos de Águas da Prata (SP)*. 1982. 161 f.. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

_____. *Aplicações hidrogeoquímicas naturais das séries do U ($4n+2$) e Th ($4n$) no Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG)*. 1986. 378 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

_____. *Espectrometria gama com detector de cintilação de NAI(TI)*. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1990. Apostila da disciplina Radioelementos no Ambiente.

_____. *Comportamento hidrogeoquímico do ^{222}Rn e isótopos de Urânio ^{238}U e ^{234}U sob condições controladas de laboratório e em sistemas naturais*. 1996. 223 f. Tese (Livre docência na disciplina Geoquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

_____. Geo(Anthropo)genic factors affecting the radioactivity in groundwaters from Guarani aquifer, Brazil. In: BREBBIA, C.A.; ALMORZA, D.; SALES, D. (Ed.). *Water Pollution VII: Modelling, Measuring and Prediction*. Southampton: WIT Press, 2003. p. 137-146.

_____. Doses from ^{222}Rn , ^{226}Ra , and ^{228}Ra in groundwaters from Guarani aquifer, South America. *Journal of Environmental Radioactivity*, Oxford, v. 76, n. 1, p. 319-335, 2004.

_____. Hydro(radio)chemical relationships in Guarani aquifer, Brazil. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 323, n. 1-4, p. 353-386, May 2006.

BONOTTO, D.M.; CAPRIOGLIO, L. Radon in groundwaters from Guarani aquifer, South America: environmental and exploration implications. *Applied radiation and isotopes*, New York, v. 57, n. 1, p. 931-940, 2002.

BONOTTO, D. M.; MELLO, C. B. Enhancement of the natural radioactivity in waters due to the presence of the radon daughters ^{214}Pb and ^{214}Bi . In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLIED ISOTOPE GEOCHEMISTRY, 6., 2005, Praga. *Abstracts...* Praga: Czech Geological Survey, 2005. p. 28-29.

BOWIE, S.H.U.; PLANT, J. A. Natural radioactivity in the environment. In: THORNTON, I. (Ed.). *Applied environmental geochemistry*. London: Academic Press, 1983. p. 327-339.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional das Águas – ANA. *Informações Hidrogeológicas*. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/InfoHidrologicas/aguasSubterr/mapaProvHidr.>> Acesso em: 05 nov. 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional das Águas – ANA. *O aquífero Guarani*. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/guarani/sistema/descricao.htm>> Acesso em: 25 set. 2007

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO BÁSICO – CETESB. *Importância das águas subterrâneas*. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/agua_sub/importancia.asp> Acesso em: 12 set. 2007.

DALRYMPLE, G. B.; LANPHERE, M. *Potassium-argon dating: Principles, techniques and applications to geochronology*. San Francisco: Freeman and Company, 1969. 332 p.

DUARTE, C. R. *Relações radiométricas e isotópicas na área do Projeto Rio Preto (GO)*. 1997. 119 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

HIODO, F. Y. *Desenvolvimento de instrumentação em geofísica nuclear e a sua aplicação no Morro do Ferro*. 1989. 117 f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. *International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*. Vienna: Safety Series, 1996. v. 15, não paginado.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. *Annals of the ICRP*, Oxford, v. 4, n. 3/4, p. 1-71, 1980.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. Recommendations of the ICRP. *Annals of the ICRP*, Oxford, v. 21, n. 1/3, p. 1-92, 1991.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - IOS. *Water quality: measurement of gross alpha activity in non-saline water – thick source method*. Geneva, 1990a. (Draft International Standard 9696).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - IOS. *Water quality: measurement of gross beta activity in non-saline water*. Geneva, 1990b. (Draft International Standard 9697).

IVANOVICH, M.; HARMON, R.S (Ed.). *Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences*. Oxford: Clarendon Press, 1982. 909 p.

JANZER, V.J. Discordant gross radioactivity measurements of natural and treated waters. In: KELLY, J. J. (Ed.). *Effluent and environmental radiation surveillances*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1980. p. 327-341.

KU, T. L. The uranium: series methods of age determination. *Annual review of earth and planetary science*, California, v. 4, p. 347 – 79, 1976.

MICHEL, J.; KING, P.T.; MOORE, W.S. *Ra-228, Ra-226 and Rn-222 in South Carolina groundwater: measurement techniques and isotope relationships*. Clemson: Water Resources Research Institute, 1982. 57 p. Technical Report, v. 5.

REBOUÇAS, A. O Paradoxo Brasileiro. *Revista Cadernos Le Monde Diplomatique*, São Paulo, n. 3, p. 38-41, 2003.

REBOUÇAS, A. C. Groundwater in Brazil. *Episodes*, Ottawa, v. 11, p. 209-214, 1988.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. *O aquífero Guarani*. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/aquifero/aquifero_guarani.htm> Acesso em: 25 set. 2007.

SOARES, P. C. Divisão estratigráfica do mesozóico no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 5, p. 229-251, 1975.

TORQUATO, J. R.; KAWASHITA, K. Radioatividade e princípios físicos da geocronologia. *Rev. de Geologia*, Fortaleza, v. 3, p. 101-21, 1990.

WANTY, R.B.; NORDSTROM, D.K. Natural radionuclides. In: ALLEY, W.M. (Ed.). *Regional ground-water quality*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. p. 423-441.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. *Guidelines for drinking-water quality: Recommendations*. 2nd ed. Geneva, 1993. v. 1, p. 114-121.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. *Guidelines for drinking-water quality: Health information and other supporting information*. 2nd ed. Geneva, 1996. v. 2, p. 908-915.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: Recommendations*. 3rd ed. Geneva, 2004. v. 1, p. 197-209.