

RADIAÇÃO GAMA E RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM SOLO COM APLICAÇÃO DE CARBONATITO E FERTILIZANTES AGRÍCOLAS NO DISTRITO FEDERAL

Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento¹, Francisco José Fonseca Ferreira²,
Leide Rovênia Miranda de Andrade³, José Carlos Gaspar⁴ e Augusto Cesar Bittencourt Pires⁵

Recebido em 9 agosto, 2007 / Aceito em 14 fevereiro, 2008
Received on August 9, 2007 / Accepted on February 14, 2008

ABSTRACT. EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) and Brasília University developed a research project about the viability of carbonatite rock as agricultural fertilizer. As an initial experiment, several mixtures of carbonatite, limestone, phosphorous and potassium compounds were added as fertilizers in an oxisol area (red-latosol, according with Brazilian System of Soil Classification), in Distrito Federal, central Brazil. The experiment area was divided in 56 plots (4 × 7 m) and each plot received a fertilizer mixture. The purpose of this work was to verify if the addition of fertilizer mixture to the soil modified its radiometric and resistivity properties and if it is possible to identify this change. Gamma-ray and electrical resistivity measurements were obtained in an experimental area and in a natural savannah type vegetation area. The results showed that the fertilizer addition modified soil natural properties causing a small increase in K, U, Th levels and decreasing ten times electrical resistivity. A low contrast of radiation was observed between plots, and then it was not possible to differentiate the several treatments in base of gamma-ray measurements. Electrical resistivity was efficient to identify three groups of plots related to mixtures characteristics, respectively with phosphorous, potassium and limestone / carbonatite predominance.

Keywords: gamma-ray spectrometry, cerrado, electrical resistivity.

RESUMO. A Embrapa Cerrados e a Universidade de Brasília desenvolveram um projeto que estudou a viabilidade da aplicação de carbonatito como fertilizante agrícola. Como experimento piloto, utilizaram-se diferentes misturas de carbonatito, calcário, superfosfato triplo (SFT) e cloreto de potássio (KCl) como fertilizantes em uma área de latossolo vermelho, na região central do Distrito Federal. Esta área foi dividida em 56 parcelas medindo 4 × 7 m nas quais foram adicionadas as misturas de fertilizantes. Este trabalho teve por objetivo verificar se a adição das misturas ao solo modificou suas características radiométricas e de resistividade e se é possível identificar esta mudança. Realizaram-se medições da radiação gama e de resistividade elétrica na área do experimento e em uma área de cerrado nativo. Os resultados mostraram que a adição dos fertilizantes ao solo causou uma pequena elevação dos teores de K, U e Th e diminuiu cerca de dez vezes os valores de resistividade elétrica. Observou-se um baixo contraste radiométrico entre as parcelas que compõem o experimento, de modo que não foi possível diferenciar os vários tratamentos com base nas medidas gamaespectrométricas. A resistividade elétrica mostrou-se capaz de individualizar três grupos de parcelas em relação às características das misturas adicionadas, respectivamente com predomínio de SFT, de KCl e da mistura exclusiva de calcário e carbonatito.

Palavras-chave: gamaespectrometria, cerrado, resistividade elétrica.

¹Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília, DF, Brasil. Tel.: (61) 3429-6495; Fax: (61) 3340-4759 – E-mail: carlostadeu@unb.br

²Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Jardim das Américas, Caixa Postal 19045, 81531-980 Curitiba, PR, Brasil. Tel.: (41) 3361-3132; Fax: (41) 3361-3132 – E-mail: francisco.ferreira@ufpr.br

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, BR 020, km 18, 73301-970 Planaltina, DF, Brasil. Tel.: (61) 3388-9951; Fax: (61) 3389-2953 – E-mail: leide@cpac.embrapa.br

⁴Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília, DF, Brasil. Tel.: (61) 3307-2832; Fax: (61) 3347-4062 – E-mail: gasp@unb.br

⁵Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília, DF, Brasil. Tel.: (61) 3340-4759; Fax: (61) 3340-4759 – E-mail: acbp@unb.br

INTRODUÇÃO

A Embrapa Cerrados e a Universidade de Brasília desenvolveram um projeto de pesquisa com o objetivo de avaliar o potencial da rocha carbonatito como uma possível fonte de insumos para a agricultura. O nome "carbonatito", neste experimento, corresponde a uma mistura com 50% de carbonatito e 50% de flogopitito, rochas provenientes da mina Ultrafértil, situada em Catalão, estado de Goiás. A caracterização mineralógica de amostras da mistura indicou a presença de 42,0% de dolomita, 40,1% de calcita, 7,5% de flogopita, 5,0% de magnetita e 5,4% de apatita (Gaspar & Assad, 1999).

Durante o ano de 1999, montou-se um experimento cujo objetivo era avaliar o potencial do carbonatito como fonte de fósforo e potássio. Este experimento foi construído numa área de latossolo vermelho escuro, franco argilo arenoso, situada numa fazenda experimental da Embrapa Cerrados, próxima à cidade de Sobradinho, na região central do Distrito Federal. O experimento consistiu essencialmente da adição de diferentes misturas de carbonatito, calcário, superfosfato triplo e cloreto de potássio ao solo, seguido do cultivo de gramíneas. Em dezembro de 2003 realizaram-se medições da radiação gama e de resistividade elétrica na área do experimento e em uma área de cerrado nativo próxima. O objetivo destas medições foi verificar se a adição dos fertilizantes causou alguma alteração no solo e se essa alteração era detectável por meio de gamaespectrometria e de medidas de resistividade elétrica.

GAMASPECTROMETRIA

Raios gama são uma forma de radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 10^{-14} e 10^{-8} m. Estes raios são emitidos durante o decaimento radioativo de elementos usualmente presentes em todos os solos e rochas, ainda que em quantidades reduzidas. As principais fontes de radiação são o ^{40}K e as séries do ^{238}U e do ^{232}Th . Na crosta terrestre K, U e Th têm abundâncias respectivas de 3%, 3 ppm e 12 ppm. O ^{40}K corresponde a 0,012% do potássio total, o ^{238}U corresponde a 99,3% do urânio total e o ^{232}Th a 100% do tório total (Wilford et al., 1997).

Noventa por cento dos raios gama emanam da camada superficial de solo ou rocha, compreendida entre 0 e 45 cm de profundidade. A intensidade desta radiação, emitida pela superfície, se relaciona com a mineralogia e a química das rochas originais e com o tipo de intemperismo atuante sobre estes materiais. K é um constituinte comum de argilominerais ao passo que U e Th podem ser retidos por óxidos de ferro e também por argilominerais

(Wilford et al., 1997).

A gamaespectrometria mede a concentração de K, U e Th em rochas e solos por meio da detecção e quantificação da radiação gama natural. O ^{40}K emite raios gama quando decai para ^{40}Ar . A energia da radiação emitida é de 1,46 MeV. As medidas das concentrações de Th e U são mais complexas por que o ^{232}Th e o ^{238}U decaem por meio de uma série de núclídeos filhos até alcançarem isótopos de Pb estáveis. A energia da radiação diagnóstica do ^{238}U é 1,76 MeV e associa-se ao núclídeo ^{214}Bi . A energia da radiação diagnóstica do ^{232}Th é de 2,62 MeV e associa-se ao núclídeo ^{208}Tl (Wilford et al., 1997).

Gamaespectrômetros são equipamentos que separam a radiação gama em duas ou mais componentes de energia. O detector, normalmente um cristal de iodeto de sódio ativado por tálio (NaI(Tl)), absorve a radiação gama e a transforma em pulsos luminosos ou cintilações. Estas cintilações são convertidas em sinais elétricos proporcionais à intensidade da luz. Em seguida, as medidas em Volts são separadas em classes, dependendo da magnitude, de modo a se obter um espectro de energia dos raios gama incidentes (Hansen, 1975).

Costuma-se usar o termo "canal" para classes estreitas, às vezes com um único valor, e o termo "janela" para classes relativamente largas. Um processo de calibração permite que a quantidade da radiação com energias de 1,46 MeV, 1,76 MeV e 2,62 MeV, medida em cintilações por segundo (cps), seja expressa em percentagem (caso do K), ou ppm (caso do U e do Th) (Hansen, 1975).

Medidas radiométricas são utilizadas desde 1950, no Brasil, como instrumento de prospecção mineral. Em meados da década de 1970, este tipo de informação começou a ser utilizado como auxílio ao mapeamento geológico. Isto é possível porque os níveis radioativos das rochas podem ser correlacionados com sua composição mineralógica e forma de ocorrência (Vasconcellos et al., 1994).

Mais recentemente, medidas gamaespectrométricas foram utilizadas no estudo de solos tratados com fertilizantes fosfatados, fabricados a partir de rochas com elevada radioatividade natural. Urânio, tório e potássio, os principais responsáveis pela radioatividade das rochas, permanecem no produto do beneficiamento, e são adicionados aos solos agrícolas durante a adubação. Neste contexto, a gamaespectrometria se apresenta como instrumento para avaliar o grau de modificação do solo sujeito a processos continuados de fertilização (Becegato & Ferreira, 2005; Camargo & Silveira, 1998; Souza, 1998).

RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica é uma propriedade física de cada substância, relacionada com a maior ou menor dificuldade de passagem de corrente elétrica através desta substância. A resistividade é expressa em unidade de resistência elétrica multiplicada por unidade de comprimento (Ohm.m) (Koefoed, 1979).

As rochas e os solos, em geral, são bastante resistivos, mas a presença de maiores teores de umidade e maior quantidade de material solubilizado na água intersticial causam diminuição da resistividade elétrica. Desde o final do século XIX, várias tentativas têm sido feitas para determinar a umidade e a salinidade do solo a partir de medidas de resistividade elétrica. Contudo, as correlações matemáticas entre estes parâmetros costumam ter aplicação bastante restrita, em função da grande variabilidade espacial de outros parâmetros do solo, como estrutura, textura, porosidade e condutividade hidráulica, os quais influenciam diretamente o conteúdo de umidade (Edlefsen & Anderson, 1941; Kirkhan & Taylor, 1950; Rhoades & Ingvalson, 1971; Rhoades & Van Schilfgaarde, 1976; Rhoades, 1979; Gardner, 1986; Frohlich & Parke, 1989).

Conforme Fukue et al. (1999), a resistividade do solo depende, no mínimo, dos seguintes fatores: grau de saturação; resistividade do líquido nos poros; porosidade; tamanho, forma e distribuição das partículas sólidas; espessura e composição da camada catiônica dos argilominerais. Curiosamente, a dependência da resistividade em relação a um grande número de fatores pode ser uma vantagem no que diz respeito às ciências do solo. Alguns autores, como McBride et al. (1990), consideram que medidas de condutividade elétrica, e consequentemente de resistividade, podem fornecer uma visão integrada dos parâmetros relacionados com a produtividade agrícola. Ainda no âmbito da produção agrícola, Corwin & Rhoades (1984), por sua vez, defendem que a medição indireta da salinidade do solo, por meio da condutividade elétrica da porção que vai até 90 centímetros é muito importante, uma vez que é nesta porção onde se concentra a atividade das raízes.

No método elétrico de corrente contínua, habitualmente, trabalha-se com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de potencial (M e N), os quatro fixados na superfície do terreno. Através dos eletrodos A e B aplica-se uma diferença de potencial e, como resultado desta diferença, uma corrente elétrica contínua começa a percorrer o terreno. O valor da corrente é medido e registrado. Utilizando os eletrodos M e N, mede-se uma diferença de potencial que se estabelece no terreno e que está associada à passagem da corrente. Deve-se notar que o solo já possui um

potencial elétrico natural, denominado potencial espontâneo, o qual deve ser subtraído da medição feita com os eletrodos M e N (Orellana, 1972; Telford et al., 1985).

Conhecendo-se a corrente que percorre o subsolo, a geometria da disposição dos eletrodos e o potencial medido entre os eletrodos M e N, pode-se calcular um valor de resistividade elétrica, que por estar sendo medida em um meio heterogêneo e anisotrópico, e por ser função do arranjo de eletrodos, é dita aparente. A profundidade de investigação é proporcional ao espaçamento entre eletrodos e às propriedades elétricas locais (Orellana, 1972; Telford et al., 1985).

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região central do Brasil, no Distrito Federal, entre as cidades de Sobradinho e Planaltina e é gerenciada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Trata-se de uma área de pastagem, com relevo plano cuja cobertura vegetal atual compõe-se de pastagem cultivada de gramíneas.

O solo deste local é caracterizado pela cor vermelha escura e pela textura franco argilo arenosa. Sua formação foi controlada pelo processo de latossolização, marcado pela remoção de cálcio, magnésio, sódio e potássio e concentração de ferro e alumínio. A composição mineral do latossolo estudado consiste essencialmente de quartzo, caulinita, gibbsita, goethita e hematita (EMBRAPA, 1978; Cardoso et al., 1998; EMBRAPA, 1999).

No terreno da área de estudo foi demarcado um retângulo medindo 102 m × 26 m. O retângulo foi dividido em 56 parcelas medindo 7 m de comprimento por 4 m de largura e separadas por corredores com 2 m de largura (Fig. 1).

Neste local foram realizados dois experimentos, conduzidos em áreas adjacentes, com o objetivo de avaliar o desempenho do carbonatito como fonte de fósforo (P) e potássio (K) para uma pastagem de *Brachiaria ruziziensis*. Os teores totais destes elementos na rocha eram de 22,0 g de P e de 12,5 g de K por kg de rocha, respectivamente (Andrade et al., 2002).

A eficiência da rocha carbonatito como fonte de P e K foi comparada à de fontes solúveis destes elementos normalmente utilizadas na agricultura, o superfosfato triplo (SFT) e o cloreto de potássio (KCl), com 348,6 g de P e 524,5 g de K por kg do fertilizante, respectivamente. Nas parcelas que não receberam a rocha carbonatito, foi aplicada uma dose correspondente de corretivo de acidez, na forma de calcário dolomítico. Antes do plantio da pastagem, o calcário, as fontes de P e de K e uma fonte mista de elementos menores (Zn, Cu, Mo, Co, B), aplicada em todos os

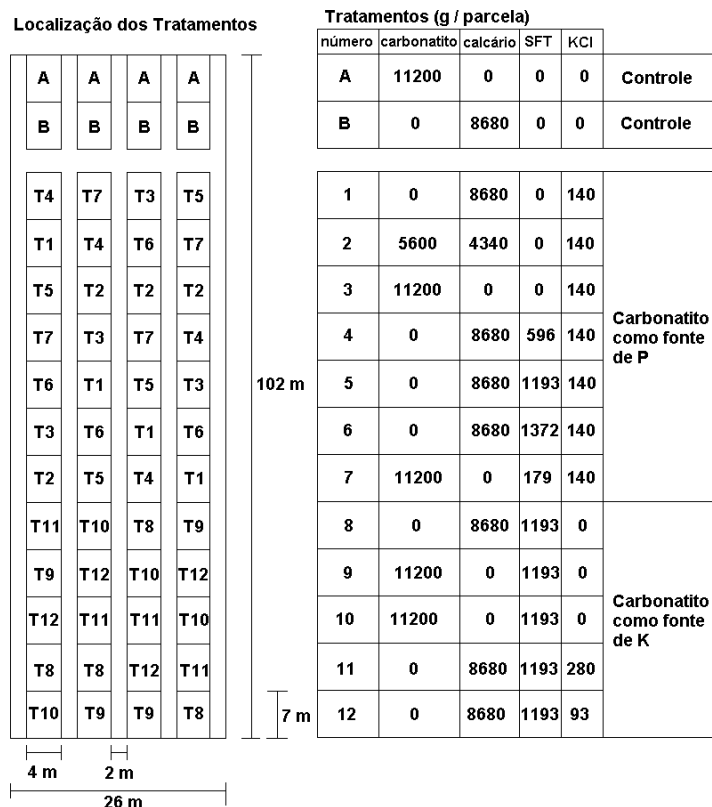


Figura 1 – Distribuição dos tratamentos no local do experimento.

tratamentos, foram distribuídos na superfície das parcelas e incorporados ao solo, com arado de disco, a uma profundidade de aproximadamente 20 cm.

A distribuição espacial dos tratamentos, com as respectivas quantidades aplicadas, está descrita na Figura 1. Todas as parcelas receberam ainda, anualmente, adubações suplementares de potássio, na forma de KCl e de nitrogênio, como uréia e/ou NH₄SO₄, distribuídos na superfície do solo, sem incorporação.

Ao todo 14 diferentes misturas destas substâncias foram adicionadas às parcelas, sendo que cada uma delas foi identificada pelas letras A, B e T (tratamento), seguida de um número (1 até 12). A letra A identifica as parcelas onde foi adicionado só o carbonatito e a letra B onde foi acrescentado só calcário. Os tratamentos 1 até 7 testaram o carbonatito como fonte de fósforo e incluíram a adição de KCl. Os tratamentos 8 até 12 testaram o carbonatito como fonte de potássio e incluíram a adição de SFT.

AQUISIÇÃO DE DADOS

Ao todo foram obtidas leituras gamaespectrométricas em 126 pontos regularmente distribuídos na área do experimento

(Fig. 2). Outras 24 leituras foram tomadas em área de cerrado nativo, próxima ao local do experimento.

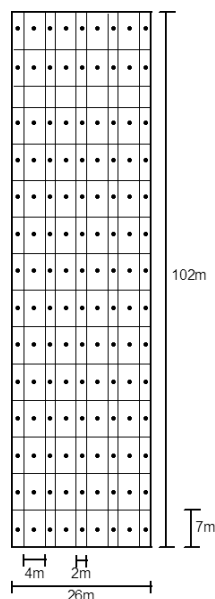


Figura 2 – Localização das medidas gamaespectrométricas e de resistividade elétrica.

Tabela 1 – Valores médios associados a cada tratamento. T – parcela com tratamento de fertilizante; A – parcela com adição só de carbonatito; B – parcela com adição só de calcário.

	TC (Ueq)		K (%)		U (ppm)		Th (ppm)		resistividade (Ohm.m)	
	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio
T1	13,3	0,2	0,20	0,08	1,9	0,7	21,1	1,2	2831	630
T2	13,2	0,2	0,20	0,08	2,3	0,6	20,5	0,6	2244	832
T3	13,4	0,3	0,18	0,10	1,8	0,5	20,8	0,9	3266	664
T4	12,8	0,3	0,20	0,00	1,7	0,5	21,2	1,0	3117	993
T5	13,1	0,4	0,23	0,05	1,8	0,1	21,3	0,7	3997	723
T6	13,2	0,3	0,23	0,05	2,0	0,4	20,7	0,9	3171	843
T7	13,3	0,1	0,15	0,06	1,7	0,5	21,0	1,3	3321	681
T8	13,3	0,3	0,20	0,08	1,6	0,6	21,0	0,9	7347	2968
T9	13,8	0,3	0,23	0,05	1,7	0,2	22,5	0,7	8836	3987
T10	13,3	0,5	0,18	0,05	2,3	0,9	20,1	2,3	7002	3084
T11	13,4	0,4	0,23	0,05	1,5	0,8	21,6	1,1	4998	1356
T12	13,1	0,2	0,20	0,08	2,2	0,9	20,4	2,4	6499	1297
B	13,5	0,5	0,18	0,10	1,8	0,4	21,2	1,7	1235	387
A	13,5	0,2	0,20	0,00	1,5	0,4	21,7	2,0	2672	528
corredores	13,5	0,5	0,17	0,07	1,7	0,6	21,6	1,3	4068	2528
margem	13,6	0,7	0,15	0,06	1,8	0,8	21,8	1,7	2771	1112
cerrado	9,6	0,3	0,22	0,06	1,4	0,6	15,8	1,1	42759	6313

O gamaespectrômetro utilizado foi obtido por empréstimo junto ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná. Trata-se de um equipamento portátil, modelo GS-512, fabricado por Geofyzika, República Tcheca, projetado para operar com 512 canais, entre 0,1 e 3 MeV, cuja calibração foi realizada no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em 23 de fevereiro de 2003 (Becegato & Ferreira, 2005).

O instrumento compõe-se de 2 módulos, sonda e console, respectivamente. A sonda tem formato cilíndrico, mede 45 cm de comprimento por 12,5 cm de diâmetro e pesa 4,6 kg. Trata-se de um invólucro de alumínio que contém o detector, no caso uma pastilha de iodeto de sódio ativado por tálio (NaI(Tl)), medindo 7,6 × 7,6 cm, o circuito eletrônico de detecção, e uma fonte radioativa de referência (¹³⁷Cs). O console com dimensões de 23,5 × 23 × 9 cm, pesa 2,8 kg e contém os circuitos para armazenagem e processamento dos sinais medidos.

Neste trabalho, utilizou-se um resistivímetro modelo Geopulse, fabricado por Campus Geophysical Instruments, Inglaterra, e adquirido pela Universidade de Brasília em 1995. Trata-se de

um equipamento relativamente moderno, portátil e leve (cerca de 6 kg). As leituras de resistividade aparente foram adquiridas nos mesmos locais que as radiométricas, empregando-se o arranjo de Wenner, com espaçamento de 1 metro entre os eletrodos.

COMPARAÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO COM O CERRADO NATIVO COM BASE NA RADIOATIVIDADE E RESISTIVIDADE

Os dados gamaespectrométricos e de resistividade aparente foram analisados tentando-se verificar o contraste entre o solo submetido aos tratamentos e o solo sob cerrado nativo. Inicialmente, efetuou-se o cálculo das médias aritméticas para cada parâmetro medido nos diferentes tratamentos e os resultados podem ser observados na Tabela 1. O pressuposto na análise destes dados é o de que ao se adicionar materiais solúveis e com alguma radioatividade ao solo da área de estudo ocorreria um aumento na emissão da radiação gama natural e uma redução na resistividade elétrica aparente. A Tabela 2 apresenta os valores máximo e mínimo obtidos para cada parâmetro medidos nas parcelas comparados com a média dos mesmos parâmetros medidos no cerrado.

Em relação aos dados radiométricos, observou-se que os

valores médios obtidos nas parcelas, embora superiores são comparáveis àqueles obtidos no cerrado nativo. Foi mais fácil diferenciar as parcelas e o cerrado com base na contagem total e no Th, visto que mesmo os menores valores para estes isótopos medidos nas parcelas foram superiores aos do cerrado. No entanto, em algumas parcelas, as leituras de K e U foram até menores que as do cerrado nativo. Esta proximidade dificulta a diferenciação entre o solo com e sem adição de fertilizante, seja ele o carbonato, calcário, SFT ou KCl. Trabalhos realizados por Nascimento et al. (2005) mostraram que nestes latossolos existe uma relação diretamente proporcional do teor de argilominerais como a caulinita e a radiação gama medida. A caulinita adsorve U e Th causando uma elevação da radiação gama natural.

Tabela 2 – Valores máximo e mínimo obtidos para cada parâmetro nas parcelas comparados com a média do cerrado.

	Máximo nas parcelas	Mínimo nas parcelas	Média no cerrado
TC (Ueq)	14,2	12,4	9,6
K (%)	0,3	0,1	0,22
U (ppm)	3,4	0,7	1,4
Th (ppm)	23,7	16,8	15,8
Resistividade (Ohm.m)	15870	146	42759

Em relação à resistividade aparente, observaram-se valores médios entre 2000 e 8000 Ohm.m nas parcelas e de aproximadamente 42000 Ohm.m no cerrado, o que indica uma alteração das condições naturais devido à incorporação de fertilizante. Os valores de resistividade elétrica foram mais eficientes que os radiométricos para diferenciar o solo com fertilizante do solo com cobertura de cerrado. Enquanto na gamaespectrometria os valores médios obtidos nas parcelas foram pouco superiores àqueles obtidos no cerrado, a resistividade média neste último foi até dez vezes superior à resistividade média das parcelas.

Acredita-se que o volume de materiais incorporados ao solo, embora não tenha sido suficiente para elevar apreciavelmente o nível natural de radiação, foi bastante para aumentar o conteúdo de íons dissolvidos na água intersticial. O resultado foi a redução dos valores de resistividade na área do experimento, quando comparados aos do cerrado nativo. Nascimento et al. (2001) e Nascimento et al. (2003) mostraram, na região do Distrito Federal, que variações no teor de areia fina de 10% podem causar variações de até 10.000 Ohm.m nos latossolos. Deste modo também é possível que pequenas mudanças na composição textural dos solos das parcelas estejam influenciando os valores de resistividade.

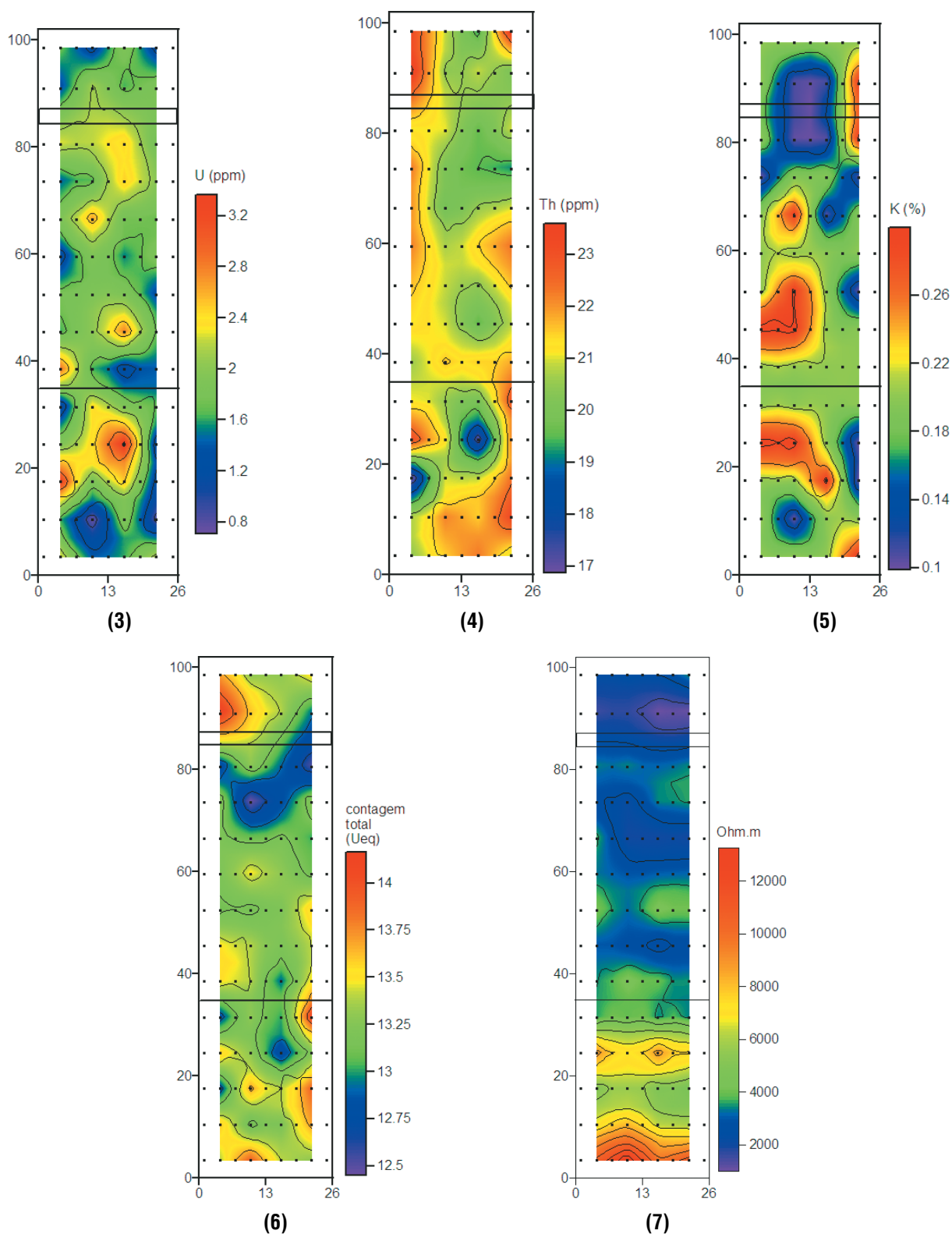
COMPARAÇÃO DOS VÁRIOS TRATAMENTOS COM BASE NA RADIOATIVIDADE E NA RESISTIVIDADE

Nesta etapa do trabalho, tentou-se visualizar a distribuição espacial dos teores de eU, eTh, K, contagem total e resistividade elétrica tentando-se diferenciar os vários tratamentos entre si. Foi gerada uma imagem para cada um destes parâmetros, empregando-se o software SURFER 8, Golden Software. As imagens geradas correspondem às Figuras 3, 4, 5, 6 e 7.

Para a geração destas imagens, optou-se por trabalhar exclusivamente com os valores obtidos dentro das parcelas, desconsiderando-se os dados dos corredores e da área em torno do experimento, com o intuito de facilitar a diferenciação entre os tratamentos, um dos objetivos deste trabalho. Os valores empregados para a geração das imagens correspondem às medidas efetuadas em campo, isto é, 56 valores para cada parâmetro (U, Th, K, contagem total e resistividade), distribuídos no terreno conforme a Figura 2. Os dados originais, 56 valores para cada variável considerada, foram interpolados empregando-se a krigagem.

O contraste radiométrico observado entre as parcelas é muito baixo e pode ser causado tanto pelos diferentes tratamentos como por características físicas do solo, como pequenas variações de textura, por exemplo. Cabe lembrar que os valores utilizados para a geração das imagens radiométricas correspondem às leituras obtidas no campo e não àqueles apresentados na Tabela 1. As escalas de cores das imagens radiométricas compreendem todo o intervalo entre o maior e o menor valor medido para cada variável radiométrica, enquanto os valores apresentados na Tabela 1 são apenas a média aritmética destes valores. Analisando-se por exemplo a Figura 3, imagem do U, observa-se que o maior valor medido em campo foi de 3,4 ppm e comparando-se a Figura 3 com a Figura 1 verifica-se que esta medida foi obtida numa parcela submetida ao tratamento T10. Ainda na Figura 3, observa-se que o menor valor medido em campo foi de 0,7 ppm e comparando-se a Figura 3 com a Figura 1 verifica-se que esta medida foi obtida numa parcela submetida ao tratamento T8. Por este motivo, a escala de cores da Figura 3 tem como valor mínimo 0,7 ppm e máximo 3,4 ppm, sendo que o mesmo raciocínio empregado na análise da Figura 3 deve ser empregado para as demais imagens radiométricas.

Em relação às medidas de resistividade, observou-se que os menores valores, cerca de 2000 Ohm.m, foram registrados nas parcelas A e B. Valores intermediários, 2000 até 4000 Ohm.m foram registrados nas parcelas onde foi adicionado o KCl. Os maiores valores, superiores a 4000 Ohm.m, foram observados



Figuras (3) – Imagem do eU (ppm). **(4)** – Imagem do eTh (ppm). **(5)** – Imagem do K (%). **(6)** – Imagem de contagem total (ppm de Ueq). **(7)** – Imagem de resistividade elétrica aparente (Ohm.m).

nas parcelas que receberam adição de SFT. É provável que a redução da resistividade esteja diretamente relacionada à solubilidade dos fertilizantes na água intersticial. Deve ser lembrado que os dados interpolados correspondem às medidas de campo e não às médias aritméticas apresentadas na Tabela 1.

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a adição dos fertilizantes, incluindo o carbonatito, modificou as características naturais do solo, elevando os teores de K, U e Th e diminuindo os valores de resistividade elétrica. Estes materiais causaram uma pequena elevação no nível de radiação gama natural do solo. Com relação à média dos valores de resistividade, o efeito foi mais intenso. Ocorreu uma redução de aproximadamente dez vezes no solo tratado em relação ao solo com cobertura nativa. Por meio das medidas de resistividade elétrica, foi possível diferenciar as regiões com adição de KCl, daquelas com adição de SFT e de ambas com as parcelas de controle.

Os resultados radiométricos não possibilitaram diferenciar as parcelas que receberam só carbonatito daquelas que receberam só calcário ou daquelas que receberam adubo convencional. Não foi possível, com base só na gamaespectrometria, individualizar qualquer dos tratamentos. Um pressuposto deste trabalho era o de que as parcelas que receberam alguma adição de carbonatito seriam as mais radioativas, mas isto não foi observado. Este fato deve ter ocorrido porque os fertilizantes convencionais, nas quantidades e combinações em que foram utilizados, contribuíram de forma significativa para a elevação da radioatividade.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores Lêda de Carvalho Mendes e Éder de Sousa Martins, da Embrapa Cerrados, co-responsáveis técnicos pelos experimentos no campo. Este trabalho recebeu o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, financiador do Projeto “Pó de rocha: alternativa à importação de potássio para uso na agricultura brasileira”, do convênio Embrapa/UnB/CNPq (Processo Institucional 52.1242/01-0), ao qual este trabalho se vincula.

REFERÊNCIAS

ANDRADE LRM, MARTINS ES & MENDES IC. 2002. Carbonatites as a natural nutrient source for Cerrado soil fertilization. In: World Congress of Soil Science, 17: 2002, Bangkok, Proceedings. . . International Union of Soil Sciences, 2002. CD-ROM.

BECEGATO VA & FERREIRA FJF. 2005. Gamaespectrometria, resistivi-

dade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4): 371–405.

CAMARGO MS & SILVEIRA RI. 1998. Efeito dos fosfatos naturais Alvorada, Catalão, Patos e Arad na produção de massa seca de milho em casa de vegetação. *Scientia Agricola*, 55: 509–519.

CARDOSO FBF, MARTINS ES & CARVALHO JC. 1998. A evolução pedogeoquímica e sua influência nas propriedades físicas dos solos profundamente intemperizados do Distrito Federal. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, Brasília, Anais. . . 1: 51–58.

CORWIN DL & RHOADES JD. 1984. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 288–291.

EDLEFSEN NE & ANDERSON ABC. 1941. The four-electrode resistance method for measuring soil moisture content under field conditions. *Soil Science*, 51: 367–376.

EMBRAPA. 1978. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 455 p.

EMBRAPA. 1999. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 1.ed. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 412 p.

FROHLICH RK & PARKE CD. 1989. The electrical resistivity of the vadose zone – field survey. *Ground Water*, 27: 524–530.

FUKUE M, MINATO T, HORIBE H & TAYA N. 1999. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, 54: 43–53.

GARDNER WH. 1986. Water content. In: KLUTE A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy / Soil Science Society of America, 493–544.

GASPAR JC & ASSAD ED. 1999. Relatório Parcial do Projeto Carbonatitos como Fonte Alternativa na Adubação de Solos. Brasília. Inédito. 59 p.

HANSEN DA. 1975. *Geological Applications Manual for Portable Gamma Ray Spectrometers*. Toronto, Exploranium G. S. Limited, 87 p.

KIRKHAM D & TAYLOR GS. 1950. Some tests of a four-electrode probe for soil moisture measurement. *Soil Science Society of America Proceedings*, 14: 42–46.

KOEFOD O. 1979. *Resistivity Sounding Measurements*. Amsterdam, Elsevier, 276 p.

McBRIDE RA, GORDON AM & SHRIVE SC. 1990. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 290–293.

NASCIMENTO CTC, VARELLA RF, PIRES ACB & SANTOS RV. 2001. Valores de resistividade elétrica em um latossolo do Distrito Federal.

- In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 7, 2001, Salvador, Anais. . . Sociedade Brasileira de Geofísica. CD-ROM.
- NASCIMENTO CTC, PIRES ACB & MORAES RAV. 2003. Variação sazonal da resistividade em latossolos. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 8, 2003, Rio de Janeiro, Anais. . . Sociedade Brasileira de Geofísica. CD-ROM.
- NASCIMENTO CTC, GUIMARÃES EM & PIRES ACB. 2005. Reconhecimento de solos por meio de gamaespectrometria. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 9, 2005, Salvador, Anais. . . Sociedade Brasileira de Geofísica. CD-ROM.
- ORELLANA E. 1972. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Madrid, Paraninfo, 523 p.
- RHOADES JD. 1979. Inexpensive four-electrode probe for monitoring soil salinity. *Soil Science Society of America Journal*, 43: 817–818.
- RHOADES JD & INGVALSON RD. 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35: 54–60.
- RHOADES JD & VAN SCHILFGAARDE J. 1976. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Science Society of America Journal*, 40: 647–651.
- SOUZA JL. 1998. Anomalias Aerogamaespectrométricas (K, U e Th) da Quadrícula de Araras (SP) e suas Relações com Processos Pedogenéticos e Fertilizantes Fosfatados. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Dissertação de Mestrado, 218 p.
- TELFORD WM, GELDART LP, SHERIFF RE & KEYS DA. 1985. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 860 p.
- VASCONCELLOS RM, METELO MJ, MOTTA AC & GOMES RD. 1994. *Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil*. Rio de Janeiro, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 165 p.
- WILFORD JR, BIERWIRTH PN & CRAIG MA. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17: 201–216.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento possui graduação em Geologia pela UnB (1993), mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela UnB (1998) e doutorado em Geologia pela UnB (2003). Atualmente é Pesquisador Associado da Universidade de Brasília e geólogo da Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. Tem atuado principalmente com a utilização de métodos elétricos, eletromagnéticos e radiométricos aplicados a estudos ambientais.

Francisco José Fonseca Ferreira possui graduação em Geologia pela UFPE (1970), especialização em Geofísica pela UFBA (1974), mestrado em Geociências pela USP (1982) e doutorado em Geociências pela USP (1991). Desenvolveu suas atividades profissionais na CPRM (1972-1980) e no IPT (1981-1990). Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal do Paraná e Coordenador do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR. Tem atuado principalmente com geofísica aplicada à cartografia geológica e pedológica, à prospecção mineral e a estudos ambientais.

Leide Rovênia Miranda de Andrade possui graduação em Agronomia pela UnB (1985), mestrado em Agronomia pela UFRGS (1988), doutorado em Agronomia (1996) pela Kyushu University (Japão) e pós-doutorado em Biotecnologia pela UnB (2006). Atualmente é pesquisadora da Embrapa Cerrados, atuando na área de solos e nutrição de plantas.

José Carlos Gaspar possui graduação em Geologia pela UnB (1974), mestrado em Geologia pela UnB (1977) e doutorado em Géologie pela Université D'Orléans (1989). Atualmente é Professor Titular da Universidade de Brasília, atuando principalmente na área de mineralogia.

Augusto Cesar Bittencourt Pires possui graduação em Geologia pela UFRJ (1968), especialização em Geofísica pela UFBA (1971), doutorado (1975) e pós-doutorado (1989) em Geofísica pela Colorado School of Mines (EUA). Atualmente é Professor Titular da Universidade de Brasília e Coordenador do Laboratório de Geofísica Aplicada – LGA/UnB. Tem atuado principalmente nos seguintes temas: gamaespectrometria, magnetometria, geofísica aplicada à cartografia geológica e à prospecção mineral.