



Distribuição das Concentrações de Atividade de ^{238}U e ^{232}Th em Amostras de Solo do Estado de Minas Gerais

C. M. Peixoto ^a; P. R. M. Fernandes ^b; P. C. H. Rodrigues ^c, C. A. Carvalho. Filho ^d
V. M. D. Feliciano ^e

^{a, c, d, e} *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) / Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)*

Av. Presidente Antônio Carlos, 6.627

Campus da UFMG – Pampulha, 30161-970, Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil

^b *Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) – Governo do Estado de Minas Gerais*

Cidade Administrativa do Estado de Minas Gerais Rodovia Prefeito Américo Gianetti, s/n – Serra Verde

Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil

^a cmp@cdtn.br; ^b Patricia.fernandes@meioambiente.mg.gov.br; ^c pchr@cdtn.br; ^d cacf@cdtn.br; ^e vmfj@cdtn.br

ABSTRACT

Soil contamination by radionuclides, heavy metal, pesticides, among others, threatens ecosystems and human health. Environmental monitoring bodies and agencies need reference values for these contaminants in order to assess the impacts of anthropogenic activities on soil contamination. Quality Reference Values (QRVs) reflect the natural concentrations of contaminants in soils without anthropic interference and must be regionally established. The aim of this study was the determination of natural concentrations and quality reference values for U and Th in soils from Minas Gerais State, Brazil. A large variation of the natural activity concentration of these radionuclides in soil was observed. The QRV for U was 86.5 Bq kg⁻¹ and 90.81 Bq kg⁻¹ for Th. Statistical analysis showed that the two elements have a positive correlation with the clay and organic matter content in soil, and with the soil orders Ultisol and Inceptisol. Uranium shows a strong correlation with As, Sb, Se and Hg, while Thorium does not show correlation with any of the trace elements.

Keywords: QRV, soil, radionuclides

1. INTRODUÇÃO

A crosta terrestre contém radionuclídeos que constituem a maior fonte de material radioativo de ocorrência natural (NORM – *Naturally Occurring Radioactive Materials*) no meio ambiente. A maioria desses radionuclídeos pertence às cadeias de decaimento que se iniciam com o ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th .

Os principais isótopos do urânio natural são o ^{234}U , ^{235}U e o ^{238}U , cujas proporções em massa são 0,0056%; 0,7205% e 99,274%, respectivamente. O urânio natural pode ser encontrado, principalmente, nos seguintes minerais: uraninita, euxenita, carnotita, branerita, torbenita e a cofinita, sendo o primeiro o mais importante. Em geral, o urânio se encontra naturalmente em baixas concentrações em rochas, no solo e mesmo nos sistemas aquáticos. No seu estado de oxidação +4 é extremamente imóvel. Por outro lado, o urânio no estado de oxidação +6 apresenta uma mobilidade alta e se dissolve rapidamente em meios fluídos oxidados, tais como as águas meteóricas.

O tório natural surge associado, principalmente, a terras raras e ao urânio – sendo as suas maiores fontes os seguintes minerais: monazita, torianita e torita. Na natureza, 100% do tório natural é constituído pelo ^{232}Th , ocorrendo nos estados de oxidação +2, +3 e +4. O tório tem relativa imobilidade durante o intemperismo, concentrando-se nos solos residuais (por exemplo, nas lateritas) de climas tropicais. Em se tratando do comportamento geoquímico desses elementos, a diferença mais relevante entre o tório e o urânio é que o primeiro apresenta uma mobilidade muito menor em condições oxidantes. A distribuição de U e Th na litosfera é fortemente controlada pelos estados de oxidação e pelo sistema Eh-pH (GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2012).

Algumas práticas industriais envolvendo recursos naturais concentram esses radionuclídeos em níveis que podem gerar riscos ao ser humano e ao ambiente circundante. Dependendo das características geológicas do minério original e do método de processamento, parte dos resíduos gerados por estas empresas pode conter elevadas concentrações de NORM.

O imenso volume de resíduos NORM produzido anualmente pelas indústrias de mineração/processamento/extração do mundo vem merecendo a atenção das agências ambientais nacionais e internacionais, bem como de outros órgãos regulatórios. Frequentemente, os resíduos contendo NORM são estocados a céu aberto nas instalações que os produzem, uma vez que até o presente momento nenhuma decisão foi tomada sobre como dispô-los ou quando liberá-los no meio ambiente.

A existência de uma área contaminada pode gerar danos à saúde humana, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, restrições ao uso do solo e danos ao patrimônio público e privado, com a desvalorização das propriedades, além de danos ao meio ambiente (CETESB, 2001). No caso da contaminação do solo com radionuclídeos das séries naturais, esse problema pode ser ainda mais sério, uma vez que muitos deles possuem uma meia-vida longa, além de serem, na sua maioria, elementos carcinogênicos (PERES, 2007).

De forma a agilizar os processos de decisão no gerenciamento de áreas contaminadas, estabelecendo prioridades e reduzindo custos, os órgãos ambientais de vários países e do Brasil têm optado por estabelecer valores orientadores de qualidade dos solos (VQR). Esses, por sua vez, são definidos como sendo a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo como limpo ou a qualidade natural da água subterrânea (CETESB, 2001).

A extração e o processamento de bens minerais são atividades importantes para a economia do Estado de Minas Gerais. Entre os principais bens minerais produzidos estão a rocha fosfática, nióbio, terras raras e bauxita e, em destaque, o minério de ferro. A mineração, o beneficiamento e o processamento destes minérios contribuem para a geração de grandes quantidades de resíduos contendo NORM. Evidentemente, a deposição imprópria desses materiais pode provocar situações que resultam em eventos de contaminação do solo e águas subterrâneas e exposições desnecessárias à população em geral. Assim, estudos que contribuam para o estabelecimento de critérios e valores orientadores para a prevenção e controle da presença de substâncias químicas potencialmente tóxicas em solos e águas subterrâneas são de fundamental importância para o gerenciamento das áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais.

O objetivo do presente trabalho foi determinar os teores naturais dos elementos U e Th presentes em solos do Estado de Minas Gerais e correlacioná-los com outros parâmetros, tais como os teores de matéria orgânica do solo, composição granulométrica (teores de areia, silte e argila), principais classes de solos, além da concentração de elementos traço presentes nas amostras de solo. A partir dos teores medidos foram estimados os valores orientadores de qualidade dos solos (VQR's) para esses elementos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Definição da Área de Estudo

Localizado na região Sudeste do Brasil, o Estado de Minas Gerais é o quarto estado em extensão territorial, ocupando uma superfície de 588.384 km², correspondendo a 7% do território brasileiro e representando a terceira economia do país. As principais atividades são a agropecuária, as indústrias de transformação, principalmente a metalurgia básica e as indústrias de extração, destacando-se o ferro e o ouro, dentre outros (SILVA *et al.*, 2005).

A história e as tradições do Estado de Minas Gerais estão fortemente ligadas à atividade mineradora e às suas enormes reservas minerais. Minas Gerais extrai mais de 160 milhões de toneladas de minério de ferro por ano e responde por 29% de toda a produção mineral do país, por 53% da produção de minerais metálicos e por cerca de 50% de todo o ouro produzido no Brasil (CODEMIG,2016).

A área de estudo compreende, portanto, todo o território mineiro, o qual é provido de características peculiares relacionadas à litologia, gênese e morfologia dos solos, as quais têm influência preponderante na pedogeoquímica dos elementos traço, metais e radionuclídeos.

Cerca de 70% dos solos do Estado são muito intemperizados, como os Latossolos, os Argissolos e os Nitossolos, além daqueles cujo intemperismo é limitado pelo material de origem como Neossolos Quartzarênicos. Aproximadamente 17% dos solos restantes pertencem à classe dos Cambissolos, que muitas das vezes apresentam mineralogia Latossólica. Predominam nesses solos argilas de baixa reatividade, como por exemplo, a caulinita associada com óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (METRI *et al.*, 2008).

O urânio e o tório estão presentes em diferentes tipos de ambientes geológicos. Dentre as principais ocorrências de urânio e tório no Estado de Minas Gerais, destacam-se as situadas em (Pires, 2013): metassedimentos - Quadrilátero Ferrífero - Província Oriental; rochas alcalinas e carbonatitos - Poços de Caldas, Araxá e Complexos Sieníticos do sul de Minas Gerais (Matola – Distrito de Nazareno). Na Figura 1 é mostrada a localização dessas regiões.

Coleta das Amostras de Solo

As amostras de solo foram coletadas aleatoriamente, dentro da unidade pedológica de mapeamento, observando-se o predomínio de vegetação preservada ou minimamente impactada como, por

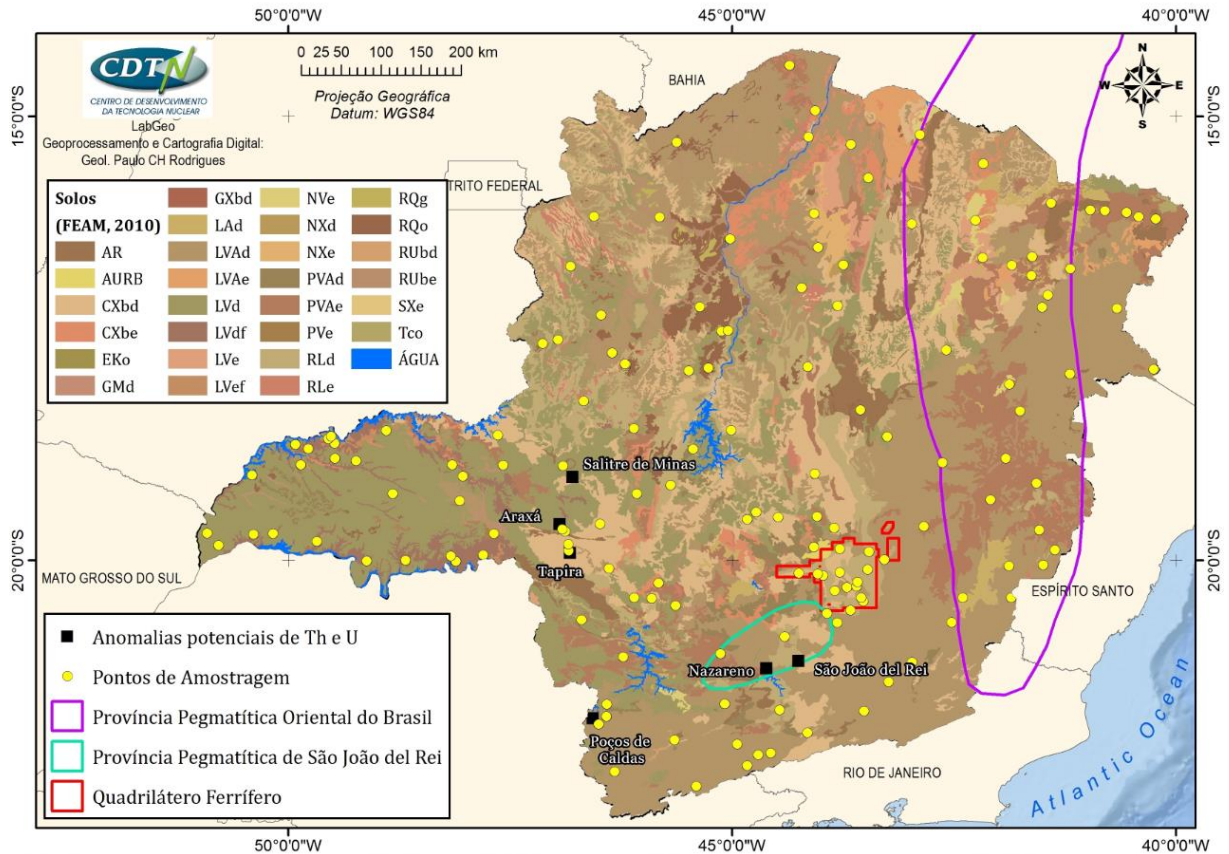
exemplo, pastagem nativa. Outros critérios foram utilizados para confirmar a unidade de mapeamento, tais como observação dos perfis de solos em cortes de estradas, erosões, voçorocas, além de interpretação geomorfológica e vegetacional. As amostras foram retiradas na profundidade de 0 a 20 cm, porção equivalente ao horizonte A.

Cuidados foram tomados para se evitar possíveis contaminações cruzadas, principalmente, com material particulado (por exemplo, poeira).

A partir da sobreposição das informações existentes das classes de solos e da geologia de cada região e tentando obter uma maior abrangência e representatividade dentro das limitações analíticas, foram selecionadas 153 amostras para análise de U e Th, sendo que em 10 das amostras selecionadas foram feitas triplicatas de modo a avaliar a reprodutibilidade do método de preparo e análise desses elementos. Os pontos selecionados para análise dos elementos de interesse se apresentaram bem distribuídos espacialmente por todo o Estado de Minas Gerais, conforme pode ser observado na Figura 1.

Análise da Concentração de Atividade de U e Th

Os teores de U e Th presente nas 153 amostras de solo foram determinados por meio da técnica de espectrometria de massa por plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Todas as análises foram realizadas no Laboratório SG GEOSOL, sendo empregado o método separação por fusão com metaborato de lítio (HALL & PELCHAT, 2007). Esse, por sua vez, é uma dos métodos mais utilizados para a determinação de elementos traço em solo, em função das vantagens inerentes a esta técnica, tais como a capacidade multielementar e os baixos limites de detecção obtidos (PICOLOTO, 2011). Os limites de detecção do método para o U e o Th foram iguais a $1,23 \text{ Bq kg}^{-1}$ e $0,41 \text{ Bq kg}^{-1}$, respectivamente.

Figura 1: Distribuição dos pontos de coleta das amostras de solo.

AR: Afloramento rochoso; CH: Cambissolo Húmico; CX: Cambissolo Háplico; CY: Cambissolo Flúvico; FT: Plintossolo Pétrico; GM: Gleissolo Melânico; GX: Gleissolo Háplico; LA: Latossolo Amarelo; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho; NV: Nitossolo Vermelho; NX: Nitossolo Háplico; PV: Argissolo Vermelho; PVA: Argissolo Vermelho Amarelo; RL: Neossolo Litólico; RQ: Neossolo Quartzarênico; RY: Neossolo Flúvico; SX; Planossolo Háplico; TC: Luvissoilo Crômico.

Conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho envolveu ainda o estudo de correlação dos resultados de concentração dos radionuclídeos de interesse com os valores de concentração de elementos traço (Ag, Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, V, Zn, Sb, Hg, Se e Sr) obtidos pelo Projeto Solos de Minas (FEAM, 2011), cujas principais metas são: 1) estabelecimento do Plano Estadual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, 2) elaboração do cadastro das áreas contaminadas e 3) estabelecimento de uma Lista de Valores de Referência de Qualidade do Solo pertinentes à presença de substâncias químicas nos diferentes tipos de solos do Estado de Minas Gerais.

Os resultados de urânio e tório obtidos em $\mu\text{g g}^{-1}$ foram convertidos em atividade Bq kg^{-1} por meio do cálculo da atividade específica do U_{nat} ($^{238}\text{U} + ^{234}\text{U}$) e Th_{nat} . Os fatores de conversão utilizados foram: $24,4\text{mg Bq}^{-1}$ para o U_{nat} e $4,1\text{ mg Bq}^{-1}$ para o Th_{nat} .

O VRQ de cada substância foi estabelecido com base no percentil 75 do universo amostral. O referido VRQ foi determinado utilizando tratamento estatístico aplicável e em conformidade com a concepção do plano de amostragem e com o conjunto amostral obtido (CONAMA,2009). O software MINITAB 16 foi utilizado para as análises estatísticas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados, respectivamente, os resultados da concentração de atividade de U e Th, utilizando-se um interpolador IDW – Inverso Ponderado da Distância. O IDW é um método puramente matemático, segundo Miranda (2005), esse método estima um valor para um determinado local não amostrado como uma média dos valores dos dados dentro de uma vizinhança. Desta forma, a variação nos níveis de concentração de atividade obtidos pode ser visualizada a partir de sua distribuição espacial.

Como pode ser observado existe uma grande variação nas concentrações encontradas de U e Th no Estado de Minas Gerais, a princípio, em uma observação espacial, existe uma correlação forte (segundo a classificação sugerida por Evans (1996)), entre os teores de concentração de atividade encontrados para os dois elementos (*Pearson correlation* = 0,685, *P-Value* = 0,000).

Os valores elevados de concentração de atividade, tanto para o U quanto para o Th, foram encontrados nos solos das regiões geologicamente favoráveis a ocorrências significativas desses elementos, como por exemplo: as províncias pegmatíticas no nordeste do Estado, as províncias magmáticas alcalinas de Poços de Caldas e intrusivas alcalinas e básicas de Tapira, Araxá e Salitre. As concentrações elevadas em U e Th nos pegmatitos da Província Oriental e nas intrusivas alcalinas (Poços de Caldas, Araxá etc), podem ser explicadas por se tratarem de elementos quimicamente similares em temperaturas elevadas e, por isso, ocorrem juntos em rochas ígneas ácidas e depósitos hidrotermais (ULBRICH et al., 2009), como as encontradas nestas regiões.

O valor da mediana da concentração de atividade de U foi de $57,3\text{ Bq kg}^{-1}$ (3,7 a $675,6\text{ Bq kg}^{-1}$) e de $60,7\text{ Bq kg}^{-1}$ (2,9 a $606,0\text{ Bq kg}^{-1}$) para o Th, incluindo os outliers. Esses valores se mostraram superiores aos obtidos por Fausto *et al.*, (1995), os quais mediram a concentração de atividade de radionuclídeos em solos não adubados da região de Itu, SP e obtiveram valores médios da ordem de

20 Bq kg⁻¹ para o ²³⁸U e de 52 Bq kg⁻¹ para o ²³²Th. Além disso, eles se mostraram superiores aos valores de concentração de atividade da mediana mundial de ²³²Th (30 Bq kg⁻¹) e ²³⁸U (35 Bq kg⁻¹) observados em solos (UNSCEAR, 2000) salientado, portanto, a importâncias das características geológicas de cada região do Estado de Minas Gerais.

Figura 2: Concentração de atividade de U em Bq kg⁻¹ (IDW – Inverso Ponderado da Distância).

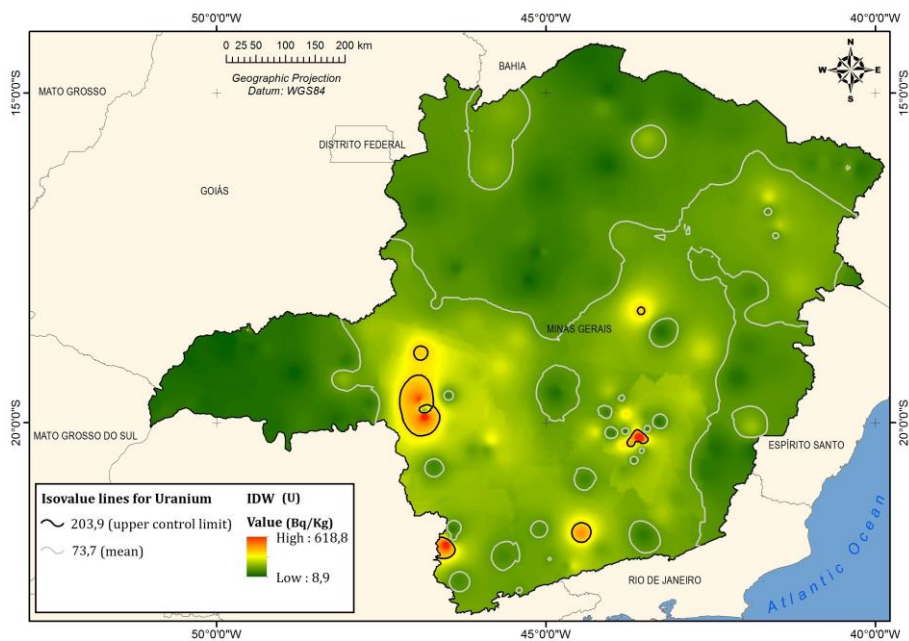
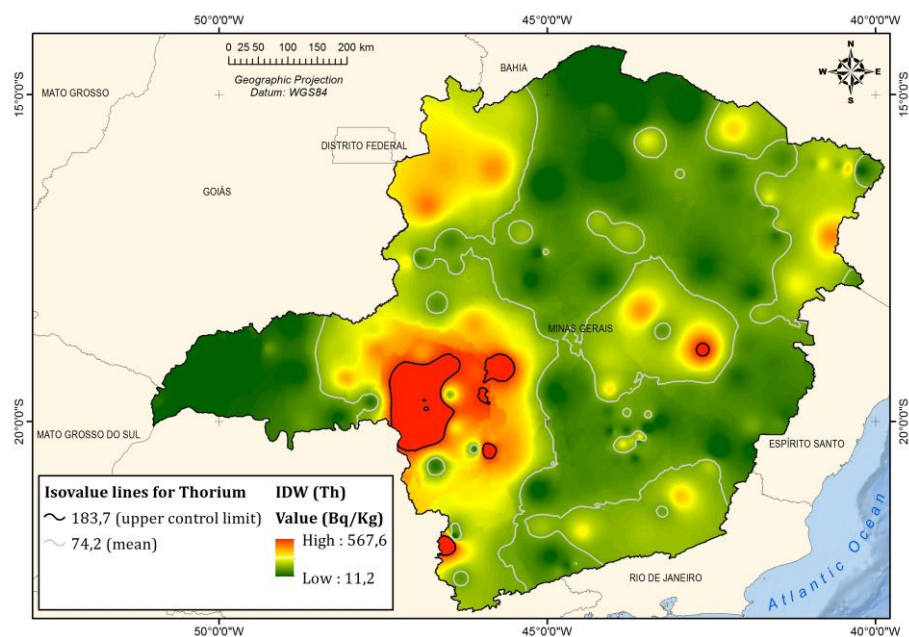


Figura 3: Concentração de atividade de Th em Bq kg⁻¹ (IDW – Inverso Ponderado da Distância).



Com base no tratamento estatístico dos dois conjuntos de resultados de concentração de atividade foram determinados os valores de referência de qualidade de solo (VRQ) para U e Th em solos no

Estado de Minas Gerais, os quais foram respectivamente iguais a $86,5 \text{ Bq kg}^{-1}$ e $90,81 \text{ Bq kg}^{-1}$. Para tanto, foi utilizado o terceiro quartil por representar 75% dos valores obtidos (CETESB, 2001).

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os gráfico *Loading Plot* representando a síntese da correlação entre as concentrações de U e Th com composição granulométrica (teores de silte (SILTE), argila (ARG), areia fina (AF) e areia grossa (AG)) e conteúdo de matéria orgânica (MO) de cada amostra de solo analisada.

Figura 4: Gráfico de *Loading Plot* da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade de U, composição granulométrica e conteúdo de matéria orgânica.

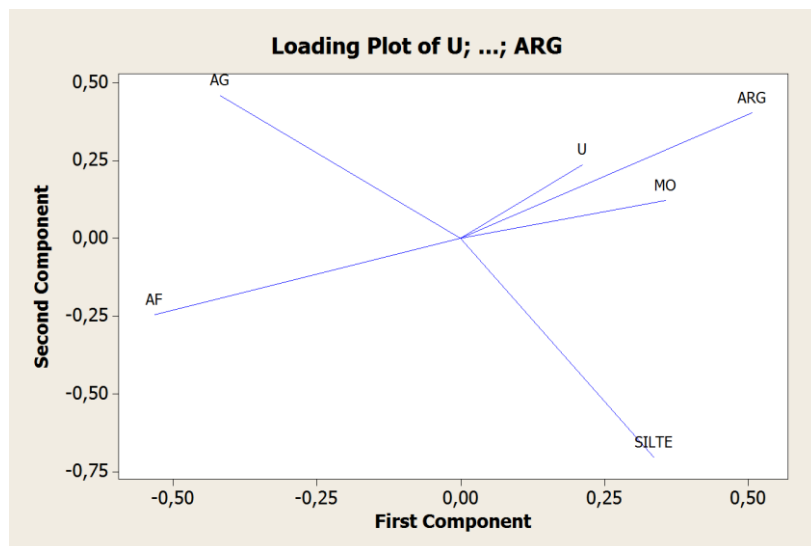
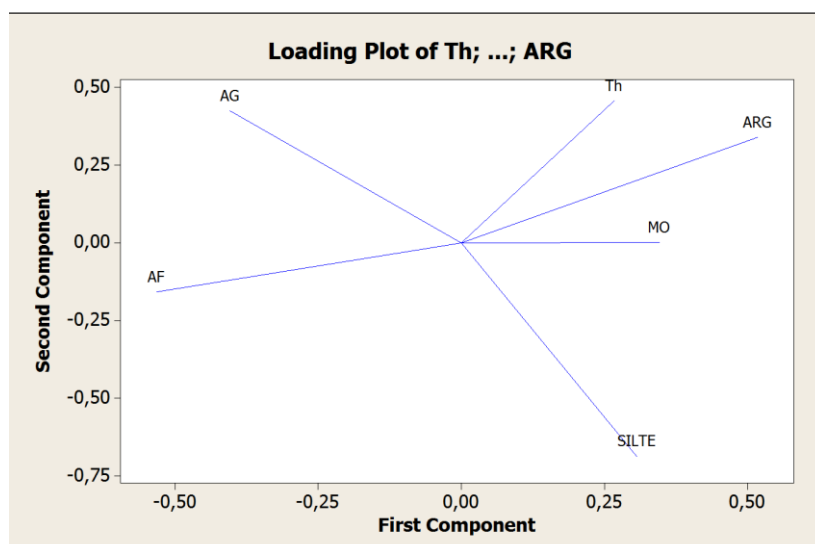


Figura 5: Gráfico de *Loading Plot* da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade de Th, composição granulométrica e conteúdo de matéria orgânica.



Conforme pode ser verificado na Figura 4, as concentrações de atividade para U aparecem do lado positivo da primeira componente principal junto com os dados de teor de argila e matéria orgânica. Na Figura 5 é possível observar que as concentrações de atividade para Th também aparecem do lado positivo da primeira componente principal junto com o teor de argila.

Os resultados sugerem que existe uma maior correlação entre as concentrações de U e Th com os solos que contêm maiores teores de argila e matéria orgânica. Megumi, K; Mamuro, T (1977) estudando partículas de solo menores que 0,15 mm observaram que as concentrações de U e Th aumentam à medida que a dimensão da partícula de solo diminuí. De acordo com dados da literatura, o urânio e o tório tendem a formar fortes associações com matéria orgânica, formando complexos fortes com fosfatos dissolvidos (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY - BGS, 1991), Além disso, este comportamento pode ser explicado pelo fato dos cátions radioativos se fixarem preferencialmente, em minerais de argila (REBELLO, 2000; BECEGATO, 2005; BECEGATO; FERREIRA, 2005), o que corrobora com os resultados obtidos no presente trabalho.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados da Análise de Componentes Principais, os quais foram utilizados para avaliar a correlação entre as concentrações de U e Th e as classes de solo. As classes de solos foram determinadas a partir do Mapa de Solos de Minas, na escala de 1:600000 (UFV *et al.*, 2010).

Tabela 1: Análise de Componentes Principais – U e a classe solo de cada amostra.

Análise de Componentes Principais					
<i>Eigenvalue</i>	1,7399	1,1520	1,1279	0,9080	0,0721
<i>Proportion</i>	0,348	0,230	0,226	0,182	0,014
<i>Cumulative</i>	0,348	0,578	0,804	0,986	1,000
Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	
U	0,251	-0,310	-0,271	0,876	
Classe Argisolo	0,308	0,820	0,060	0,217	
Classe Cambisolo	0,304	0,154	0,770	-0,383	
Classe Latosolo	-0,732	0,105	-0,025	0,159	
Classe Neosolo	0,462	-0,443	0,574	-0,116	

Tabela 2: Análise de Componentes Principais –Th e a classe de solo de cada amostra.

Análise de Componentes Principais					
<i>Eigenvalue</i>	1,7097	1,2169	1,1379	0,8634	0,0721
<i>Proportion</i>	0,342	0,248	0,228	0,173	0,014
<i>Cumulative</i>	0,342	0,585	0,813	0,986	1,000
Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	
Th	0,165	0,563	0,077	-0,806	
Classe Argissolo	0,325	0,264	-0,777	-0,197	
Classe Cambissolo	0,324	0,681	-0,022	0,534	
Classe Latossolo	-0,746	0,073	0,047	-0,105	
Classe Neossolo	0,454	-0,382	0,622	-0,120	

Conforme pode ser verificado na Tabela 1, com base na primeira Componente Principal – PC1, existe uma correlação entre as concentrações de atividade de U (34,8% - porcentagem de variação explicada) e de Th (34,2 % - porcentagem de variação explicada) com as seguintes classes de solo: Argissolo, Cambissolo e Neossolo.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os dendogramas da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade de U e Th, respectivamente e as classes de solos das amostras.

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os gráficos de Loading Plot, os quais fornecem uma síntese das correlações existentes entre os teores de U e Th e as concentrações de elementos traço (Ag, Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, V, Zn, Sb, Hg, Se e Sr) presentes nas amostras de solo.

Figura 6: Dendrograma da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade e classes de solos.

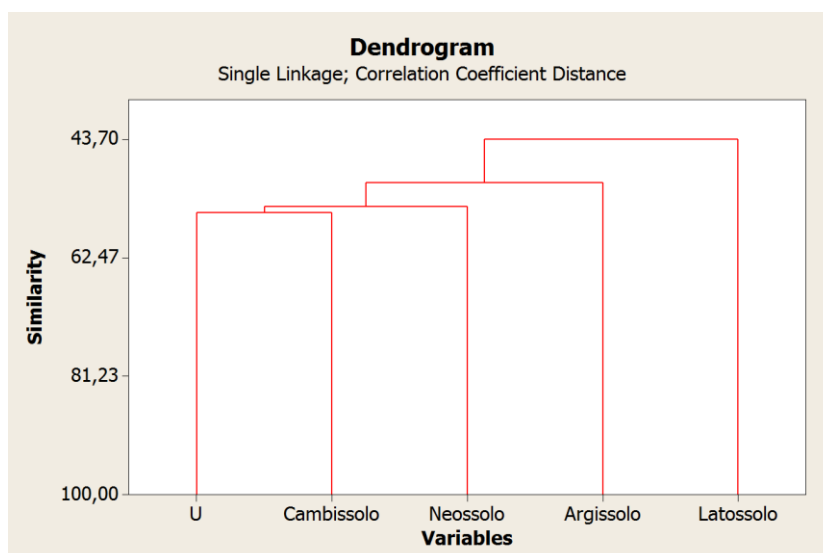
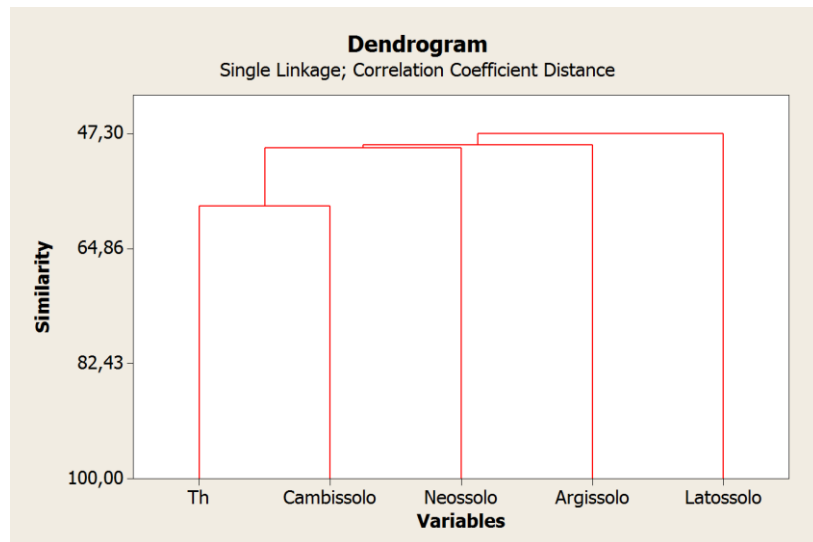


Figura 7: Dendrograma da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade de Th e classes de solos.



Os dendogramas apresentados nas Figuras 6 e 7 demonstraram que existe uma maior afinidade entre as concentrações de U e de Th com o Cambissolo, os quais são solos pouco desenvolvidos, que ainda apresentam características do material originário (rocha) evidenciado pela presença de minerais primários. (EMBRAPA, 2006).

Figura 8: Gráficos de *Loading Plot* da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade de U e elementos traço.

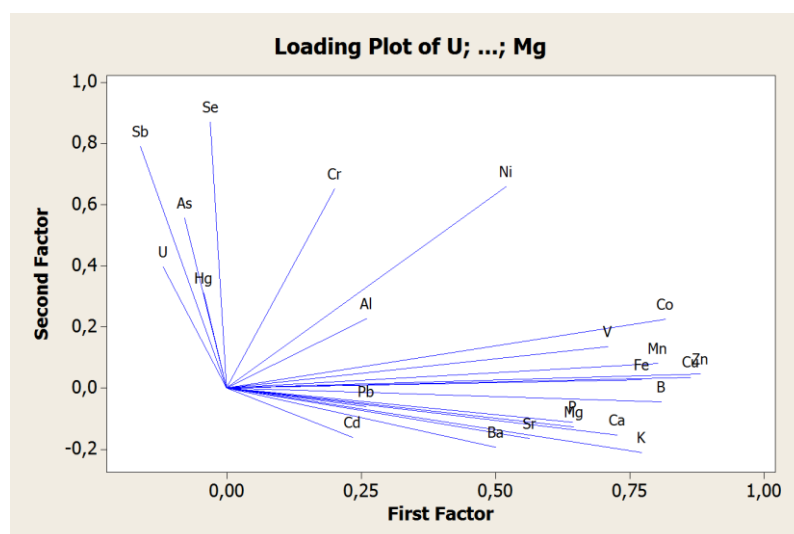
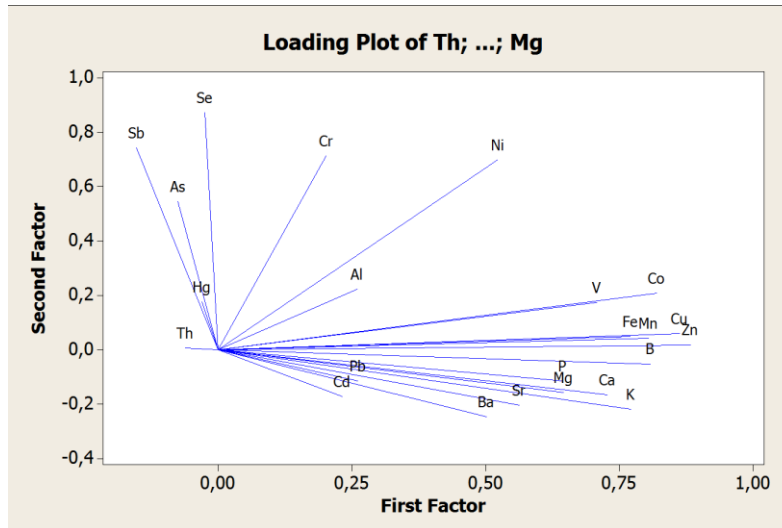


Figura 9: Gráficos de *Loading Plot* da Análise Multivariada para os valores de concentração de atividade de Th e elementos traço.



Conforme pode ser verificado nas Figuras 8 e 9, o U apresenta maior correlação com o As, Sb, Se e Hg. Vale destacar que o arsênio forma associações naturais com o urânio em alguns depósitos de urânio, assim como com o antimônio e o mercúrio, os quais apresentam um comportamento geoquímico muito semelhante, ou seja, maior mobilidade em ambientes oxidantes e menor mobilidade em ambientes redutores. Além disso, os elementos Hg, As e Mn são categorizados por Alloway (1990) e Kabata-Pendias (2011) como elementos com íntima relação entre o teor no solo e o teor no material parental.

De acordo com a classificação de Goldschmidt (1937) os elementos As, Sb, Se e Hg são calcófilos, isto é, apresentam grande afinidade geoquímica com fases sulfetadas. A correlação do U com esses elementos sugere que nos solos de MG, esse elemento ocorre predominantemente associado às assembléias de minerais sulfetados. O que de fato se constata, principalmente: no minério uranífero sulfetado de Poços de Caldas, nos conglomerados piritosos da Serra das Gaivotas e do Gandarela, e nos calcários localmente enriquecidos em pirita e calcopirita do Grupo Bambuí,

O Th, por sua vez, não apresenta nenhuma correlação significativa com os elementos traço. Alguns autores sugerem que o conteúdo total de qualquer elemento no material de origem reflete no seu conteúdo no solo (SILLANPAA, 1972; KABATAPENDIAS & PENDIAS, 1985; ALLOWAY, 1990). Durante o avanço da pedogênese, o Th, por apresentar baixa mobilidade, pode ser adsorvido pelos argilominerais, óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Ti, principalmente na fração argila (DICKSON & SCOTT, 1997). Portanto, a não correlação do Th com os outros elementos pode ser

explicada pelo fato de ser bem conhecido como um elemento altamente insolúvel e de baixa mobilidade, além da sua especificidade de ocorrência geológica.

4. CONCLUSÕES

As concentrações de atividade de U e Th em amostras de solo do Estado de Minas Gerais variaram de 3,7 a 675,6 Bq kg⁻¹ (valor mediano igual a 57,3 Bq kg⁻¹) e de 2,9 a 606,0 Bq kg⁻¹ (valor mediano igual a 60,7 Bq kg⁻¹), respectivamente. A longa faixa de concentrações observada confirmou a grande diversidade e heterogeneidade entre esses solos. Ressalta-se que os maiores valores de concentração de atividade dos radionuclídeos analisados foram observados nas regiões do Estado de Minas Gerais onde existem anomalias radioativas, como por exemplo: as províncias pegmatíticas no nordeste do Estado, as províncias magmáticas alcalinas de Poços de Caldas e intrusivas alcalinas e básicas de Tapira, Araxá e Salitre e a faixa de migmatitos das regiões de São João Del Rei e Itabirito, bem como as áreas com acumulação de areias detríticas no rio das Mortes em São João Del Rei.

Foi constatada uma correlação significativa entre as concentrações de atividade de Th e de U com os Cambissolos.

Além disto, foi observada a existência de uma correlação positiva da concentração de atividade do U apenas com os elementos As, Sb, Se e Hg. Por outro lado, o Th não apresentou correlação positiva com os elementos analisados (Ag, Al, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Sr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Ba, Cd e Se).

De uma maneira geral, os teores de concentrações de atividade para U e Th presentes nos solos amostrados ocorreram espacialmente de forma similar. Os valores de referência de qualidade de solo (VRQ) determinados para o U e o Th em solos do Estado de Minas Gerais, foram respectivamente iguais a 86,5 Bq kg⁻¹ e 90,81 Bq kg⁻¹.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) de Minas Gerais para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGENCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA – EMBRAPA, 2006. Available at: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_8_2212200611538.html. Last accessed: 25 July, 2016.

ALLOWAY, B.J. (1990) **Heavy metals in soils**. John Wiley and Sons, Inc. New York, ISBN 0470215984.

BECEGATO, V. A. **Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 198p. 2005.

BECEGATO, V. A; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**. vol.23 n.4 São Paulo. 2005.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY - BGS. **Regional geochemistry of the East Grampians area**. Londres: Keyworth, Nottingham, 1991. 95p.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO DE MINAS GERAIS – CODEMIG, 2016. Available at: <http://www.codemig.com.br/mineracao-e-geologia> Last accessed: 25 July, 2016.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB **Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas**. São Paulo, SP, 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução No 420, de 28 de Dezembro de 2009**. Brasília, 2009

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.

EVANS, J. D. **Straightforward statistics for the behavioral sciences**. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing, 1996.

FAUSTO, A. M. F.; ALCALÁ, A. L.; OTSUBO, S. M.; PAES, W. S.; HIODO, F. Y.; YOSHIMURA, E. M.; OKUNO, E. **Espectrometria gama, termoluminescência e ativação**.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – **FEAM, 2011** – Available at: <http://www.feam.br/>. Last accessed: 30 March, 2012.

GEOSCIENCE AUSTRALIA. **Uranium and Thorium Geology**. Available at: <http://www.ga.gov.au/energy/province-sedimentary-basin-geology/uranium-thorium-geology.html>. Last accessed: 14 August, 2012.

GOLDSCHMIDT, V.M. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. **Journal of Chemical Society**, p.655-673, 1937.

HALL, E.M, PELCHAT, J.C. Analysis of Standard Reference Materials for Zr, Nb, Hf and Ta by ICP-MS after Lithium Metaborate Fusion and Cupferron Separation **Geostandards Newsletter** Volume 14, Issue 1, 2007

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Elements of group III. In: KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H (eds.) **Trace elements in soils and plants**. Florida: CRC, 1985. p.127 - 150.

Universidade Federal de Viçosa - UFV; Universidade Federal de Lavras; Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais. **MAPA de Solos do Estado de Minas Gerais**. Mapa col. 1:600.000. Projeção Policônica, 2010.

MEGUMI, K.; MAMURO, T. Concentration of uranium series nuclides in soil particles in relation to their size. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.82, p.353-356, 1977.

METRI, M. C.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; FONTES, M. P. F.; TORRENT, J.; CURI, N. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.3, p. 1017-1031, 2008.

MIRANDA, José Iguelmar. EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2005- 425p.

PERES, A.C. **Modelo para o estabelecimento de Valores Orientadores para Elementos Radioativos no Solo**. 2007. 124p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PIRES, F. R..M. **Urânio no Brasil: geologia, jazidas e ocorrências**. Rio de Janeiro. Eletrobrás Eletronuclear, 2013

PICOLOTO, R. S. **Determinação de elementos traço em solo por ICP-MS após volatilização empregando combustão iniciada por micro-ondas**. 2011. 79p. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

REBELLO AMA de. 2000. **Processos supergênicos na distribuição de radônio em paisagens tropicais úmidas**. Curitiba. 209p. (Tese de Doutorado - Universidade Federal do Paraná).

SILLANPAA, M. Trace elements in soils and agriculture. Rome: FAO / SIDA, 1972. 67p. (**FAO. Soils Bulletin, 17**).

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas Propriedades Físicas de dois Latossolos, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.10, p.91-95, 1986.

ULBRICHT, H.H.G.J.; ULBRICHT, M.N.C.; FERREIRA, F.J.F.; ALVES, L.S.; GUIMARÃES, G.B.; FRUCHTING, A. **Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U**, Geologia USP, Série Científica, v. 9 (1), p. 33-53, 2009.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION - UNSCEAR. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. New York: United Nations, Volume I, Sources, Annex B. Exposures from natural radiation sources. 2000.