

RADIONUCLÍDEOS NATURAIS E ARTIFICIAIS EM SEIS PERFIS DE SOLOS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Luiz Alexandre Schuch

Dpto. de Física - Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM - Santa Maria, RS

Daniel Jean Roger Nordemann

Divisão de Geofísica Espacial - INPE - São Paulo, SP

Ari Zago

Dpto. de Solos - Centro de Ciências Rurais - UFSM - Santa Maria, RS

Brigitte Pecequillo

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN - São Paulo, SP

José Marcos Godoy

Instituto de Radioproteção e Dosimetria - CNEN - Rio de Janeiro, RJ

RESUMO

Determinou-se as concentrações de radionuclídeos pertencentes às séries radioativas naturais, do K-40 e do Cs-137, proveniente da precipitação radioativa. Muitos parâmetros físicos, químicos e biológicos influenciam a distribuição vertical da radioatividade dentro dos solos. Estes fatores incluem a natureza e as características do solo; a quantidade de chuva depositada; as perturbações das camadas superficiais; e outras propriedades peculiares do solo, como teores e tipos dos minerais de argila, matéria orgânica, etc. Para as medidas das concentrações de radionuclídeos, utilizou-se a técnica de espectrometria gama de alto desempenho. Foram coletadas 10 amostras de cada tipo de solo, até 50 cm de profundidade, com amostras obtidas de 5 em 5 cm. Foram efetuadas análises que determinam, entre outros parâmetros, pH, teores de argila, carbono orgânico e cátions K^+ , Na^+ , Ca^{++} e Mg^{++} e acidez extratível. Também foram obtidos dados sobre a precipitação pluviométrica local, temperatura e relevo, e relativos a latitude, longitude e altitude. Observou-se que as maiores concentrações de Cs-137, em Bqm^{-2} , encontram-se nas três amostras mais superficiais de cada perfil. Acima de 60% da concentração está confinada nos 25 centímetros superiores de todos os locais de amostragem. Constatou-se uma elevada correlação linear entre as concentrações de Cs-137, nas amostras superficiais de solos de cada perfil, e o conteúdo de carbono orgânico e, que até os 50cm de profundidade, os teores de Ac-228 e Tl-208, para as diferentes amostras de cada perfil de solo analisado, não variaram substancialmente. Estes dados contribuem para mostrar o estado de

relativo equilíbrio radioativo nos seis perfis de solos estudados. Observa-se, assim, que estes solos não sofreram erosão, e que o processo de lixiviação é pouco importante para estes elementos pertencentes às famílias radioativas naturais.

ABSTRACT

Concentrations of natural radioactive series radionuclides, of K-40, and of radioactive fallout Cs-137 are determined. Many physical, chemical and biological parameters influence the radioactivity vertical distribution in soils. Among these factors are soil type and characteristics; rainfall; superficial layers perturbations and other peculiar properties of the soil such as concentration and types of clay mineral, organic matter, etc. High performance gamma-ray spectrometry is used to determine radionuclide concentrations. Ten samples of each type of soil are collected, down to 50 cm with samples collected every 5 cm. pH, clay concentration, organic carbon and K^+ , Na^+ , Ca^{++} and Mg^{++} cations and total acidity are analyzed, among other parameters. Data on local pluviometry, temperatures and relief, latitude, longitude and altitude are also collected. It is observed that the highest concentrations of Cs-137 are found in the three uppermost superficial samples for every profile. More than 60% of the Cs-137 lays within the 25 cm uppermost layer for all sampling locations. It is observed for soil superficial samples of every profile, a high linear correlation between Cs-137 concentration and organic carbon concentration and that, down to a depth of 50 cm, Ac-228 and Tl-208 concentrations do not vary appreciably for different equivalent samples. These results help showing the state of relative equilibrium within the six profiles studied. So it may be observed that these soils have not suffered from erosion and that lixiviation process is not important for these elements which belong to natural radioactive series.

INTRODUÇÃO

Determinou-se as concentrações de radionuclídeos pertencentes às séries radioativas naturais, do K-40 e do Cs-137, proveniente da precipitação radioativa, decorrente de testes nucleares atmosféricos. Tais concentrações foram determinados por espectrometria gama de alto desempenho.

O estudo da radioatividade natural fornece evidências sobre a possibilidade de estes radionuclídeos serem incorporados à cadeia alimentar humana, através das plantas e animais

(Vasconcelos et al., 1987; Bettencourt et al., 1988; Arruda Neto, 1988; Eisenbud, 1987; Eisenbud e Paschoa, 1989; Linsalata et al., 1989).

Existe grande variabilidade da radioatividade natural em solos nas diversas regiões da Terra. No Brasil, algumas regiões foram investigadas, como a faixa ao longo da costa do Estado do Espírito Santo, onde ocorrem depósitos de areias monazíticas, ricas em terras raras e óxidos de tório; a região de centros vulcânicos alcalinos do Estado de Minas Gerais e Goiás; a região do Município de Piracicaba, no Estado de São Paulo; a região de Irecê, no Estado da Bahia, entre outros locais (Vasconcelos et al., 1987; Moreira-Nordemann e Sieffermann, 1979; Oliveira, 1988; Sakai, 1977; Pereira et al., 1986; Linsalata et al., 1989).

Pode-se observar o possível desequilíbrio radioativo na série do tório, para a qual o restabelecimento do equilíbrio radioativo é bastante rápido, já que o nuclídeo de vida mais longa dentro da série do Th-232 é o Ra-228, com meia-vida de 6,7 anos. Sendo assim, o equilíbrio do Ra-228 em relação ao Th-232 é alcançado em apenas 40 anos, tempo pequeno em termos geológicos. Todos os outros nuclídeos da série do tório apresentam meia-vida menor que a do Ra-228; portanto, é esse nuclídeo que vai comandar o tempo para o restabelecimento do equilíbrio da série do tório.

A detecção da radioatividade artificial decorrente do Cs-137 pode fornecer evidências sobre a circulação atmosférica, já que este elemento foi em sua quase totalidade produzido no Hemisfério Norte e transportado, através da circulação estratosférica inter-hemisférica, para o Hemisfério Sul (Kogan et al., 1971; Eisenbud, 1987; Picciotto e Wilgain, 1963; Fabian et al., 1968; Ehhalt e Haumacher, 1970). Tal detecção pode ainda fornecer evidências do comportamento deste radionuclídeo nos solos mais representativos do Brasil.

Com exceção de 12 testes nucleares atmosféricos realizados pelo Reino Unido em Woomera (31°S, 137°E) e em Maralinga Proving Ground (30°S, 131°E) na Austrália, e de 26 testes efetuados pela França, em Mururoa e em Fangataufa (21°S, 137°W), no Arquipélago Tuamotu, 801 testes (dos quais 383 foram atmosféricos) realizaram-se no Hemisfério Norte (Carter e Moghissi, 1977).

Além da precipitação radioativa local, o "fallout" troposférico fica retido no próprio hemisfério onde foi produzido. As correntes de ar atmosféricas, ascendentes no equador até os níveis da tropopausa, impedem a entrada destes rejeitos no Hemisfério Sul, através da troposfera. Somente rejeitos que atingem a estratosfera, a partir de explosões nucleares ocorridas em maiores altitudes ou explosões de grandes potências ocorridas em baixas altitudes, introduzem produtos de

fissão na estratosfera do Hemisfério Norte, que passam primeiramente para a estratosfera e, a seguir, para a troposfera do Hemisfério Sul. Posteriormente, através do "fallout", penetram no solo.

É a umidade da troposfera que contribui para a diminuição do tempo de residência das partículas de "fallout", que na ausência de chuva é bastante reduzido (Eisenbud, 1987; Arnalds et al., 1989; Cox e Fankhauser, 1984; Bunzl e Kracke, 1988). O "fallout" estratosférico exibe uma variação sazonal típica, com um máximo na primavera ou início do verão e um mínimo no outono em ambos os hemisférios (Aoyama et al., 1991; Aarkrog, 1988).

Muitos parâmetros físicos, químicos e biológicos influenciam a distribuição vertical da radioatividade dentro dos solos. Estes fatores incluem a natureza do solo, o tipo e a quantidade de chuva depositada no solo; a drenagem e permeabilidade do material; a topografia da área; os efeitos da vizinhança de edifícios, árvores, florestas etc.; perturbações das camadas superficiais por aragem; influência de animais e raízes; e outras propriedades peculiares do solo, como teores e tipos dos minerais de argila, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC) etc. (Walton, 1963).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para as medidas das concentrações de radionuclídeos, utilizou-se a técnica de espectrometria gama de alto desempenho. Foram considerados os seguintes fotopicos (Erdtmann e Soyka, 1979):

- Família do Th-232: 583,1 keV (Tl-208: 86,0%) e 911,1 keV (Ac-228: 29,0%).
- Família do U-238: 609,3 keV (Bi-214: 46,1%).
- K-40 (1460,7 keV: 10,7%).
- Cs-137 (661,6 keV: 84,6%).

Foram coletadas 10 amostras de cada tipo de solo até 50 cm de profundidade, com amostras tomadas de 5 em 5cm, utilizando-se amostradores (Nyhan et al., 1983) especialmente projetados para este fim, com dimensões de 20×10×5cm, de aço carbono 1020. (Schuch, 1993).

Com o sistema de espectrometria gama do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pertencente a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), determinou-se as concentrações de radionuclídeos das amostras.

Foram feitas análises pedológicas (Vettori, 1969), que determinam, entre outros parâmetros, pH, teores de argilas, carbono orgânico e cátions K^+ , Na^+ , Ca^{++} e Mg^{++} , acidez extratível, a capacidade de troca de cátions (CTC), e percentagem de saturação de bases (V).

Também foram obtidos dados sobre a precipitação pluviométrica local, temperatura e relevo, bem como dados relativos a latitude, longitude e altitude.

As amostras coletadas dependem das condições e das finalidades da amostragem e por isso possuem massa total que depende do local de coleta (em florestas, campos de pastagem natural ou cultivados, terras para agricultura etc.) bem como da profundidade da amostra de um mesmo perfil. Tais massas variaram entre aproximadamente 0,7 a 1,5 kg. Secou-se o solo ao ar livre, ou empregando-se estufas ou fornos a 50°C, por 2 ou 3 dias, com algumas remexidas para uma secagem homogênea. Posteriormente procedeu-se ao destorroamento, processo de esmagamento das amostras utilizando-se um dispositivo como rolo de madeira, sobre uma superfície de borracha. Após, separou-se a fração grosseira, calhaus (>20 mm) e cascalho (20 a 2 mm) pelo emprego de peneiras de 2 mm de malha. Da terra fina resultante (<2 mm), empregou-se aproximadamente 250 g para as medidas por espectrometria gama e o restante foi utilizado para análises pedológicas. Usou-se neste processo de separação, um dispositivo homogeneizador (Nyhan et al., 1983), para assegurar que as duas frações de terra fina possuíssem a mesma composição. Uma quantidade apropriada de terra fina é acondicionada em recipientes cilíndricos de "polistireno" de 8,0 cm de diâmetro por 3,5 cm de altura cuidadosamente selados de forma que o ar não possa entrar ou sair. Tais amostras foram analisadas somente após 30 dias, quando os produtos de decaimento de vida curta do U-238 e do Th-232 atingiram o equilíbrio radioativo com seus precursores, em particular quando o Rn-222 e seus descendentes alcançaram o equilíbrio radioativo com o Ra-226 (Vasconcelos et al., 1987; Lin et al., 1987).

Tendo-se a área líquida do pico em contagens, o tempo total da medida e a massa da amostra, obtém-se, por comparação com os diversos padrões, a concentração do radionuclídeo em estudo em $Bqkg^{-1}$.

Sabendo-se a massa total de cada amostra de terra fina, obtém-se Bq por amostra. Somando-se estes valores para cada uma das 10 amostras de cada perfil, e dividindo-se pela área do amostrador, obtém-se Bqm^{-2} , para cada perfil de solo (Arnalds et al., 1989).

A Tabela 1 apresenta a classificação e descrição dos perfis de solos estudados. Na Figura 1 estão indicados os locais de coletas.

A Tabela 2 apresenta algumas propriedades físicas e químicas dos perfis de solos estudados. As análises foram realizadas junto ao Departamento de Solos, do Centro de Ciências Rurais (CCR), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações de Cs-137, bem como as de K e dos elementos radioativos naturais pertencentes às séries radioativas do Th-232 e U-238, são apresentadas na Tabela 3.

A Tabela 4 mostra a percentagem da concentração de Cs-137 por unidade de área encontrada para cada intervalo de profundidade. Pode-se observar, para todos os perfis de solos analisados, que as maiores concentrações de Cs-137 encontram-se nas três amostras mais superficiais de cada perfil, isto é, nas amostras coletadas de 0 a 15 cm de profundidade. Acima de 60% da concentração total do Cs-137 está confinada nos 25 centímetros superiores de todos os locais. Observa-se que nesse trabalho constatou-se uma maior distribuição do Cs-137 em profundidade, comparativamente a obtida por Arnalds et al. (1989) que mediram acima de 90% do Cs-137 nos 20 centímetros superiores, nos 11 locais de amostragem analisados (630 mm médios de chuvas anuais). Esta maior homogeneização deve-se em grande parte aos elevados índices de precipitação pluviométrica característica dos locais de amostragem no Estado do Rio Grande do Sul (1600 mm médios de chuvas anuais).

Correlações entre as concentrações de Cs-137 por unidade de área e os valores médios dos parâmetros mostrados na Tabela 2 foram efetuadas numa tentativa de evidenciar quais destes parâmetros poderiam influenciar as concentrações de Cs-137 nos diferentes perfis de solos analisados. Nenhum coeficiente de correlação elevado foi encontrado (Schuch et al., 1994a).

Os perfis de solos considerados neste trabalho foram coletados em locais cuja precipitação média anual fosse a mais uniforme possível, para eliminar esta influência nas correlações efetuadas com os parâmetros pedológicos. Observou-se que em solos coletados em diferentes locais, na parte central do Estado da Bahia, em regiões úmidas (precipitação anual média de 1700 a 2000 mm de chuvas) foram cerca de 40% maiores do que outros solos coletados em regiões secas (600 a 1000 mm).

Existe uma elevada correlação linear entre as concentrações de Cs-137 por unidade de área, nas amostras superficiais de solos de cada perfil, e o conteúdo de carbono orgânico. A Figura 2 mostra o decrescimento do Cs-137 e do carbono orgânico com a profundidade, justificando a elevada correlação linear constatada. Estes resultados provavelmente refletem a baixa correlação de Cs-137 e os teores de argila, já que a maior parte do Cs-137 está confinada nos primeiros centímetros de cada perfil de solo, ao invés de mover-se para baixo, nas camadas mais profundas, ricas em argila (Ver Tabela 2).

Observa-se que até os 50 cm de profundidade, os teores de Ac-228 e de Tl-208, para as diferentes amostras equivalentes de cada perfil de solo analisado (Tabela 3), não variaram

substancialmente. Estes dados contribuem para mostrar o estado de relativo equilíbrio radioativo nos seis perfis de solos estudados.

A razão Ac-228/Tl-208 é praticamente igual para todos os perfis de solos analisados, o que indica um equilíbrio radioativo na série do Th-232. Observa-se assim que estes solos praticamente não sofreram erosão, e que o processo de lixiviação é pouco importante para estes elementos pertencentes às famílias radioativas naturais. Pode-se, assim, supor que a concentração de Ac-228 é equivalente a concentração de Ra-228 e Th-232, e que a concentração de Bi-214 é equivalente a de Ra-226.

Este fenômeno não é constatado para a concentração de Cs-137 em perfis de solos equivalentes coletados em diferentes anos, quando se observa um efeito de lixiviação marcante, já que se pode considerar pequena a erosão em função tanto dos locais de coleta das amostras, quanto da drenagem dos solos estudados. Houve aumento da percentagem de Cs-137, em maiores profundidades, nos diversos perfis coletados mais recentemente. Houve maior penetração do Cs-137 em profundidade, o que provocou uma distribuição mais uniforme deste radionuclídeo ao longo de todo o perfil de solo (Schuch et al., 1994b).

Diversos autores demonstraram existir uma correlação linear positiva entre a precipitação pluviométrica anual média e a concentração de Cs-137 nos solos (Arnalds et al., 1989; Cox e Fankhauser, 1984; Sakai, 1977). Segundo Arnalds et al. (1989), pode ocorrer também maior penetração de Cs-137 durante fortes chuvas, quando a água que contém Cs-137 adsorvido em partículas de solo em suspensão fluem para o interior do perfil. Tal fluxo ocorre em solos arenosos com grandes poros, em solos argilosos com grande capacidade de drenagem, ou em solos que possuem fendas abertas sazonalmente.

Segundo Oliveira (1988), o Cs-137 não foi encontrado em quantidades significativas em amostras de solo do Município de Piracicaba, Estado de São Paulo, pois estas foram coletadas em geral a uma profundidade de 60 cm. Entretanto, sua presença pode ser detectada em algumas amostras superficiais, como era de se esperar, de acordo com este trabalho e segundo Guimarães (1988) e Sakai (1977).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarkrog, A. The radiological impact of the Chernobyl debris compared with that from nuclear weapons fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*, 6:151-162, 1988.

- Aoyama, M.; Hirose, K.; Sugimura, Y. The temporal variation of stratospheric fallout derived from the Chernobyl accident. **Journal of Environmental Radioactivity**, 13:103-115, 1991.
- Arnalds, O.; Cutshall, N.H.; Nielsen, G.A. Cesium-137 in Montana soils. **Health Physics**, 57(6):955-958, Dec. 1989.
- Arruda-Neto, J.D.T. **The content of alpha particle emitters in Brazilian tobacco, and the associated problem of high cancer risk in smokers.** São Paulo, Instituto de Física, USP, Sep. 1988.
- Bettencourt, A.O.; Teixeira, M.M.G.R.; Elias, M.D.T.; Faisca, M.C. Soil to plant transfer of radium-226. **Journal of Environmental Radioactivity**, 6:49-60, 1988.
- Bunzl, K.; Kracke, W. Cumulative deposition of Cs-137, Pu-238, Pu-239+240 and Am-241 from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria (FRG). **Journal of Environmental Radioactivity**, 8:1-14, 1988.
- Carter, M.W.; Moghissi, M.A.A. Three decades of nuclear testing. **Health Physics**, 33:55-71, Jul. 1977.
- Cox, M.E.; Fankhauser, B.L. Distribution of fallout cesium-137 in Hawaii. **Health Physics**, 46(1):65-71, Jan. 1984.
- Ehhalt, D.H.; Haumacher, G. The seasonal variation in the concentration of strontium-90 in rain and its dependence on latitude. **Journal of Geophysical Research**, 75(15):3027-3031, May 1970.
- Eisenbud, M. **Environmental radioactivity**. 3. ed. Orlando, FO, Academic, 1987.
- Eisenbud, M.; Paschoa, A.S. Environmental radioactivity. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, A280:470-482, 1989.
- Erdtmann, G.; Soyka, W. **The gamma rays of the radionuclides -tables for applied gamma ray spectrometry.** Weinheim, NY, Verlag Chemie, 1979.
- Fabian, P.; Libby, W.F.; Palmer, C.E. Stratospheric residence time and interhemispheric mixing of strontium 90 from fallout in rain. **Journal of Geophysical Research**, 73(12):3611-3616, Jun. 1968.
- Guimarães, M.F. **Césio-137 da precipitação radioativa ("fallout") no estudo da erosão e sedimentação de solo.** (Tese de doutoramento) - ESALQ-USP, Piracicaba, ago. 1988
- Kogan, R.M.; Nazarov, I.M.; Fridman, S.D. **Gamma spectrometry of natural environments and formations.** Jerusalem, Israel Program For Scientific Translations, 1971.
- Lin, Y.M.; Lin, P.H.; Chen, C.J.; Huang, C.C. Measurements of terrestrial radiation in Taiwan, Republic of China. **Health Physics**, 52(6):805-811, Jun. 1987.
- Linsalata, P.; Morse, R.S.; Ford, H.; Eisenbud, M.; Penna Franca, E.; Castro, M.B.; Lobao, N. An assessment of soil-to-plant concentration ratios for some natural analogues of the transuranic elements. **Health Physics**, 56(1):33-46, Jan. 1989.
- Moreira-Nordemann, L.M.; Sieffermann, G. Distribution of uranium in soil profiles of Bahia State, Brazil. **Soil Science**, 127(5):275-280, 1979.
- Nyhan, J.W.; White, G.C.; Schofield, T.G.; Trujillo, G. An evaluation of soil sampling for ¹³⁷Cs using various field-sampling volumes. **Health Physics**, 44(5):541-552, May 1983.

- Oliveira, H. **Radioatividade natural em solos do município de Piracicaba.** (Tese de Mestrado) - ESALQ-USP, Piracicaba, out. 1988.
- Pereira, E.B.; Hamza, V.M.; Furtado, V.V.; Adams, J.A.S. U, Th and K content, heat production and thermal conductivity of São Paulo, Brasil, continental shelf sediments: a reconnaissance work. **Chemical Geology**, 58:217-226, 1986.
- Picciocto, E.; Wilgain, S. Fission products in Antarctic snow, a reference level for measuring accumulation. **Journal of Geophysical Research**, 68(21):5965-5972, Nov. 1963.
- Sakai, T. **Distribuição do Cs-137 nos solos do Estado da Bahia.** (Tese de Mestrado) - Universidade Federal da Bahia (UFBA), Fev. 1977.
- Schuch, L.A. **Césio-137 e Radionuclídeos Naturais em Solos do Sul do Brasil e em Solos e outras Amostras Ambientais da Antártica.** (Tese de Doutorado)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Abr. 1993.
- Schuch, L.A.; Nordemann, D.J.R.; Zago, A.; Dallpai, D.L.; Godoy, J. M.; Pecequilo, B. Correlation of natural and artificial radionuclides in soils with pedological, climatological and geographic parameters. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**; 177 (1): 101-106, 1994a.
- Schuch, L.A.; Nordemann, D.J.R.; Barreto, W.O.; Cardoso, A.; Zago, A. Natural and artificial radionuclides of soils from Paraná State, Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 177 (1): 39-49, 1994b.
- Vasconcellos, L.M.H.; Amaral, E.C.S.; Vianna, M.E.; Penna-Franca, E. Uptake of Ra-226 and Pb-210 by food crops cultivated in a region of high natural radioactivity in Brasil. **Journal of Environmental Radioactivity**, 5:287-302, 1987.
- Vettori, L. **Método de análise de solo.** Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura, Jul. 1969. (Boletim Técnico, nº 7).
- Walton, A. The distribution in soils of radioactivity from weapons tests. **Journal of Geophysical Research**, 68(5):1485-1496, Mar. 1963.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO	LATITUDE SUL (S)	LONGITUDE OESTE (W)	ALTITUDE (m)	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (mm)	TEMPERATURA MÉDIA ANUAL (°C)
60-69	Latossolo roxo	38°30'00"	53°45'00"	390	1729	18,2
80-89	Podzólico vermelho escuro	29°30'18"	53°40'40"	470	1575	18,0
120-129	Terra roxa estruturada	28°39'44"	56°00'15"	90	1523	20,1
130-139	Vertissolo	28°40'00"	56°00'00"	180	1523	20,1
140-149	Terra roxa estruturada	28°15'40"	52°24'45"	709	1664	17,2
150-159	Latossolo bruno de altitude	28°30'09"	50°56'12"	955	1412	15,2

TABELA 2 - PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DOS SOLOS ESTUDADOS

AMOSTRA	PROFUNDIDADE cm	pH H ₂ O 1:2,5	ARGILA < 0,002	CARBONO ORGÂNICO	BASES TROCÁVEIS				ACIDEZ ESTRATÍVEL
			mm		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺ + H ⁺
			(%)		mEq/100g				
60	00-05	5,20	50	4,30	4,77	4,24	0,48	0,35	4,90
61	05-10	5,15	60	2,60	4,56	4,24	0,15	0,15	4,37
62	10-15	5,23	64	2,06	4,13	3,07	0,15	0,15	3,40
63	15-20	5,28	65	1,88	2,97	2,65	0,15	0,15	3,40
64	20-25	5,21	67	1,77	2,78	1,82	0,18	0,15	3,35
65	25-30	5,15	70	1,75	2,46	1,50	0,20	0,15	3,35
66	30-35	5,18	70	1,58	1,83	1,30	0,21	0,15	3,35
67	35-40	5,19	72	1,43	1,51	1,19	0,22	0,16	3,35
68	40-45	5,14	72	1,41	1,40	1,29	0,24	0,19	3,20
69	45-50	5,10	72	1,32	1,29	1,00	0,29	0,22	3,10
	00-50	5,18	66	2,01	2,77	2,23	0,23	0,18	3,58
80	00-05	4,93	20	4,00	9,84	4,28	0,28	0,17	11,00
81	05-10	4,74	28	2,28	8,20	2,65	0,21	0,15	8,30
82	10-15	4,64	30	1,90	7,95	2,75	0,13	0,11	7,50
83	15-20	4,64	33	1,80	8,01	2,65	0,09	0,09	7,50
84	20-25	4,74	34	1,57	8,20	3,92	0,09	0,09	7,50
85	25-30	4,76	35	1,40	8,69	3,71	0,09	0,09	7,50
86	30-35	4,82	40	1,33	8,45	3,31	0,08	0,09	7,80
87	35-40	4,82	40	1,27	7,81	3,85	0,08	0,09	8,20
88	40-45	4,90	43	1,20	5,24	3,00	0,11	0,09	8,20
89	45-50	4,84	48	1,17	3,74	2,46	0,14	0,11	8,20
	00-50	4,78	35	1,79	7,61	3,26	0,13	0,11	8,17
120	00-05	5,47	48	2,54	5,60	4,80	0,24	0,16	3,43
121	05-10	5,18	49	2,26	4,60	5,10	0,09	0,11	3,77
122	10-15	5,13	49	1,86	4,20	3,70	0,07	0,10	3,73
123	15-20	5,04	51	1,60	4,20	6,00	0,07	0,10	3,73
124	20-25	5,04	53	1,49	3,80	5,10	0,07	0,10	3,56
125	25-30	5,07	57	1,47	3,50	3,80	0,05	0,09	3,26

continuação da Tabela 2

AMOSTRA	PROFUNDIDADE cm	pH H ₂ O 1:2,5	ARGILA < 0,002	CARBONO ORGÂNICO	BASES TROCÁVEIS				ACIDEZ ESTRATÍVEL
			mm		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺ + H ⁺
			(%)		mEq/100g				
126	30-35	5,07	59	1,30	3,50	3,70	0,05	0,08	3,26
127	35-40	5,03	61	1,21	3,50	3,50	0,04	0,08	3,22
128	40-45	5,01	65	1,07	2,80	2,00	0,04	0,08	3,89
129	45-50	5,02	65	1,01	3,60	1,10	0,03	0,08	3,84
	00-50	5,11	56	1,58	3,93	3,88	0,08	0,10	3,57
130	00-05	5,36	41	5,28	36,51	14,17	0,19	0,34	5,21
131	05-10	5,50	40	4,75	36,84	14,60	0,18	0,30	4,67
132	10-15	5,56	43	4,70	38,25	14,50	0,14	0,30	4,31
133	15-20	5,75	50	4,23	38,69	15,60	0,14	0,30	4,27
134	20-25	5,79	48	4,14	39,60	15,40	0,13	0,34	3,99
135	25-30	5,82	46	2,68	39,71	16,06	0,12	0,26	3,44
136	30-35	5,96	51	1,70	40,51	16,31	0,12	0,26	3,03
137	35-40	6,15	52	1,28	41,62	16,43	0,12	0,26	2,69
138	40-45	6,40	56	1,26	42,22	16,46	0,15	0,66	2,40
139	45-50	6,50	56	1,12	43,12	16,46	0,12	0,40	2,03
	00-50	5,88	48	3,11	39,71	15,60	0,14	0,34	3,60
140	00-05	4,70	44	2,56	6,93	4,18	0,36	0,21	6,73
141	05-10	4,38	44	2,20	6,83	4,18	0,21	0,11	6,73
142	10-15	4,42	48	1,72	4,89	2,75	0,06	0,01	6,39
143	15-20	4,50	50	1,49	3,77	2,34	0,04	0,01	6,34
144	20-25	4,50	50	1,43	3,47	2,24	0,15	0,05	6,28
145	25-30	4,39	52	1,44	4,43	2,37	0,11	0,02	6,21
146	30-35	4,49	56	1,44	5,56	4,74	0,21	0,11	6,11
147	35-40	4,55	59	1,34	9,47	5,45	0,12	0,05	6,11
148	40-45	4,55	64	1,30	12,98	5,87	0,38	0,30	6,11
149	45-50	4,43	64	1,21	14,42	7,72	0,09	0,11	6,06
	00-50	4,49	53	1,61	7,28	4,18	0,17	0,10	6,31

continuação da Tabela 2

AMOSTRA	PROFUNDI- DADE cm	pH H ₂ O 1:2,5	ARGILA < 0,002	CAR- BONO ORGÂNICO	BASES TROCÁVEIS				ACIDEZ ESTRATÍVEL
			mm		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺ + H ⁺
			(%)		mEq/100g				
150	00-05	4,73	62	5,00	3,00	2,40	0,46	0,60	7,80
151	05-10	4,70	62	4,00	2,60	1,05	0,20	0,35	7,80
152	10-15	4,67	63	3,17	2,00	1,70	0,14	0,25	7,80
153	15-20	4,54	70	2,50	1,40	1,30	0,11	0,15	7,64
154	20-25	4,36	70	2,34	1,30	1,30	0,07	0,11	7,64
155	25-30	4,37	70	2,34	1,10	0,60	0,07	0,10	7,30
156	30-35	4,43	72	2,30	0,50	0,90	0,04	0,08	6,75
157	35-40	4,43	72	2,08	0,90	0,70	0,04	0,08	6,75
158	40-45	4,47	77	1,89	0,70	0,60	0,04	0,08	6,30
159	45-50	4,49	77	1,78	1,20	0,50	0,04	0,08	6,12
	00-50	4,52	70	2,74	1,47	1,11	0,12	0,19	7,19

TABELA 3 - RESULTADOS DAS ANÁLISES POR ESPECTROMETRIA GAMA DE SOLOS COLETADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

AMOSTRA	PROFUNDIDADE (cm)	Cs-137 (BqKg ⁻¹)	Cs-137 (Bqm ⁻²)	Eq Th-232		Ac-228	Eq U-238	K (K-40) (%)
				Ac-228 ppm	Tl-208 ppm	Tl-208	(Bi-214) ppm	
60	00-05	4,77	233 ±41	9,8	10,7	0,92	3,7	0,20
61	05-10	7,17	438±52	11,4	11,5	0,99	4,7	0,14
62	10-15	2,99	204±52	11,1	11,7	0,94	4,0	0,10
63	15-20	2,69	188±55	12,1	13,4	0,90	4,3	0,13
64	20-25	2,29	143±48	12,1	12,7	0,95	4,0	0,13
65	25-30	0,53	34±26	11,9	12,3	0,96	4,0	0,12
66	30-35	0,69	47±26	11,9	11,3	1,05	4,0	0,10
67	35-40	1,31	85±47	10,3	12,0	0,86	4,0	0,09
68	40-45	nd	-	12,1	12,3	0,98	3,6	0,08
69	45-50	0,26	15±14	12,7	13,2	0,96	3,7	0,16
	00-50		1388±127	11,5	12,1	0,95	4,0	0,13
80	00-05	7,16	384±40	11,9	12,6	0,94	4,8	1,43
81	05-10	3,45	233±40	12,0	13,0	0,92	4,3	0,83
82	10-15	1,51	116±55	14,6	14,5	1,01	4,9	1,17
83	15-20	1,80	129±50	15,4	14,2	1,08	5,6	1,14
84	20-25	0,95	68±36	14,3	13,5	1,06	5,3	1,28
85	25-30	1,76	124±54	16,1	15,0	1,07	6,1	0,97
86	30-35	nd	-	15,6	15,0	1,04	5,9	1,38
87	35-40	0,98	74±44	16,2	15,8	1,03	5,8	1,64
88	40-45	nd	-	18,1	16,1	1,12	5,7	1,36
89	45-50	1,47	110±37	16,9	16,9	1,00	6,0	1,81
	00-50		1239±127	13,7	14,7	0,93	5,4	1,30
120	00-05	6,84	345±36	18,7	19,4	0,96	5,2	1,70
121	05-10	7,01	421-50	19,7	19,5	1,01	5,3	1,40
122	10-15	1,84	111±43	21,7	19,5	1,11	5,5	1,77
123	15-20	1,24	81±31	21,9	20,0	1,10	5,4	1,49
124	20-25	1,73	111±45	20,7	20,6	1,00	5,5	1,58
125	25-30	1,37	94±38	20,8	19,1	1,09	5,3	1,65
126	30-35	nd	-	20,4	19,2	1,06	5,3	1,76
127	35-40	1,05	66±28	19,0	18,2	1,04	5,0	1,66
128	40-45	nd	-	20,0	18,7	1,07	5,0	1,68
129	45-50	nd	-	19,7	18,7	1,05	4,8	1,57
	00-50		1228±104	20,3	19,3	1,05	5,2	1,63
130	00-05	2,20	90±23	6,3	6,1	1,03	1,2	3,64
131	05-10	1,54	71±24	6,8	7,0	0,97	1,4	3,53
132	10-15	1,75	78±23	6,7	6,6	1,02	1,3	3,84
133	15-20	0,64	32±21	6,7	6,7	1,00	1,3	3,70
134	20-25	0,64	32±20	6,7	7,1	0,94	1,4	3,71
135	25-30	1,23	60±20	7,1	7,2	0,99	1,4	3,35
136	30-35	0,59	30±20	7,1	6,8	1,04	1,3	3,70
137	35-40	0,88	45±20	6,5	6,8	0,96	1,3	3,31
138	40-45	0,47	26±18	6,7	6,3	1,06	1,4	3,58
139	45-50	0,65	37±20	7,2	6,7	1,07	1,4	3,24
	00-50		501±67	6,8	6,7	1,01	1,3	3,56
140	00-05	3,30	144±35	21,2	17,9	1,18	5,3	1,41
141	05-10	1,54	75±41	20,6	19,4	1,06	6,1	1,46
142	10-15	1,23	78±53	21,2	18,6	1,14	6,2	1,35
143	15-20	1,08	72±31	20,5	20,1	1,02	5,8	1,58
144	20-25	nd	-	20,9	21,2	0,99	6,0	1,44
145	25-30	nd	-	22,3	21,6	1,03	6,1	1,47
146	30-35	0,75	47±38	22,6	22,1	1,02	6,2	1,49
147	35-40	0,74	52±44	22,1	21,5	1,03	6,1	1,36
148	40-45	1,44	88±32	22,5	21,7	1,04	5,2	1,41
149	45-50	0,78	49±29	21,1	20,8	1,01	4,9	1,70
	00-50		606±109	21,5	20,5	1,05	5,8	1,44

continuação da Tabela 3

AMOSTRA	PROFUNDIDADE (cm)	Cs-137 (BqKg ⁻¹)	Cs-137 (Bqm ⁻²)	Eq Th-232		Ac-228 Ti-208	Eq U-238 (Bi-214)	K (K-40) (%)
				Ac-228 ppm	Ti-208 ppm			
150	00-05	7,02	306±38	13,9	12,5	1,11	3,3	1,68
151	05-10	4,48	243±41	13,3	13,5	0,99	3,4	1,14
152	10-15	1,32	70±33	15,4	12,3	1,25	3,6	1,10
153	15-20	2,57	139±36	13,7	12,6	1,09	3,5	1,28
154	20-25	0,99	54±29	15,1	13,7	1,10	4,0	1,61
155	25-30	nd	-	15,4	15,1	1,02	3,5	1,32
156	30-35	1,14	62±26	14,4	13,8	1,04	3,6	1,38
157	35-40	0,75	39±26	13,3	13,3	1,00	3,5	1,28
158	40-45	nd	-	14,1	12,4	1,14	3,5	1,39
159	45-50	nd	-	15,5	13,2	1,17	3,2	1,49
	00-50		913±88	14,4	13,2	1,09	3,5	1,37

nd = Valor não determinado. Desvios maiores do que 95%

TABELA 4 - PERCENTAGEM DO TOTAL DA CONCENTRAÇÃO DE Cs-137 POR UNIDADE DE ÁREA DENTRO DE CADA INTERVALO DE PROFUNDIDADE

INTERVALO DE PROFUNDIDADE (cm)	PERCENTAGEM DO TOTAL DA ATIVIDADE DE Cs-137 POR UNIDADE DE ÁREA (%)					
	AMOSTRAS					
	60-69	80-89	120-129	130-139	140-149	150-159
00-05	17	31	28	18	24	33
05-10	32	19	34	14	12	27
10-15	15	9	9	16	13	8
15-20	14	10	7	6	12	15
20-25	10	6	9	6	nd	6
00-25	88	75	87	60	61	89
25-50	12	25	13	40	39	11

nd = Valor não determinado. Desvios maiores do que 95%

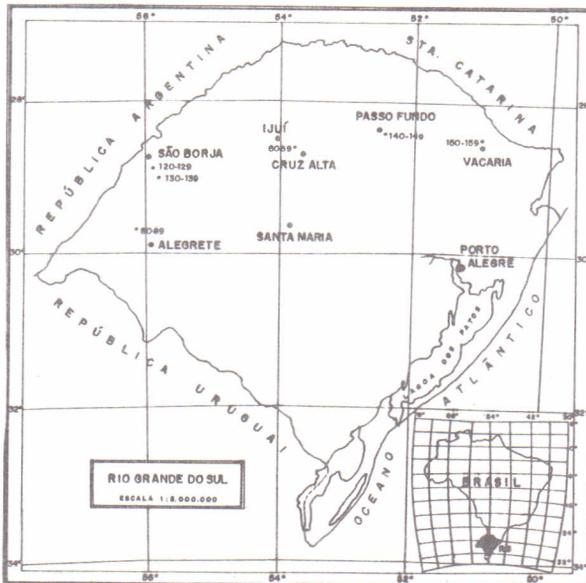


FIGURA 1 - Locais de coletas dos perfis de solos indicados na Tabela 1.

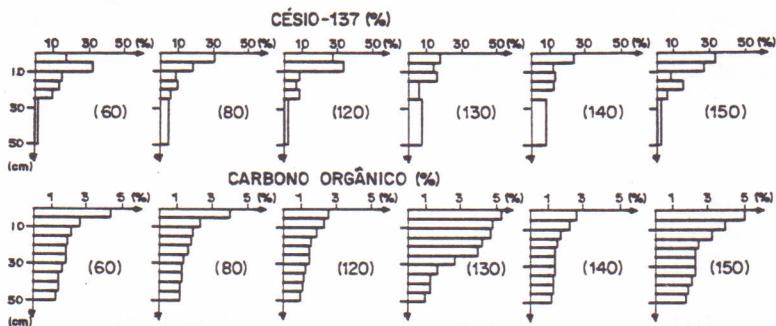


FIGURA 2 - Percentagem do total da concentração de Cs-137 por unidade de área e teor de carbono orgânico dentro de cada intervalo de profundidade, nos diversos perfis de solo cujas amostras mais superficiais estão indicadas entre parênteses.