

**VALTER ANTONIO BECEGATO**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS E GEOQUÍMICAS  
EM DUAS GLEBAS AGRÍCOLAS DO NOROESTE DO  
ESTADO DO PARANÁ E SUAS RELAÇÕES COM  
FERTILIZANTES FOSFATADOS**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Co-orientador:

Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani

**CURITIBA**

**2005**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Doutor Francisco José Fonseca Ferreira pela orientação.

À Universidade do Estado de Santa Catarina.

À CAPES pela concessão da bolsa através do programa PICDT.

À Universidade Federal do Paraná, curso de Pós-Graduação em Geologia pela oportunidade.

Ao corpo docente da Pós-Graduação em Geologia da UFPR.

Aos colegas do LPGA: Rodoilton, Alan e João.

Aos colegas do LAMIR - Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR em especial a Luciane e ao professor Doutor José Manoel.

Aos colegas das Secretarias da Pós-Graduação e Graduação em especial a Sarita.

Ao colega Carlos Tadeu do Nascimento da UNB pelo auxílio nos trabalhos de campo, referente à aquisição de dados da resistividade aparente.

À Universidade de Brasília setor de Geociências pelo empréstimo do resistivímetro.

Aos colegas da EMATER-Maringá-PR em especial ao Engenheiro Agrônomo Édson.

Ao Senhor Romeu e funcionários da Fazenda Santa Luzia.

À Usina Santa Terezinha Unidade de Paranacity-PR.

Aos amigos Cabral, William, Rossano, Leandson e aos demais colegas da “salinha” da Pós pela maravilhosa convivência e trocas de experiências.

Aos meus pais (*in memoriam*),  
À minha esposa e companheira Olívia pelo apoio e incentivo,  
Aos meus filhos Vitor e Lara Carolina,  
Ao Shigue, Lu, Rosa, Rique e Marcos,

**DEDICO.**

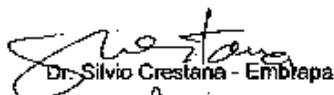
## TERMO DE APROVAÇÃO

**Valter Antonio Becegato**

**"APLICAÇÃO DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS E GEOQUÍMICAS EM  
DUAS GLEBAS AGRÍCOLAS DO NOROESTE DO ESTADO DO  
PARANÁ E SUAS RELAÇÕES COM FERTILIZANTES FOSFATADOS"**

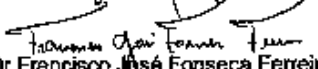
Tese de Doutorado aprovada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em  
Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental, da  
Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:

  
Prof. Dr. Jean Marie Flexor – ON/MCT

  
Dr. Silvio Crestana - Embrapa

  
Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt – UFPR

  
Prof. Dr. Gláucio Roloff - UFPR

  
Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira – UFPR  
Presidente

Curitiba, 18 de dezembro de 2005.

## RESUMO

O Estado do Paraná é considerado um dos maiores produtores de grãos do Brasil. Isto é fruto de uma agricultura altamente tecnificada, resultado do somatório de diversas variáveis. Entre elas, estão os insumos agrícolas, dentre os quais insere-se os adubos fosfatados. Tal produto dependendo da rocha fosfática utilizada para seu fabrico, pode conter elementos radioativos em sua composição. A presente pesquisa investigou duas áreas agrícolas localizadas no Noroeste do estado, com diferentes litologias, tipos de solos e culturas. Utilizou-se métodos geofísicos (gamaespectrométrico, resistividade aparente e suscetibilidade magnética) e geoquímicos (análise de solos e mineralogia), objetivando estabelecer correlações entre os dados dos dois métodos, para entender a dinâmica dos radionuclídeos nos solos. Na Área 1, os solos Nitossolo Vermelho Eutrófico e Latossolo Vermelho Eutroférico de textura argilosa, retêm mais radionuclídeos do que o Latossolo Vermelho Distrófico de textura média. Os teores de radionuclídeos são mais baixos nas áreas testemunhas, quando comparados com os tratos de atividade agrícola, denotando a contribuição dos fertilizantes fosfatados e do gesso no incremento dos teores nos solos cultivados. Foram constatadas diferenças nos teores de radionuclídeos, em correspondência às formulações dos adubos, as quais se refletiram nas medidas gamaespectrométricas. As maiores taxas de radioatividade foram constatadas nos adubos, gesso, área com atividade antrópica e testemunhas. Constatou-se acúmulo dos radionuclídeos nos perfis dos solos. Houve correlação positiva e significativa entre urânio e argila; urânio e matéria orgânica; urânio e pH; urânio e fósforo; urânio e cálcio; urânio e magnésio; e entre tório e pH; tório e fósforo; tório e cálcio; tório e magnésio. Correlação negativa entre resistividade aparente e argila. Os valores de resistividade variaram de 20 a 620 Ohm.m, verificando-se que as maiores magnitudes refletiram-se no solo mais arenoso, ao contrário dos argilosos. O método de resistividade foi importante para o mapeamento e caracterização das texturas dos solos, auxiliando na discriminação das unidades de solos. A resistividade elétrica é uma ferramenta importante para auxiliar no mapeamento de solos, principalmente em áreas onde ocorrem variações nas texturas quanto aos teores de argila e areia. Embora o espaçamento entre os eletrodos tenha sido de apenas um metro objetivo do trabalho, aberturas maiores podem ser utilizadas para se obter a profundidade dos perfis dos solos. Também pode-se fazer arranjos com aberturas inferiores a 1 m, para discriminar os horizontes dos solos. A suscetibilidade magnética dos solos argilosos foram maiores do que a dos arenosos. Os solos oriundos da Formação Serra Geral apresentaram maior concentração de minerais magnéticos. Com relação à Área 2, houve diferenças nos teores dos radionuclídeos da área agrícola em relação a testemunha. Observou-se diferenças nos teores de radionuclídeos, em correspondência às formulações dos adubos, as quais se refletiram nas medidas gamaespectrométricas. As maiores doses de radioatividade foram constatadas nos adubos, gesso, área com atividade antrópica e testemunhas respectivamente. Pelo fato dos solos serem de textura arenosa, acarretam menor retenção dos adubos e gesso, conseqüentemente, propicia maior percolação no perfil tanto dos nutrientes constantes daqueles insumos, bem como dos radionuclídeos. Como os solos são vulneráveis à erosão, observou-se que em partes da área a ocorrência de erosão laminar, está contribuindo para o arraste dos adubos, gesso e dos elementos radioativos.

Palavras-chave: Radionuclídeos, solos, geofísica, geoquímica, fertilizantes.

## ABSTRACT

The State of Paraná is considered one of the major grain producers in Brazil. This is due to a high level of technology in agriculture that results from the sum of several variables. Among them we can mention the agricultural insumes, like the phosphate fertilizers. The product depends on phosphate rock that is employed in its making, and it can have radioactive elements in its composition. The present research investigated two agricultural areas in the northwest of the state, with different lithologies, soil type and cultures. Geophysical methods were employed (gamma spectrometric, apparent resistivity and magnetic susceptibility) and geochemical (soil analysis and mineralogy), aiming at setting correlations among the data of the two methods, thus permitting understand the dynamics of radionuclide in the soils. In Area 1, the soil Alfisoils and clay texture Oxisols retain more radioactive elements than the medium texture Oxisols. The radionuclide contents are lower in the testimony areas, when compared with the terrains of agricultural activity, denoting the contribution of the phosphate fertilizers and the gypsum in the incrementation of the contents in the cultivated soils. Differences in the radionuclide contents were noticed, in relation to the fertilizer formulations, and they rebounded in the gamma spectrometric measures. The greatest radioactivity rates were noticed in the fertilizers, gypsum, an area with anthropic activity and testimony. Accumulation of radioactive elements was also noticed in the soil profiles. There was a positive and meaningful correlation between uranium and clay; uranium and organic matter; uranium and pH; uranium and phosphorus; uranium and calcium; uranium and magnesium; between thorium and pH; thorium and phosphorus; thorium and calcium; thorium and magnesium. A negative correlation was established between apparent resistivity and clay. The resistivity values varied from 20 to 620 Ohm.m, and it was possible to verify that the major magnitudes reflected in the more sandy soil, in opposition to the clay ones. The resistivity method was important to establish the chart and characterization of the soil textures, helping in the discrimination of the soils units. The electric resistivity is an important tool in making the chart of the soils, mainly in the areas where variations of texture occur concerning the clay and sand contents. Although the spacing among the electrodes was just an objective work meter, greater openings may be employed to obtain the dept of the soil profiles. It is also possible to make arrangements with inferior openings at 1m to discriminate the soil horizons. The magnetic susceptibility of the clay soils was bigger than the one of the sand soils. The soils derived from the Serra Geral Formation presented a higher concentration of magnetic minerals. In what concerned Area 2, there were differences in the radionuclide contents of the agricultural terrain in relation to the testimony. Differences were noticed in the radionuclide contents in relation to the fertilizers formulations, and they reflected in the gamma spectrometric measures. The greatest radioactivity doses were established in the fertilizers, gypsum, anthropic activity areas, and testimony, respectively. Due to the fact that the soils were of sand texture, there was less retention of the fertilizers and gypsum, consequently favoring a greater percolation in the profile, either in the nutrients present in those insumes or in the radionuclide elements. As the soils are vulnerable to erosion, it was possible to notice that, in parts of the area, the occurrence of laminar erosion is contributing to the dragging of the fertilizers, gypsum and radioactive elements.

Key words: Radionuclide, soils, geophysics, geochemistry, fertilizers.

## LISTA DE FIGURAS

1. Localização das áreas pesquisadas e compartimentos geológicos do estado do Paraná.....	37
2. Vista geral da Área 1.....	38
3. Mapa geológico.....	39
4. Vista geral da Área 2.....	40
5. Malha de pontos - Área 1.....	41
6. Malha de pontos – Área 2.....	42
7. Aquisição de dados gamaespectrométricos dos solos – Área 1.....	47
8. Área testemunha (mata) – solo areno/argiloso – Área 1.....	47
9. Área testemunha (mata) – solos argilosos – Área 1.....	48
10. Aquisição de dados gamaespetrométricos dos solos – Área 2.....	48
11. Aquisição de dados gamaespectrométricos do gesso – Área 2.....	49
12. Princípio dos métodos elétricos indicando as linhas de corrente e de potencial.....	51
13. Aquisição de dados da resistividade elétrica – Área 1.....	52
14. Coleta de solos – Área 2.....	53
15. Coleta de solos – Área 1.....	53
16. Difratoograma de raios X da amostra <i>in natura</i> .....	54
17. Difratoogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos. De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. (K = caulinita; H = hematita e Q = quartzo).....	55
18. Mapa de solos da Área 1.....	58

19. Fotografia aérea do ano de 1980 escala aproximada 1:25.000 – Área 1 delimitada pelo polígono vermelho.....	59
20. Perfil do Latossolo Vermelho Distrófico.....	60
21. Perfil do Nitossolo Vermelho Eutrófico.....	60
22. Perfil do Latossolo Vermelho Eutroférico.....	61
23. Modelo de elevação do terreno.....	61
24. Histogramas com curvas de distribuições dos radionuclídeos da área cultivada .....	69
25. Distribuição espacial do urânio.....	70
26. Distribuição espacial do tório.....	70
27. Distribuição espacial do potássio.....	71
28. Distribuição espacial da relação potássio/urânio.....	71
29. Variações dos teores dos radionuclídeos no perfil do Latossolo Vermelho Distrófico.....	74
30. Variações dos teores dos radionuclídeos no perfil do Nitossolo Vermelho Eutrófico.....	75
31. Variações dos teores dos radionuclídeos no perfil do Latossolo Vermelho Eutroférico.....	75
32. Distribuição espacial da resistividade aparente para a profundidade de 50 cm. ....	81
33. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 0-20 cm.....	82
34. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 20-40 cm.....	82
35. Correlação entre resistividade aparente e argila para a profundidade de 0-20 cm.....	83
36. Correlação entre resistividade aparente e argila para a profundidade de 20-40 cm.....	83
37. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade de 0-20 cm.....	85
38. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade de 20-40 cm.....	86



39. Correlação entre argila e suscetibilidade magnética para a profundidade de 0-20 cm.....	86
40. Correlação entre argila e suscetibilidade magnética para a profundidade de 20-40 cm.....	87
41. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 1 – Nitossolo Vermelho Eutrófico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo).....	88
42. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 1 – Nitossolo Vermelho Eutrófico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo.....	89
43. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 2 – Nitossolo Vermelho Eutrófico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita).....	89
44. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 2 – Nitossolo Vermelho Eutrófico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita.....	90
45. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 1 – Latossolo Vermelho Eutroférico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo).....	90
46. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 1 – Latossolo Vermelho Eutroférico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo.....	91
47. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 2 – Latossolo Vermelho Eutroférico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; G = goetita).....	91
48. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 2 – Latossolo Vermelho Eutroférico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; G = goetita.....	92
49. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 1 – Latossolo Vermelho Distrófico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo).....	95

50. Difrátogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 1 – Latossolo Vermelho Distrófico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo.....	95
51. Difrátometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 2 – Latossolo Vermelho Distrófico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo).....	96
52. Difrátogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 2 – Latossolo Vermelho Distrófico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; G = goetita; Q = quartzo.....	96
53. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 0-20 cm.....	97
54. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 20-40 cm.....	97
55. Histogramas com curvas de distribuições do ferro para as duas profundidades	98
56. Correlação entre urânio e argila.....	111
57. Correlação entre pH e tório.....	112
58. Correlação entre pH e urânio.....	112
59. Correlação entre cálcio e pH.....	114
60. Correlação entre cálcio e urânio.....	114
61. Correlação entre cálcio e tório.....	115
62. Correlação entre magnésio e urânio.....	115
63. Correlação entre magnésio e tório.....	116
64. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 0-20 cm.....	117
65. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 20-40 cm.....	117
66. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 0-20 cm.....	118
67. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 20-40 cm.....	118
68. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 0-20 cm.....	119

69. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 20-40 cm.....	119
70. Histogramas e curvas de distribuições do pH para as duas profundidades.....	120
71. Histogramas e curvas de distribuições do cálcio para as duas profundidades....	121
72. Histogramas e curvas de distribuições do magnésio para as duas profundidades.....	122
73. Interação entre partículas de argila e matéria orgânica na capacidade de troca catiônica.....	124
74. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 0-20 cm.....	125
75. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 20-40 cm....	125
76. Correlação entre urânio e fósforo.....	127
77. Correlação entre tório e fósforo.....	127
78. Histogramas e curvas de distribuições do fósforo para as duas profundidades.	128
79. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 0-20 cm.....	129
80. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 20-40 cm.....	129
81. Histogramas e curvas de distribuições do potássio para as duas profundidades.....	130
82. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 0-20 cm.....	131
83. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 20-40 cm.....	131
84. Dendrograma das 16 variáveis da matriz de dados para a profundidade de 0-20 cm.....	132
85. Dendrograma das 16 variáveis da matriz de dados para a profundidade de 20-40 cm.....	133
86. Ocupação e formas de relevo (detalhe a esquerda – terraço para minimizar a velocidade de escoamento das águas pluviais).....	135
87. Mapa de solos da Área 2.....	136
88. Histogramas e curvas de distribuições dos radionuclídeos.....	142

89. Distribuição espacial do potássio.....	143
90. Distribuição espacial do urânio.....	143
91. Distribuição espacial do tório.....	144
92. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade de 0-20 cm.....	149
93. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade de 20-40 cm.....	149
94. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 1 – Neossolo Quartzarênico. K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo).....	151
95. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 1 – Neossolo Quartzarênico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo.....	151
96. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra 2 – Neossolo Quartzarênico. K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo).....	152
97. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 2 – Neossolo Quartzarênico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo.....	152
98. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. V = vermiculita; K= caulinita; H = hematita) .....	153
99. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. V = vermiculita; K = caulinita; H = hematita.....	153
100. Difractometria de raios X da amostra <i>in natura</i> (amostra Latossolo Vermelho-Amarelo Epiálico. K = caulinita; Q = quartzo; H = hematita).....	154
101. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Epiálico). De cima para baixo: amostra <i>in natura</i> ; aquecida a 550 °C e tratada com etilenoglicol. K = caulinita; Q = quartzo; H = hematita.....	154
102. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 0-20 cm.....	155
103. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 20-40 cm.....	156
104. Histogramas e curvas de distribuições do ferro para as duas profundidades...	157

105. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 0-20 cm....	158
106. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 20-40 cm..	158
107. Histogramas e curvas de distribuições da matéria orgânica para as duas profundidades.....	159
108. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 0-20 cm.....	169
109. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 20-40 cm.....	169
110. Histogramas e curvas de distribuições da argila para as duas profundidades.	170
111. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 0-20 cm.....	171
112. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 20-40 cm.....	171
113. Histogramas e curvas de distribuições do cálcio para as duas profundidades..	172
114. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 0-20 cm.....	173
115. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 20-40 cm.....	173
116. Histogramas e curvas de distribuições do magnésio para as duas profundidades.....	174
117. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 0-20 cm.....	175
118. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 20-40 cm.....	175
119. Histogramas e curvas de distribuições do pH para as duas profundidades.....	176
120. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 0-20 cm.....	177
121. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 20-40 cm.....	177
122. Histogramas e curvas de distribuições do fósforo para as duas profundidades	178
123. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 0-20 cm.....	179
124. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 20-40 cm.....	179
125. Histogramas e curvas de distribuições do potássio para as duas profundidades.....	180

## LISTA DE TABELAS

1. Série do decaimento radioativo do $^{232}\text{Th}$ .....	25
2. Série do decaimento radioativo do $^{238}\text{U}$ .....	26
3. Série do decaimento radioativo do $^{235}\text{U}$ .....	27
4. Concentrações médias de radioelementos em diferentes tipos de rochas.....	32
5. Concentrações dos radionuclídeos nos <i>pads</i> do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica, de acordo com Barreto et al., (1986). As incertezas correspondem às estimativas de desvios padrão e o número de determinações é indicado entre parênteses.....	45
6. Comparação entre as concentrações de potássio (k, %) nos <i>pads</i> do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica por Barreto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005) <sup>1</sup> , e calculadas por Ferreira et al., (2003) <sup>2</sup> e Ribeiro et al., (2005) <sup>3</sup> .....	46
7. Comparação entre as concentrações de urânio (U, ppm) nos <i>pads</i> do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica por Barreto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005) <sup>1</sup> , e calculadas por Ferreira et al., (2003) <sup>2</sup> e Ribeiro et al., (2005) <sup>3</sup> .....	46
8. Comparação entre as concentrações de tório (Th, ppm) nos <i>pads</i> do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica por Barreto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005) <sup>1</sup> , e calculadas por Ferreira et al., (2003) <sup>2</sup> e Ribeiro et al., (2005) <sup>3</sup> .....	46
9. Número de aquisições de dados geofísicos e análises geoquímicas.....	56
10. Dados geofísicos e resumo estatístico.....	62
11. Estatística descritiva dos dados geofísicos e dos teores de argila para o solo areno/argiloso.....	65
12. Estatística descritiva dos dados geofísicos e dos teores de argila para os solos argilosos.....	65
13. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos medidos <i>in loco</i> nos solos sob floresta nativa (testemunhas).....	67
14. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos medidos em rochas eruptivas básicas.....	73

15. Comparativo das concentrações de $^{238}\text{U}$ em fertilizantes fosfatados para diferentes países.....	76
16. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos em amostras de adubos e gesso.....	77
17. Teor de urânio em alguns fertilizantes comercializados no Brasil.....	78
18. Concentração de urânio para diferentes fabricantes e formulações de NPK (%) em alguns adubos produzidos no Brasil.....	78
19. Concentração de radionuclídeos (Bq/Kg) obtidos por espectrometria de raios gama em amostras de gesso e rochas fosfáticas.....	79
20. Taxas de radiação (doses) calculadas a partir do valor médio para cada um dos radionuclídeos.....	80
21. Síntese dos dados da suscetibilidade magnética por tipo de solo quanto a textura para as duas profundidades.....	85
22. Características de alguns elementos químicos e ordem preferencial de adsorção química nos solos.....	93
23. Dados geoquímicos para a profundidade de 0-20 cm.....	100
24. Dados geoquímicos para a profundidade de 20-40 cm.....	104
25. Estatística descritiva dos parâmetros geoquímicos para a profundidade de 0-20 cm.....	108
26. Estatística descritiva dos parâmetros geoquímicos para a profundidade de 20-40 cm.....	108
27. Matriz de correlação entre dados geofísicos e geoquímicos para a profundidade de 0-20 cm.....	109
28. Matriz de correlação entre dados geofísicos e geoquímicos para a profundidade de 20-40 cm.....	110
29. Estatística dos teores de matéria orgânica por tipo de solo para as duas profundidades.....	123
30. Número de aquisições de dados geofísicos, análises geoquímicas e mineralógicas.....	134

31. Dados gamaespectrométricos e resumo estatístico.....	137
32. Concentração de radionuclídeos em amostras de solos de alguns países.....	139
33. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos medidos <i>in loco</i> nos solos sob floresta nativa (testemunha).....	140
34. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos em amostras de adubos e gesso.....	146
35. Taxas de radiação (doses) calculadas a partir do valor médio para cada um dos radionuclídeos.....	148
36. Dados geoquímicos para a profundidade de 0-20 cm.....	160
37. Dados geoquímicos para a profundidade de 20-40 cm.....	164
38. Estatística descritiva dos dados geoquímicos para as profundidades de 0-20 e 20-40 cm.....	168
39. Matriz de correlação para a profundidade de 0-20 cm das variáveis geoquímicas e geofísicas.....	182
40. Matriz de correlação para a profundidade de 20-40 cm das variáveis geoquímicas e geofísicas.....	183
41. Rotação varimax da análise fatorial para a profundidade de 0-20 cm.....	184
42. Rotação varimax da análise fatorial para a profundidade de 20-40 cm.....	185



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

$\text{\AA}$	Angstrom, unidade de comprimento ( $10^{-10}$ m)
$^{214}\text{Bi}$	Bismuto, radioisótopo de massa 214
<b>Bq</b>	BECQUEREL. Unidade de atividade no SI
<b>Bq/Kg</b>	Unidade de taxa de emanção
<b>Ci</b>	CURIE, unidade histórica de atividade
$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	centimol de carga por decímetro cúbico
$\text{cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$	centimol de carga por quilo
(CNEN)	Comissão Nacional de Energia Nuclear
<b>CTC</b>	Capacidade de Troca de Cátions
<b>DAP</b>	Denominação para tipo de adubos, di-amônio fosfato
<b>MAP</b>	Denominação para tipos de adubos, mono amônio fosfato
<b>eU</b>	Equivalente urânio
<b>eTh</b>	Equivalente tório
<b>eU</b>	Equivalente urânio
$^{40}\text{K}$	Potássio, radioisótopo de massa 40
<b>KeV</b>	Quilo Elétron Volt
<b>MeV</b>	Mega Elétron Volt
<b>mg/L</b>	Miligrama por litro
<b>Ohm.m</b>	Ohm.metro, unidade de medida de resistividade elétrica
<b>PCi</b>	$10^{-12}$ Ci
<b>ppm</b>	Partícula por milhão
<b>R</b>	Roentgen, quantidade de radiação produzida ( $-2,08 \times 10^9$ )
$^{226}\text{Ra}$	Rádio, radioisótopo de massa 226
<b>SSP</b>	Denominação para tipos de adubos, super fosfato simples
<b>SST</b>	Denominação para tipos de adubos, super fosfato triplo
$^{232}\text{Th}$	Tório, radioisótopo de massa 232
$^{208}\text{Tl}$	Tálio, radioisótopo de massa 208
$^{235}\text{U}$	Urânio, radioisótopo de massa 235
$^{238}\text{U}$	Urânio, radioisótopo de massa 238
$\text{U}^{+4}$	Urânio, número de valência +4
$\text{U}^{+6}$	Urânio, número de valência +6

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1 Radiação gama natural.....	22
2.2 Processos de decaimento radioativo.....	23
2.3 Medida radiométrica.....	27
2.4 Radiação gama dos fertilizantes fosfatados e gesso agrícola.....	28
2.5 Geoquímica dos radionuclídeos no meio ambiente.....	29
2.5.1 Urânio.....	29
2.5.2 Tório.....	30
2.5.3 Potássio.....	31
2.6 Geoquímica dos Solos.....	32
2.6.1 Mineralogia dos solos tropicais.....	32
2.6.2 Capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos.....	33
2.7 Resistividade elétrica.....	34
3. HIPÓTESES E OBJETIVOS.....	36
3.1 Hipóteses.....	36
3.2 Objetivos gerais.....	36
3.3 Objetivos específicos.....	36
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
4.1 Caracterização geral das áreas da pesquisa.....	37
4.1.1 Área 1.....	38
4.1.1.1 Geologia.....	38
4.1.1.2 Solos.....	40
4.1.2 Área 2.....	40
4.1.2.1 Geologia.....	40
4.1.2.2 Solos.....	41
4.2 Procedimentos metodológicos.....	41

4.2.1 Aquisição de dados geofísicos.....	42
4.2.1.1 Gamaespectrometria.....	42
4.2.1.2 Resistividade elétrica – Área 1.....	49
4.2.2 Amostragem de solos.....	52
4.2.3 Difratometria de raios X.....	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
5.1 Área 1.....	56
5.1.1 Dados geofísicos.....	62
5.1.1.1 Correlações entre radiação gama dos solos, adubos, gesso e rochas.....	62
5.1.1.2 Resistividade aparente dos solos.....	81
5.1.1.3 Suscetibilidade magnética dos solos.....	84
5.1.2 Dados geoquímicos.....	87
5.1.2.1 Mineralogia dos solos.....	87
5.1.3 Correlações entre dados geoquímicos e geofísicos.....	99
5.2 Área 2.....	134
5.2.1 Dados geofísicos.....	137
5.2.1.1 Correlações entre radiação gama dos solos, adubos e gesso.....	137
5.2.1.2 Suscetibilidade magnética.....	148
5.2.2 Dados geoquímicos.....	150
5.2.2.1 Mineralogia dos solos.....	150
5.2.2.2 Análise dos dados geofísicos e geoquímicos.....	157
6. SÍNTESE DAS DISCUSSÕES.....	186
7. CONCLUSÕES.....	188
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	190

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna usa de alta tecnologia objetivando aumentar a produção. Culturas como soja, trigo e cana-de-açúcar valem-se de cultivares com grande potencial genético, que aliado a insumos como os adubos, se exteriorizam na forma de altas produtividades. Não se pode imaginar a agricultura brasileira dos últimos 20 anos, sem aplicações de grandes volumes de adubos. Isto traz interferências no meio ambiente, cujas conseqüências ainda são pouco conhecidas. Especificamente quanto aos adubos fosfatados, muitas são as fórmulas e marcas encontradas no mercado, com teores variados de nitrogênio, fósforo e potássio.

A partir dos anos 80 começou-se a utilizar o gesso, que é um subproduto oriundo da fabricação dos adubos acidulados. O gesso agrícola (sulfato de cálcio di-hidratado), derivado da produção do ácido fosfórico, contém em sua composição cálcio, enxofre e água livre em diferentes concentrações. O uso deste produto tem por objetivo suprir os solos com cálcio e enxofre nos horizontes mais profundos, propiciando às plantas o desenvolvimento do sistema radicular, explorando maior volume de solos na busca por água e nutrientes.

Tanto os adubos como o gesso, encerram elementos radioativos, cujos teores dependem da rocha utilizada para o seu fabrico. A radioatividade é um fenômeno natural, próprio de elementos com núcleos instáveis. É um processo irreversível de perda de massa e de energia, segundo o qual os átomos vão se desintegrando, através de isótopos, até atingir uma condição estável.

Diversas são as marcas e formulações comerciais envolvendo diferentes formas de se obter adubos. Pfister et al., (1976) observaram que a elevada concentração do urânio em superfosfato triplo, em relação ao super simples, depende do modo de fabricação. No primeiro caso, a rocha sofre um ataque com ácido fosfórico, retendo o urânio na forma de um complexo uranil dissolvido. Com relação ao mono amônio fosfato e aos di-amônio fosfatos, estes são obtidos pela composição entre ácido fosfórico e amônio.

Os solos brasileiros em sua grande maioria inseridos em regiões tropicais, são em geral pobres em nutrientes como decorrência de perdas constantes por lixiviação de elementos químicos como nitrogênio, fósforo e potássio, essenciais para culturas como soja, trigo e cana-de-açúcar. A forma conhecida até o momento de repor nutrientes aos solos e, conseqüentemente,

fornecer às plantas de modo a se obter altas produtividades, é por adubação química, através de compostos denominados comercialmente de formulações NPK. Tais formulações são muito variadas nos conteúdos dos elementos retromencionados, cujas concentrações variam de acordo com a necessidade de cada solo e cultura.

Trabalhos como o de Souza (1998), tiveram por objetivo investigar as anomalias aerogamaespectrométricas de K, U e Th que ocorrem na Quadrícula de Araras-SP, em correspondência à utilização de fertilizantes químicos oriundos da atividade antrópica e aos processos pedogenéticos. Nesta mesma linha, porém em áreas virgens do cerrado brasileiro, Nascimento (2003), pesquisou as relações da radiação gama natural em solos do Distrito Federal.

A comunidade científica nacional começa a se preocupar e a pesquisar o comportamento de elementos radioativos nos solos, notadamente aqueles utilizados para a agricultura, cujas pesquisas ainda são muito incipientes. Este trabalho pretende contribuir com tal tendência, através das investigações geofísicas e geoquímicas de solos agrícolas.

Para a presente pesquisa foram utilizadas duas áreas experimentais: a primeira (Área 1) está localizada no município de Igaracú - PR, cultivada com soja no verão e trigo no inverno, cujos solos variam de textura argilosa à mista, respectivamente, oriundos das formações Serra Geral e produtos do retrabalhamento desta com a Formação Goio-Erê (Grupo Caiuá). A segunda (Área 2) situa-se no Município de Inajá – PR, cultivada com cana – de – açúcar, objetiva a produção de açúcar e álcool, caracterizada pela predominância de solos de textura arenosa, originados da Formação Goio-Erê (Grupo Caiuá).

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Radiação gama natural

A radiação é uma de radiação eletromagnética com comprimentos 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  $^{40}\text{K}$  e as séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ . Na crosta terrestre K, U e Th ocorrem em abundâncias respectivas de 3%, 3 ppm e 12 ppm. O  $^{40}\text{K}$  corresponde a 0,012% do potássio total, o  $^{238}\text{U}$  a 99,3% do urânio total e o  $^{232}\text{Th}$  a 100% do tório total (Wilford et al., 1997). Ainda segundo tais autores, 90% dos raios gama emanam da camada superficial de solo ou rocha, até profundidades da ordem de 30 - 45 cm.

Radioatividade é a propriedade que alguns tipos de átomos instáveis apresentam de emitir energia e partículas subatômicas, o que se convencionou chamar de decaimento radioativo ou desintegração nuclear. As teorias físicas modernas atribuem a origem da radioatividade a um grau de instabilidade interna do átomo (nuclídeo pai), que ao se converter em outro átomo (nuclídeo filho) alcança maior estabilidade.

Os estudos realizados sobre o fenômeno da radioatividade, a partir do final do século vinte, comprovaram a existência de três tipos de radiações emergentes do interior dos átomos: partículas ou raios alfa, partículas ou raios beta e raios gama.

Segundo Arya (1966), as partículas alfa são caracterizadas por energia pouca penetrativa, sendo barrada por uma lâmina de papel. As partículas beta, apresentam energia penetrativa maior, atravessando facilmente uma lâmina metálica com poucos milímetros de espessura, ionizando o ar por alguns centímetros. Os raios gama podem ionizar o ar até 300 metros, e por isso é registrado em levantamentos aerogamaespectrométricos, além de atravessar lâminas de muitos centímetros de espessura, de diferentes metais.

Quase todos os emissores alfa naturais são encontrados entre os “elementos pesados” das séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . Partículas alfa transportam energia considerável, dissipando cerca de  $\frac{3}{4}$  da energia no decaimento radioativo das séries do urânio e do tório.

Também chamados de partículas beta, de carga negativa ( $\beta^-$ , elétrons) ou positiva ( $\beta^+$ , pósitrons), os raios beta são identificados como partículas de alta energia expelidas pelos núcleos de átomos radioativos. Essas partículas não são constituintes do núcleo, mas surgem durante o decaimento beta, quando o núcleo emite elétrons (ou pósitrons) ou captura um elétron orbital para adquirir estabilidade. As partículas beta possuem menor energia que as alfa, mas apresentam maior poder de penetração, razão pela qual ultrapassam a barreira de lâminas metálicas finas usadas para deter as partículas alfa. Para isolar a radiação beta, é necessário usar lâminas muito mais espessas.

Tendo em vista que o decaimento envolve três componentes (núcleo, partícula beta e neutrino), a energia do raio beta pode ter qualquer valor, desde aproximadamente zero até um máximo definido pelo total de energia disponível no decaimento.

Eletricamente neutros e constituídos de radiação eletromagnética (fótons) de frequência superior ao do espectro da luz visível e a dos raios X, os raios gama são emitidos quando os núcleos efetuam transições, por decaimento alfa, de estados excitados para os de energia mais baixa. Sua energia e capacidade de penetração dificultam a manipulação.

Segundo Minty (1997), a capacidade de penetração dos raios gama é 100 vezes superior ao dos raios  $\beta$ . Por não possuírem carga, não sofrem influência de campos elétricos ou magnéticos. Os raios  $\gamma$  são equivalentes aos raios X, possuem a velocidade da luz e exibem comprimentos de onda entre  $1,7 \times 10^{10}$  e  $4,1 \times 10^8$  cm, ou frequências entre  $3 \times 10^{19}$  e  $3 \times 10^{21}$  Hz. Ao contrário das emissões alfa e beta a radiação gama possui alto poder de penetração, pois não possui massa e carga elétrica. Em rochas e solos possui alcance de penetração de aproximadamente 30 cm, enquanto que no ar atinge centenas de metros.

## 2.2 Processos de decaimento radioativo

O decaimento radioativo é um processo estatístico em que o número de átomos que se desintegra por unidade de tempo é proporcional ao número de átomos presentes (Kaplan, 1978). Alguns nuclídeos são radioativos e decaem produzindo outros nuclídeos:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , que são os mais importantes no mapeamento geológico e para detecção direta do minério de urânio. A maioria das transformações nucleares envolve emissões de partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ).

As partículas ( $\alpha$ ) encerram maior massa e possuem alta probabilidade de colisão com outras partículas. O resultado é que elas têm uma penetração de apenas alguns centímetros no ar, sendo praticamente nula nas rochas. A emissão de uma partícula  $\alpha$  acarreta diminuição do peso atômico em quatro e dois relativamente ao número atômico.

As partículas ( $\beta$ ) são elétrons que resultam da transformação de um neutron em um próton. A absorção completa das partículas  $\beta$  se dá em cerca de 1 metro no ar e têm penetração praticamente desprezível nas rochas.

Os raios ( $\gamma$ ) consistem de radiação eletromagnética de alta energia emitida por um núcleo excitado quando este decai para um estado de menor excitação. A captura de elétron e a fissão nuclear espontânea são outras formas de transformação atômica. O decaimento radioativo é um processo aleatório (randômico), no qual o excesso de energia dos núcleos instáveis são liberados através da emissão de partículas alfa, beta e de raios gama.

A série de decaimento do urânio  $^{238}\text{U}$  resulta em vários produtos-filho até o isótopo estável  $^{206}\text{Pb}$ . No processo, são emitidas radiações gama de muitos níveis discretos de energia. A razão da energia total dos raios gama das séries  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ , no estado natural, é de aproximadamente 50:1, de forma que os níveis ou linhas de energia da série  $^{235}\text{U}$  usualmente são secundárias às da série  $^{238}\text{U}$ . A série  $^{232}\text{Th}$  decai através de dez produtos intermediários para chegar ao  $^{208}\text{Pb}$ , estável. Os gases  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  aparecem, respectivamente, nas séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ . As Tabelas 1, 2 e 3 representam, respectivamente, as séries de decaimento do  $^{232}\text{Th}$ , do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{235}\text{U}$ .



Tabela 1. Série do decaimento radioativo do  $^{232}\text{Th}$ .

NUCLÍDEO	MEIA VIDA	$E_{\alpha}(\text{Mev})$	$E_{\beta}(\text{Mev})$	$E_{\gamma}(\text{Mev})$
$^{232}\text{Th}$ ↓	1,39x1010 anos	3,95 / 4,01		
$^{228}\text{Ra}$	5,75 anos		0,055	
$^{228}\text{Ac}$	6,13 horas		2,11	0,34 / 0,908 / 0,96
$^{228}\text{Th}$	1,913 horas	5,34 / 5,42		0,08 / 0,21
$^{224}\text{Ra}$	3,64 dias	5,45 / 5,68		0,241
$^{220}\text{Rn}$	55,6 segundos	6,30		
$^{216}\text{Po}$	0,145 segundos	6,78		
$^{212}\text{Pb}$	10,64 horas		0,580	0,239 / 0,300
$^{212}\text{Bi}$	60,5 meses	6,05 / 6,09	2,25	0,04 / 0,727 / 1,62
$^{212}\text{Po}$	304 nanoseg.	8,78		
$^{208}\text{Tl}$	3,1 meses		1,80	0,511 / 0,582 / 0,860 / 2,614
$^{208}\text{Pb}$	estável			

Fonte: Adaptada de Minty (1997)

Tabela 2. Série do decaimento radioativo do  $^{238}\text{U}$ .

NUCLÍDEO	MEIA VIDA	$E_{\alpha}$ (Mev)	$E_{\beta}$ (Mev)	$E_{\gamma}$ (Mev)
$^{238}\text{U}$	$4,46 \times 10^9$ anos	4,15 / 4,19		
↓ $^{234}\text{Th}$	24,1 dias		0,103 / 0,191	0,063 / 0,093
$^{234}\text{Pa}$	1,18 meses		2,29	0,765 / 1,00
$^{234}\text{Pa}$	6,7 horas		0,53 / 0,191	0,10 / 0,7 / 0,90
$^{234}\text{U}$	$2,48 \times 10^5$ ano	4,72 / 4,77		0,053
$^{230}\text{Th}$	$7,52 \times 10^4$ anos	4,62 / 4,68		0,068 / 0,142
$^{226}\text{Ra}$	1602 anos	4,60 / 4,78		0,18
$^{222}\text{Rn}$	3,82 dias	5,49		0,51
$^{218}\text{Po}$	3,05 meses	6,11	0,33	
$^{214}\text{Pb}$	26,8 meses		1,03	0,29 / 0,35
$^{218}\text{At}$	2 Segundos	6,65 / 6,70	0,67	
$^{214}\text{Bi}$	19,7 meses	5,61	3,26	0,60/1,12/1,76
$^{214}\text{Po}$	164 $\mu$ segundos	7,83		0,79
$^{210}\text{Tl}$	1,32 meses		2,30	0,296/0,79/1,31
$^{210}\text{Pb}$	~ 22 anos	3,70	0,01 / 0,06	0,04
$^{210}\text{Bi}$	5,02 dias	4,93/4,89/4,59	1,15	
$^{210}\text{Po}$	138,3 dias	5,30		0,80
$^{206}\text{Tl}$	4,19 meses		1,52	
$^{206}\text{Pb}$	estável			

Fonte: Adaptada de Minty (1997)

Tabela 3. Série do decaimento radioativo do  $^{235}\text{U}$ .

NUCLÍDEO	MEIA VIDA	$E_{\alpha}(\text{Mev})$	$E_{\beta}(\text{Mev})$	$E_{\gamma}(\text{Mev})$
$^{235}\text{U}$	$7,13 \times 10^8$ anos	4,36 / 4,39/4,1/4,6		0,14/0,18/0,20
↓ $^{231}\text{Th}$	25,64 dias		0,30	0,02 / 0,08
$^{231}\text{Pa}$	$3,43 \times 10^4$ anos	5,01/4,99/4,94		0,02 / 0,29
$^{227}\text{Ac}$	22 anos	4,95/4,94/4,87	0,04	0,07
$^{227}\text{Th}$	18,17 dias	5,76/5,98/6,04		0,05/0,237/0,31
$^{223}\text{Fr}$	21 meses	5,34	1,15	0,05
$^{223}\text{Ra}$	11,68 dias	5,61 / 4,71/5,75		0,14/0,27/0,33
$^{219}\text{Rn}$	3,92 segundos	6,42 / 6,55/6,82		0,27/0,40
$^{215}\text{Po}$	1,83 msegundos	7,38		
$^{211}\text{Pb}$	36,1 meses			
$^{211}\text{Bi}$	2,16 meses	6,28/6,62	0,6	0,35
$^{211}\text{Po}$	0,52 segundos	7,43		0,57/0,90
$^{207}\text{Tl}$	4,79 meses		1,44	0,89
$^{207}\text{Pb}$	estável			

Fonte: Adaptada de Minty (1997)

### 2.3 Medida radiométrica

Gamaespectrômetros são equipamentos que separam as radiações gama em duas ou mais componentes de energia. O detetor, 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, cujas medidas em Volts são separadas em classes, de modo a obter um espectro de energia dos raios gama incidentes (Hansen, 1975).

Geralmente, nos levantamentos gamaespectrométricos registra-se a energia proveniente dos seguintes elementos/séries:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

O  $^{40}\text{K}$  é medido numa janela de energia na faixa de 1360 a 1560 quilo-eletron-volts (Kev), o equivalente em urânio (eU), relativo ao  $^{214}\text{Bi}$ , na faixa de 1660 a 1860 Kev e o equivalente em tório, relativo ao  $^{208}\text{Tl}$ , na faixa de 2420 a 2820 Kev.

A intensidade destas radiações, emitidas pela superfície, se relacionam com a mineralogia e a química das rochas originais e com o tipo de intemperismo atuante sobre estes materiais. O K é um constituinte comum de argilominerais ao passo que U e Th podem ser retidos por óxidos de ferro e por argilominerais (Wilford et al., 1997).

## 2.4 Radiação gama dos fertilizantes fosfatados e gesso agrícola

Pesquisas recentes no Brasil com elementos radioativos derivados de diferentes formulações de adubos, começam a chamar a atenção da comunidade científica nacional no que concerne aos possíveis efeitos ambientais.

A preocupação com elementos radioativos em rochas fosfáticas iniciou-se em 1908 (Ring, 1977), quando o inglês R. Strutt constatou que os teores em amostras de fosforitas eram algumas vezes maior do que a média em outras rochas (Guimond, 1978). Ainda segundo este autor, aplicações de superfosfato simples e ácido fosfórico culminam em aporte significativo de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{238}\text{U}$ . Para uma camada de 10 cm de solo, aplicando-se 280 Kg de  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ , resultaria na adição de 0,02 Ci  $^{226}\text{Ra}/\text{g}$  e 0,03 pCi  $^{238}\text{U}/\text{g}$ , respectivamente.

Pfister et al., (1976), utilizando técnicas gamaespectrométricas em fertilizantes fosfatados comercializados na Alemanha, observaram que a maioria dos fertilizantes possuía teores significativos de urânio, cujos fosfatos processados naquele país eram importados da África e dos Estados Unidos (Flórida).

Spalding & Exner (1976), estudando a variação temporal de urânio no rio Brazos (EUA), mostraram que o acúmulo de urânio é oriundo de fertilizantes fosfatados. O vale do referido rio considerado um pólo agrícola americano, continha valores de 0,6 a 2,7 ppm de urânio por litro, cujos teores foram comparados com os de amostras coletadas entre 1961 e 1962, as quais indicaram índices de 0,4 ppm de U/L.

Segundo Rothbaum et al., (1979), a apatita contida nos adubos fosfatados é atacada pelo ácido sulfúrico durante o fabrico dos superfosfatos, e o urânio permanece como sulfato de uranila [ $(\text{UO}_2)\text{SO}_4$ ] e sulfato uranoso [ $\text{U}(\text{SO}_4)_2$ ].

Zielinski et al., (1997), detectaram altas concentrações de urânio dissolvido nas áreas agrícolas irrigadas no sudoeste do Colorado (EUA), concluindo que a presença do radionuclídeo tinha origem nos fertilizantes fosfatados.

Zielinski et al., (2000), conduziram outro trabalho nos *Everglades* da Flórida (EUA), objetivando detectar radionuclídeos nas águas dos rios e lagos daquela região e constataram que os teores de U estavam acima da normalidade, concluindo que tais teores estavam relacionados com a atividade agrícola nas áreas vizinhas.

San et al., (1999), investigando a radioatividade em rochas fosfáticas no Sudão, observaram que para dois tipos de rocha (Uro e Kurun), havia teores diferenciados para U e Th, cujos valores médios foram 393,1 Bq/Kg e 6,9 Bq/Kg, respectivamente.

Righi et al., (2000), obtiveram valores de U e Th em amostras de adubos fosfatados (super triplo), cujas amplitudes foram de 948,3 até 1783,5 Bq/Kg e 15,87 até 237,69 Bq/Kg respectivamente; para o monoamônio fosfato determinaram 734,3 Bq/Kg de U e 46,80 Bq/Kg de Th e para o diamônio fosfato, os valores detectados foram 949,56 Bq/kg de U e 74,88 Bq/Kg de Th.

Ogunleye et al., (2002), pesquisando a presença de metais pesados e radioatividade em rochas fosfatadas de Sokoto na Nigéria, concluíram que as mesmas tinham um teor médio de 732 Bq/Kg de urânio.

San Miguel et al., (2003), pesquisando a presença de radionuclídeos nas águas do estuário entre a confluência dos rios Odiel e Tinto na Espanha, em cujo local, muitas empresas de fertilizantes se instalaram nos anos 60, constataram que houve aumento significativo de radioelementos oriundos dos depósitos de gesso, produto da fabricação de adubos fosfatados, carregados para os rios por erosão laminar.

## **2.5 Geoquímica dos radionuclídeos no meio ambiente**

### **2.5.1 Urânio**

O urânio ocorre em baixa concentração na crosta terrestre (aproximadamente 3 ppm), quimicamente dominado por seus estados de valência  $U^{+4}$  e  $U^{+6}$ . O primeiro estado geralmente está contido em minerais não solúveis, enquanto o segundo associa-se com ânions como os carbonatos, os sulfatos e os fosfatos para formarem espécies solúveis ( Dickson & Scott, 1997). A mobilidade do  $U^{+6}$  é modificada pela adsorção a óxidos hidratados de ferro, minerais de argila e colóides, como também pela redução a minerais de  $U^{+4}$  em ambientes redutores. A sua

presença nas rochas ocorre como óxidos e silicatos, uraninita e uranotorita; principalmente em minerais como a monazita, o xenotímeo e o zircão.

O clima quente e úmido reúne as condições necessárias para a lixiviação do urânio das rochas. Neste tipo de clima a grande circulação de águas, em geral ácidas, com oxigênio e dióxido de carbono dissolvidos, é determinante para que os minerais contendo U e Th, exceto os refratários, sejam hidrolisados, oxidados e lixiviados na forma do íon hidroxila  $(\text{UO}_2)^{2+}$ , que em ambiente oxidante tem alta mobilidade e, assim, o urânio passa para a solução do solo (Weidjen & Weidjen, 1995).

Souza (1998), estudando os solos da quadrícula de Araras do estado de São Paulo, concluiu que os resultados radioquímicos de urânio nas amostras de solos analisadas foram superiores aos obtidos por Rothbaum et al., (1979) em pesquisa sobre acumulação de urânio em solos fertilizados com fosfatos por mais de 80 anos.

Ferreira et al.,(2001) em estudos do granito Serra do Carambeí observaram boa correlação dos dados gamaespectrométricos aéreos e terrestres. Os dados de campo confirmaram as anomalias de urânio em áreas de afloramento de diques “félsicos” uraníferos nas extremidades nordeste e sudoeste do corpo.

### 2.5.2 Tório

Segundo Dickson & Scott (1997), o tório pode correr em alanita, monazita, xenotímeo e zircão, em níveis maiores que 1000 ppm ou em quantidades-traço em outros minerais constituintes das rochas. Os principais minerais que contém Th (monazita e zircão) são estáveis durante o intemperismo e podem acumular-se em depósitos de minerais pesados. O tório liberado durante o intemperismo, pode ser retido em óxidos e hidróxidos de Fe e Ti e em argilas. Como o U, o Th pode também ser transportado quando adsorvido em colóides argilosos e óxidos de ferro.

Rebelo (2000), pesquisando modelos sobre rochas graníticas, comenta que o Th decorrente de sua baixa mobilidade geoquímica, permanece fixo durante o intemperismo e a pedogênese. Evidências da sua baixa solubilidade se refletem no equilíbrio com seus produtos de decaimento e em suas baixas concentrações na solução do solo; no entanto, o Th pode ser mobilizado em condições específicas de pH, sobretudo na presença de ácidos húmicos.

Dickson & Scott (1997), mostraram em zonas alteradas a partir de rochas ígneas intrusivas e extrusivas, intermediárias e básicas, variações significativas na interface saprolito-solo. Tais mudanças refletem as perdas de potássio dos feldspatos potássicos e a retenção do U e do Th em óxidos de ferro e argilas ou em minerais resistentes. De modo geral, os dioritos não são

facilmente distinguíveis dos basaltos, pois ambos mostraram retenção de U e Th durante a pedogênese. Ainda de acordo com tais autores, o intemperismo em rochas intrusivas intermediárias revela que não existem mudanças significativas nos teores de radioelementos até a pedogênese, mas geralmente indicam variações abruptas nas concentrações de U e Th na interface saprolito-solo. Os dioritos apresentam um comportamento semelhante aos basaltos, os quais mostram um incremento de U e Th durante a pedogênese.

### 2.5.3 Potássio

As ocorrências mais comuns em rochas são observadas nos feldspatos (aproximadamente 13% de K), nas micas (biotita/muscovita com 8% de K) e em rochas félsica (granitos). Para Dickson & Scott (1997), teores menores são encontrados em basaltos e muito baixos em dunitos e peridotitos. O comportamento intempérico dos minerais potássicos determina o conteúdo deste radionuclídeo em rochas intemperizadas e solos.

Minty (1997) observa que o  $^{40}\text{K}$  representa apenas 0,012% do K total, e que há uma probabilidade de 89% do núcleo  $^{40}\text{K}$  decair por emissão de elétron para  $^{40}\text{Ca}$ , e uma probabilidade de 11% do mesmo decair por captura de elétron para o  $^{40}\text{Ar}$ . Ainda segundo o autor, o  $^{40}\text{K}$  é uma fonte de radiação muito mais discreta do que as séries de U e Th, mas devido a sua abundância na crosta (2%), sua contribuição ao fluxo de radiação natural é considerada como equivalente aos das séries mencionadas. De acordo com Arya (1966), sua meia-vida é de  $1,2 \times 10^9$  anos.

Souza (1998), concluiu que o K na frente de lavra de soleiras de doleito é bem elevado quando comparado com a média verificada nos Latossolos Roxos e menor do que nos Latossolos Vermelhos Escuros. De acordo com a autora, isto provavelmente se deva ao intemperismo, onde nota-se uma depleção do K nos solos mais desenvolvidos. O incremento deste radionuclídeo nas porções mais baixas do terreno pode explicar os elevados índices de potássio por migração nos Latossolos Vermelhos Escuros. As concentrações médias de U, Th e K em diferentes tipos de rochas são sumarizadas na Tabela 4.

Tabela 4. Concentrações médias de radioelementos em diferentes tipos de rochas.

Classes de rochas	Concentrações médias		
	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)
Extrusivas ácidas	4,1	11,9	3,1
Intrusivas ácidas	4,5	25,7	3,4
Extrusivas intermediárias	1,1	2,4	1,1
Intrusivas intermediárias	3,2	12,2	2,1
Extrusivas básicas	0,8	2,2	0,7
Intrusivas básicas	0,8	2,3	0,8
Ultrabásicas	0,3	1,4	0,3
Extrusivas intermediárias alcalifeldspáticas	29,7	133,9	6,5
Intrusivas intermediárias alcalifeldspáticas	55,8	132,6	4,2
Extrusivas básicas alcalifeldspáticas	2,4	8,2	1,9
Intrusivas básicas alcalifeldspáticas	2,3	8,4	1,8
Rochas sedimentares químicas (incluem as carbonáticas)	3,6	14,9	0,6
Carbonáticas	2,0	1,3	0,3
Sedimentares detríticas	4,8	12,4	1,5
Ígneas metamórficas	4,0	14,8	2,5
Sedimentares metamórficas	3,0	12,0	2,1

Fonte: Adaptada de Killeen (1979)

## 2.6 Geoquímica dos Solos

### 2.6.1 Mineralogia dos solos tropicais

O solo é constituído de minerais, poros ocupados por ar, água e material orgânico.

A fração mineral pode ser constituída de partículas de tamanhos variáveis, desde argila (partículas menores que 0,002 micrômetros de diâmetro) até matações e lajes de tamanhos variáveis (tamanhos > 200 mm de diâmetro) (Resende et al., 1995).

Com base no número e no arranjo das camadas tetraédricas (de sílica) e octaédricas (de alumina), contidas nas unidades cristalográficas, as argilas silicatadas podem ser classificadas em quatro diferentes grupos: (a) minerais do tipo 1:1; (b) minerais do tipo 2:1 expansíveis; (c) inexpandíveis e (d) minerais do tipo 2:2 (Brady, 1979).

A fração mineral ou inorgânica representa a maior parte da fase sólida dos solos bem drenados que não apresentam acúmulo anormal de matéria orgânica.

Os minerais do solo costumam ser separados em minerais primários e secundários. Os primários são aqueles que existem normalmente em rochas ígneas e podem persistir no solo. Os minerais secundários são formados pela decomposição dos minerais primários por processos



químicos e recombinação em novos minerais. Os minerais secundários podem formar-se no próprio solo ou, o que é mais comum, durante processos gerais de intemperismo e translocação de elementos químicos, dando origem as de rochas sedimentares.

Kampf & Klamt (1978), comentam que a frequência de distribuição dos minerais nos solos varia com intensidade dos fatores de formação. O material de origem fornece o grupo inicial de minerais que, por sua vez, influi na mineralogia do solo como decorrência de sua suscetibilidade relativa ao intemperismo.

Gunn (1974), estudando uma catena de solos desenvolvidos a partir de basaltos, evidenciou uma mudança mineralógica da fração argila, a qual passou de caulinita para montmorilonita no sentido de solos mais jovens.

A presença dominante de caulinita, quantidades secundárias de materiais amorfos, vermiculita, mica, goethita, hematita e gibsita em Terra Roxa Estruturada de regiões tropicais, submetida a intenso intemperismo foi constatada por Curi (1975) e Galhego & Espíndola (1979).

As condições de clima tropical úmido são muito favoráveis ao acentuado intemperismo, o que se deve à alta temperatura associada com umidade, e uma constante remoção de elementos químicos pela lixiviação promovida pela água que percola através do perfil, situação predominante nas regiões tropicais e subtropicais, cujos solos contém em sua fração argila uma predominância de ferro, alumínio e silício.

Solos cujas texturas predominam areias, contém em geral minerais primários mais resistentes, com destaque para o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), razão pela qual é o mineral mais abundante na maioria dos solos.

## **2.6.2 Capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos**

Nos solos, cujas trocas químicas são regidas por cargas positivas e negativas ocorrem muitos fenômenos na fração argila, sendo um deles o da troca catiônica.

Na maioria dos solos da crosta terrestre, predominam solos com o balanço de cargas negativas denominadas eletronegativas, sendo raro no Brasil a ocorrência de solos com carga eletropositiva (Vieira, 1975).

As cargas negativas dispostas na superfície dos minerais de argila e da matéria orgânica são capazes de adsorver íons com cargas opostas (cátions), como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ , etc. Estes cátions adsorvidos podem ser substituídos, isto é trocados uns pelos outros. A esse fenômeno dá-se o nome de troca de cátions, e ao conjunto das cargas negativas dá-se o nome de capacidade de troca de cátions (Resende et al., 1995).

A propriedade de troca de íons existe em inúmeras substâncias naturais e artificiais. Trocadores de íons são materiais sólidos que apresentam um excesso de carga elétrica, carga esta balanceada por íons trocáveis, de carga contrária, e que ficam adsorvidos na superfície da interface sólido-líquido solos em níveis microscópicos dos solos (Raij, 1983).

Além dos minerais de argila que conferem cargas aos solos, outro elemento de suma importância na dinâmica de adsorção dos cátions é a matéria orgânica. Em solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados, a matéria orgânica é de grande importância como fonte de nutrientes para as plantas.

Em solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados, a matéria orgânica tem grande importância para o fornecimento de nutrientes às culturas, à retenção de cátions à complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, à estabilidade da estrutura, à infiltração e retenção de água, à aeração, etc. (Bayer & Mielniczuk, 1997).

Diferente dos minerais de argila do tipo 2:1, a matéria orgânica dos solos não possui um valor fixo de CTC. Isso ocorre não somente porque a acidez das substâncias húmicas varia diferentemente dos minerais mencionados (Celi et al., 1997), mas também porque a CTC da matéria orgânica aumenta com a elevação do pH em função da ionização de grupos acídicos, principalmente COOH (Velloso et al., 1982).

Em comparação com alguns minerais de argila que apresentam CTC baixa (caulinita: 3 – 5  $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ ; montmorilonita: 80 – 150  $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ ), as substâncias húmicas apresentam CTC que varia de 400 a 1000  $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ , o que explica a sua significativa contribuição na CTC dos solos (Theng et al., 1989).

## 2.7 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica de uma substância, designada por  $\rho$ , é definida como a resistência à passagem de corrente elétrica,  $R$ , oferecida por um cubo de volume unitário desta substância, na direção perpendicular a uma de suas faces, multiplicada pelo comprimento  $L$  da aresta do cubo. A resistividade é expressa em unidade de resistência elétrica multiplicada por unidade de comprimento (Ohm.m) (Koefoed, 1979).

A resistividade elétrica é uma propriedade física de cada substância, tendo sido medida e tabelada para vários materiais. Um material homogêneo e isotrópico vai sempre exibir o mesmo valor de resistividade elétrica, conhecido como a resistividade verdadeira do material. No entanto, as rochas e principalmente os solos, são meios de grandes variações lateral e vertical de características físicas e químicas, as quais se refletem nas determinações da resistividade. As rochas e os solos são bastante resistivos, mas a presença de substâncias metálicas, argilas e sais dissolvidos, podem favorecer a passagem de corrente elétrica. Este fato levou à idealização desse

método inicialmente para prospecção de minerais metálicos, mas ao longo do século XX suas aplicações mais comuns foram àquelas vinculadas com a prospecção de água subterrânea, porque a presença de líquidos em poros e/ou fraturas é o fator que mais comumente determina uma redução da resistividade.

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 e forma 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 dos solos.

Corwin & Rhoades (1984) salientam 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 profundidade onde se concentra a atividade das raízes das plantas.

Shainberg et al., (1980) e Nadler & Frenkel (1980), trabalhando com a condutividade elétrica ao invés de resistividade, mostraram que existe uma relação diretamente proporcional entre a condutividade de solos areno-siltosos saturados e a condutividade intersticial salina.

Segundo (Gallas, 2000), um mesmo tipo litológico pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade, pois, são inúmeros os fatores que interferem no valor da resistividade de um determinado material.

Autores como McBride et al., (1990), consideram que as medidas de condutividade elétrica e, conseqüentemente de resistividade, podem fornecer uma visão integrada dos parâmetros relacionados com a produtividade agrícola.

### 3. HIPÓTESES E OBJETIVOS

#### 3.1 Hipóteses

Tendo-se por base a compreensão do assunto, formulou-se as seguintes hipóteses:

- a) A mineralogia e a matéria orgânica dos solos influenciam na retenção dos elementos radioativos U, Th e K;
- b) O uso intensivo e continuado de fertilizantes fosfatados propicia a acumulação de radionuclídeos no solo;
- c) Avaliar a contribuição da combinação de dados geofísicos e geoquímicos para o entendimento da dinâmica dos radionuclídeos em áreas agrícolas;
- d) A resistividade elétrica pode ser uma ferramenta importante para a discriminação de solos.

#### 3.2 Objetivos gerais

- a) Caracterizar e quantificar as concentrações de K, eU e eTh em solos e fertilizantes;
- b) Relacionar tais concentrações com dados de análises de solos e resistividade elétrica;
- c) Discriminar as concentrações naturais dos radionuclídeos decorrentes de processos pedogenéticos daqueles oriundos de aplicações sistemáticas de fertilizantes fosfatados em culturas de soja, trigo e cana-de-açúcar.

#### 3.3 Objetivos específicos

- a) Fazer a integração e correlacionar os dados geofísico-geológicos e agronômicos para explicitar as relações espaciais entre os dados gamaespectrométricos digitais (K, eU e eTh) de resistividade elétrica e a atividade agrícola desenvolvida nos solos sobre os quais estão inseridas as anomalias geofísicas;
- b) Estabelecer e interpretar as correlações dos dados geofísicos, geológicos e pedológicos, utilizando-se Sistemas de Informações Geográficas (SIGs);
- c) Estabelecer relações entre as anomalias gamaespectrométricas dos solos agrícolas das formações Serra Geral e Goio-Erê.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização geral das áreas da pesquisa

Foram eleitas duas áreas para a presente pesquisa, cuja denominação doravante será: Área 1 e Área 2. A primeira situada no município de Igarauçu-PR, entre as coordenadas UTM 417750 e 420000 m E, 7428250 e 7431250 m N, distante 20 quilômetros do município de Maringá-PR, sendo que a região é considerada pólo agrícola regional. A Área 2 localiza-se no município de Inajá-PR entre as coordenadas UTM 373000 e 375000 m N, 7483784 e 7487646 m N Datum SAD 69. Tal opção deveu-se à busca por áreas com usos agrícolas, tipos de solos e geologia diferentes. A distância entre elas está em torno de 90 quilômetros, ambas localizadas no noroeste do estado do Paraná (Figura 1).

O clima de acordo com a carta climática do Paraná (Iapar, 1978), tendo por base a classificação em Köppen, é Cfa, ou seja, subtropical úmido mesotérmico, verões quentes, com tendência de concentração de chuvas nos meses de verão. A precipitação média anual é de 1492 mm/ano (Rufino et al., 1993).

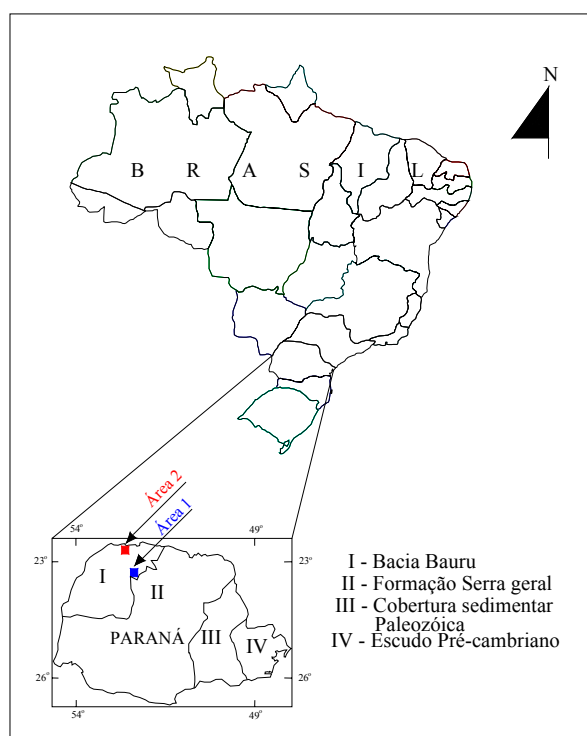


Figura 1. Localização das áreas pesquisadas e compartimentos geológicos do estado do Paraná.

Gimenez Filho et al., (1983) descrevem que na região a paisagem é representada pela ocorrência de relevo de colinas amplas de pequena amplitude com perfil retilíneo, e convexo contínuo e topos extensos planos. As rampas são longas, possuindo apenas próximo aos canais de drenagem declividade mais acentuada.

#### **4.1.1 Área 1**

A área vem sendo cultivada nos últimos 10 anos com soja no verão e trigo no inverno. As culturas que antecederam as atuais foram pastagem e café.



Figura 2. Vista geral da Área 1.

##### **4.1.1.1 Geologia**

Situada no terceiro planalto Paranaense, pertencente ao Grupo Caiuá, a Formação Goio-Erê, apresenta contato transicional com a Formação Serra Geral, (Fernandes & Coimbra, 2000). Ainda segundo os autores, a referida formação é constituída por arenitos quartzosos, marrom-avermelhados e cinza arroxeados, finos a muito finos, mineralogicamente maduros e texturalmente submaturos (Figura 3).

Nas partes mais altas, predominam materiais retrabalhados das formações Goio-Erê e Serra Geral, originando solos de textura mista entre arenitos quartzosos e argila. Na medida em que o relevo fica mais acidentado, predominam solos de textura argilosa, e nas drenagens, ocorrem áreas de contato com a Formação Serra Geral.

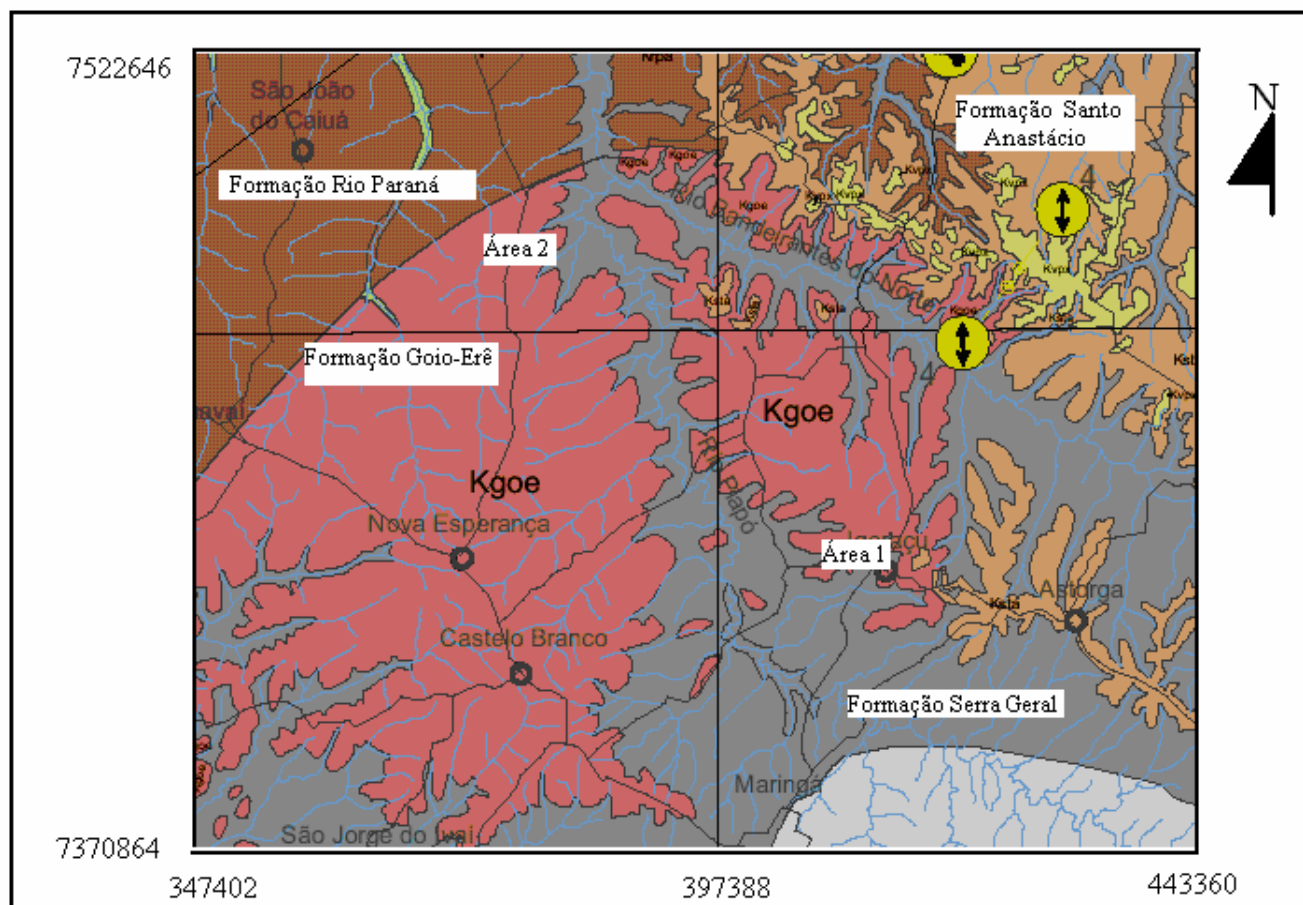


Figura 3. Mapa geológico

Fonte: Adaptada de Fernandes & Coimbra (1994)

#### 4.1.1.2 Solos

Os seguintes solos compõem a área de estudos:

Nitossolo Vermelho Eutrófico;  
Latossolo Vermelho Eutroférico;  
Latossolo Vermelho Distrófico.

#### 4.1.2 Área 2

A área está sendo cultivada com cana-de-açúcar há mais de 5 anos, objetivando a produção de álcool e açúcar, cujo uso anterior era por pastagem.

##### 4.1.2.1 Geologia

Geologicamente inserida no Grupo Caiuá da Formação Goio-Erê (Figura 3), é constituída por arenitos quartzosos marrom-avermelhados a arroxeados, finos a muito finos raramente médios a grossos. Mineralogicamente são supermaturos, com boa maturidade textural. Os arenitos são bem selecionados por lâmina ou estrato, com grãos bem arredondados nas frações mais grossas (Fernandes & Coimbra, 1994).

Segundo Fenandes & Coimbra, (2000), o seu contexto deposicional compreende construções eólicas de grande porte (*draas*), complexos de dunas de cristas sinuosas, amalgamadas, de região central de *sand sea*. A região do Pontal do Paranapanema/extremo noroeste do Paraná, considerada área central do antigo deserto Caiuá.



Figura 4. Vista geral da Área 2



#### 4.1.2.2 Solos

A Área 2 é constituída dos seguintes solos:

Neossolo Quartzarênico Distrófico, textura muito arenosa;

Latossolo Vermelho-Amarelo Epiálico, textura muito arenosa/arenosa;

Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, textura muito arenosa/arenosa.

#### 4.2 Procedimentos metodológicos

Definiu-se malhas de pontos georreferenciados por sistema de posicionamento global (GPS), para cada uma das áreas (Figuras 5 e 6), objetivando a coleta de dados, tanto gamaespectrométricos como geoquímicos (Áreas 1 e 2) e de resistividade aparente (Área 1).

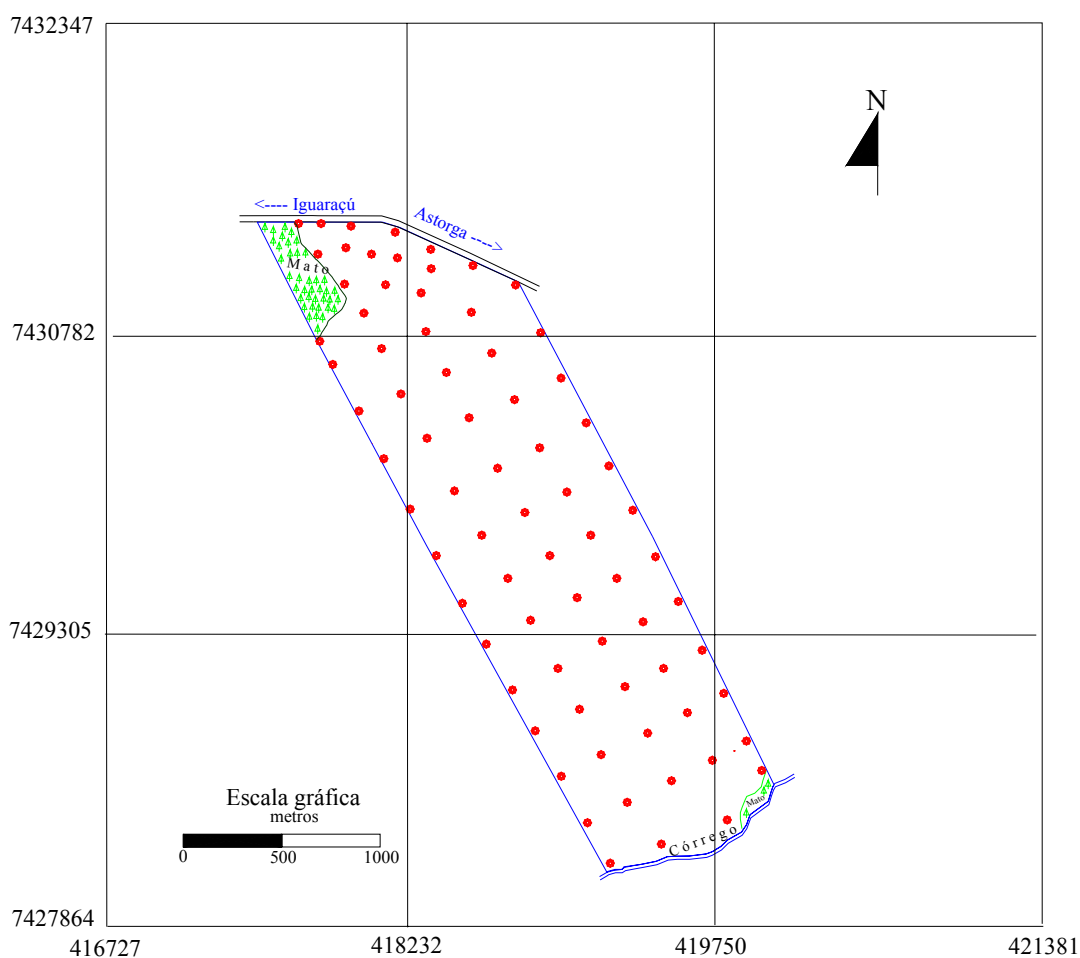


Figura 5. Malha de pontos – Área 1

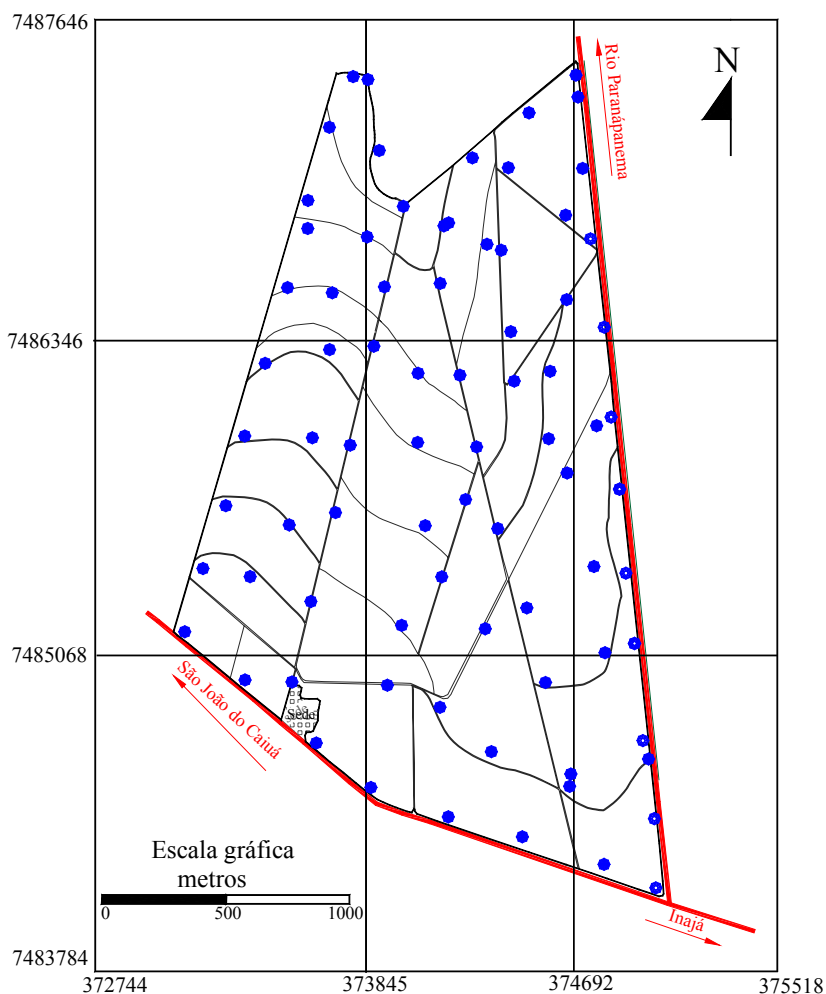


Figura 6. Malha de pontos – Área 2

## 4.2.1 Aquisição de dados geofísicos

### 4.2.1.1 Gamaespectrometria

Utilizou-se o gamaespectrômetro portátil GS-512, fabricado pela Geofyzika (República Tcheca) e comercializado pela Scintrex (Canadá), projetado para operar com 512 canais num intervalo de 0,1 a 3 Mev, pertencente ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR, para a coleta dos dados. O GS-512 consiste de uma sonda (45 cm de comprimento; 12,5 cm de diâmetro e pesa 4,6 kg), a qual encerra um cristal de 76 x 76 mm de NaI(Tl), além de um circuito de detecção e uma fonte radioativa ( $^{137}\text{CS}$ ) de referência. Um outro módulo de (23,5 x 23,0 x 9,0 cm) armazena e processa os dados medidos. Os dados aqui apresentados estão em ppm de K, eU e eTh, mas também em Bq/Kg, no sentido de facilitar comparações com a literatura internacional. Para tanto, as relações adotadas foram as seguintes:

1% de K equivale a 310 Bq/Kg e 1 ppm de U e de Th equivalem a 12,3 e 4,07 Bq/Kg, respectivamente (Sroor et al., 2001).

A maioria dos elementos pertencentes as séries radioativas naturais apresentam número atômico entre  $Z = 81$  e  $Z = 92$  (Arya, 1966). Os elementos de ocorrência natural que produzem raios gama de suficiente intensidade e energia para serem medidos por gamaespectrômetros são o potássio, o urânio e o tório. O potássio é identificado e quantificado pelo instrumento através da absorção de uma energia de 1,46 Mev, correspondente ao único isótopo natural ( $^{40}\text{K}$ ), o qual representa 0,012 % do K total (os outros isótopos não são radioativos e representam, respectivamente, 93,26% e 6,73% do K total). Os isótopos naturais da série do urânio constituem uma mistura, principalmente de  $^{238}\text{U}$  (99,3%) e  $^{235}\text{U}$  (0,7%), representativa de complexas cadeias de decaimento, as quais terminam em isótopos estáveis de  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ , respectivamente. O urânio é detectado pela energia de 1,76 Mev, correspondente a absorção do  $^{214}\text{Bi}$  da série do  $^{238}\text{U}$ , utilizada para identificar e quantificar o urânio natural. O tório natural é essencialmente composto pelo isótopo  $^{232}\text{Th}$  e seus produtos de decaimento, representando 100% do Th total. É identificado pelo pico de  $^{208}\text{Tl}$ , correspondente a uma energia de absorção de 2,62 Mev. Portanto as concentrações de urânio e tório são determinadas indiretamente pelos gamaespectrômetros, razão pela qual são denominadas equivalente de urânio (eU) e equivalente de tório (eTh), respectivamente.

### **Calibração do equipamento**

O instrumento foi calibrado no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em 23 de fevereiro de 2003, segundo procedimentos descritos em Ferreira et al., (2003). O sistema de calibração (Barretto et al., 1986) é constituído por oito blocos cilíndricos (*pads*) de concreto (diâmetro de 3,0 metros; espessura de 0,5 metro; densidade de 2,1 g/cm<sup>3</sup>; volume de 3,53 m<sup>3</sup>; peso de 7,41 toneladas), dispostos nos jardins do IRD/CNEN (0,5 metro acima do nível do mar) ao longo de um círculo com 20 metros de diâmetro, portanto sujeitos a variações climáticas e do radônio atmosférico, o que pode influenciar a quantificação dos teores em função do tempo, embora durante a inspeção visual não tenham sido observadas fraturas nem alterações intempéricas significativas em suas superfícies. Em seu centro, um reservatório de 4,0 metros de diâmetro e 0,7 metro de espessura preenchido por água, foi utilizado para monitorar a radiação cósmica, o radônio e os ruídos instrumentais.

As fontes são constituídas de concreto comum, nas quais foram utilizadas uma mistura de cimento, brita de granito e areia na proporção de 1:2:3, respectivamente. A granulometria do agregado foi menor que 1 centímetro para facilitar a mistura e a homogeneização com material

radioativo. Todas as fontes, exceto o background (BKG), foram contaminadas com material radioativo em diversas proporções e combinações (Barretto et al., 1986). A Tabela 5 mostra as concentrações de K (%), U (ppm) e Th (ppm) das fontes, consideradas em equilíbrio secular, derivadas de um grande número (1.266 determinações válidas dentre 2.180) de análises químicas e por ativação neutrônica, conforme Barretto et al., (1986), indicando as incertezas em termos de um erro padrão da média (Ribeiro et al., 2005), além do número de determinações. As concentrações também foram monitoradas por gamaespectrômetros durante a construção das fontes, do que resultaram teores de K, U e Th recomendados por Barretto et al., (1986). As diferenças em relação a Tabela 5 se concentram, em relação ao urânio, no BKG ( $0,50 \pm 0,01$  ppm), e nos *pads* U1 e UTh2 ( $56,89 \pm 1,15$  e  $38,95 \pm 0,81$  ppm), respectivamente). Já em relação ao tório, o teor recomendado para o *pad* U2 é de  $45,47 \pm 0,57$  ppm. Tais diferenças foram sugeridas por Barretto et al., (1986) para compensar os efeitos de possíveis desequilíbrios na série do urânio, embora Ribeiro et al., (2005) comentem que não existe clareza, sobretudo para os dados radiométricos, para justificar cabalmente a hipótese de desequilíbrio e as conseqüentes correções propostas. Tais autores chamam a atenção para o fato de que a maioria das determinações radiométricas, situam-se num intervalo de dois desvios padrão em torno dos valores obtidos nas análises químicas e por ativação neutrônica.

As leituras de calibração foram tomadas nos *pads* K1, U1, Th1, BKG e sobre lâmina d'água, com tempos de 10 minutos. A radiação cósmica (maior que 3.000 Mev) foi automaticamente monitorada pelo GS-512. Como sabido, as medidas das contagens nos *pads* de calibração, nas janelas K ( $^{40}\text{K} - 1,46$  Mev), U ( $^{214}\text{Bi} - 1,76$  Mev) e Th ( $^{208}\text{Tl} - 2,62$  Mev) guardam relação linear com as concentrações das fontes. Através da subtração das contagens e das concentrações do BKG, deriva um conjunto de três equações com três incógnitas para cada uma das janelas mencionadas. De acordo com o manual do instrumento (Geofyzika, 1998), uma matriz de concentração  $3 \times 3$  [Q], calculada pelos parâmetros representativos dos teores das fontes K1, U1 e Th1 e de um fator geométrico (que para um *pad* cilíndrico é dado por  $G = 1 - h/r$ , onde h (m) é a altura do detetor em relação a superfície da fonte e r é o raio do *pad*; no processo de calibração o sensor foi disposto diretamente sobre o centro das fontes, portanto  $G = 1$ ), está relacionada com uma matriz equivalente de contagens [n], calculada pelas medidas nos *pads* citados, além do BKG e sobre lâmina d'água, e com uma matriz de calibração [C] composta por algumas constantes de calibração, do que resulta a seguinte equação matricial:

$$[Q] = [C] \times [n], \text{ ou } [C] = [Q]/[n]$$

Desta forma, uma vez o instrumento calibrado, foram tomadas leituras em todos os oito pads, com duração de 3 minutos, considerada satisfatória para trabalhos rotineiros de campo. As Tabelas 6, 7 e 8 mostram as concentrações de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm), respectivamente, subtraídas do BKG, de acordo com Barretto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005), Ferreira et al., (2003) e Ribeiro et al., (2005).

A comparação das Tabelas 6 e 8 mostra que as determinações do potássio e do tório, calculadas por Ferreira et al., (2003), estão em conformidade com os dados de Barretto et al., (1986), modificados por Ribeiro et al., (2005). Em relação aos teores de urânio do pad U1 (Tabela 7), foram encontradas diferenças fora do intervalo definido por um desvio padrão em torno dos valores médios das concentrações, também assinaladas por Ribeiro et al., (2005). Verificou-se ainda constantes não significativas nos pads U2 e UTh2 (Tabela 7). Por outro lado, a comparação entre os resultados do potássio determinados por Ferreira et al., (2003) e Ribeiro et al., (2005) mostrou-se satisfatória, à exceção de pequena modificação no pad K2 (Tabela 6). Já para o urânio verifica-se uma diferença em torno de 1 ppm no pad U1, podendo-se considerar desprezíveis as variações nos pads U2 e Th2 (Tabela 7). Em relação ao tório, foram os seguintes os valores encontrados por Ferreira et al., (2003) versus os índices calculados mínimos calculados por Ribeiro et al., (2005) para os pads K1, K2, Th1, UTh1 e UTh2, respectivamente: 15,93 x 16,5; 28,81 x 29,1; 248,63 x 261; 68,81 x 71; 162,11 x 167, 6 (Tabela 8).

Tabela 5. Concentrações dos radionuclídeos nos pads do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica, de acordo com Barreto et al., (1986). As incertezas correspondem às estimativas de desvios padrão e o número de determinações é indicado entre parênteses.

Pads	Concentração de K (%)	Concentração de U (ppm)	Concentração de Th (ppm)
BKG	0,08 ± 0,01 (95)	0,82 ± 0,01 (70)	1,75 ± 0,12 (28)
K1	6,74 ± 0,06 (25)	2,00 ± 0,07 (62)	20,90 ± 0,81 (22)
K2	4,43 ± 0,08 (64)	2,97 ± 0,06 (79)	29,72 ± 1,39 (22)
U1	3,47 ± 0,04 (39)	69,92 ± 0,67 (85)	50,13 ± 0,99 (44)
U2	3,43 ± 0,08 (39)	19,45 ± 0,14 (58)	53,06 ± 1,68 (47)
Th1	3,54 ± 0,07 (52)	11,63 ± 0,15 (37)	255,97 ± 5,25 (47)
UTh1	3,64 ± 0,03 (64)	12,10 ± 0,24 (78)	71,59 ± 1,76 (48)
UTh2	3,65 ± 0,03 (27)	44,47 ± 0,63 (91)	152,39 ± 4,76 (55)

Tabela 6. Comparação entre as concentrações de potássio (k, %) nos *pads* do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica por Barreto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005)<sup>1</sup>, e calculadas por Ferreira et al., (2003)<sup>2</sup> e Ribeiro et al., (2005)<sup>3</sup>.

Pads	Concentração de K (%) <sup>1</sup>	Concentração de K (%) <sup>2</sup>	Concentração de K (%) <sup>3</sup>
K1	6,66 ± 0,32	6,53	6,50 ± 0,16
K2	4,35 ± 0,65	4,89	4,63 ± 0,13
U1	3,39 ± 0,27	3,35	3,40 ± 0,13
U2	3,35 ± 0,51	3,41	3,42 ± 0,13
Th1	3,46 ± 0,52	3,62	3,51 ± 0,22
UTh1	3,56 ± 0,26	3,49	3,55 ± 0,11
UTh2	3,57 ± 0,19	3,47	3,43 ± 0,19

Tabela 7. Comparação entre as concentrações de urânio (U, ppm) nos *pads* do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica por Barreto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005)<sup>1</sup>, e calculadas por Ferreira et al., (2003)<sup>2</sup> e Ribeiro et al., (2005)<sup>3</sup>.

Pads	Concentração de U (ppm)	Concentração de U (ppm)	Concentração de U (ppm)
K1	1,18 ± 0,56	1,70	1,69 ± 0,45
K2	2,15 ± 0,54	1,89	2,11 ± 0,55
U1	69,10 ± 6,20	55,89	57,90 ± 3,20
U2	18,63 ± 1,10	20,04	21,10 ± 1,30
Th1	10,81 ± 0,91	10,82	11,4 ± 1,60
UTh1	11,28 ± 2,10	10,91	10,67 ± 0,94
UTh2	43,65 ± 6,00	37,44	39,90 ± 2,10

Tabela 8. Comparação entre as concentrações de tório (Th, ppm) nos *pads* do IRD/CNEN determinadas por análises químicas e ativação neutrônica por Barreto et al., (1986), modificadas por Ribeiro et al., (2005)<sup>1</sup>, e calculadas por Ferreira et al., (2003)<sup>2</sup> e Ribeiro et al., (2005)<sup>3</sup>.

Pads	Concentração de Th (ppm)	Concentração de Th (ppm)	Concentração de Th (ppm)
K1	19,15 ± 4,00	15,93	17,60 ± 1,10
K2	27,97 ± 6,50	28,81	30,80 ± 1,60
U1	48,30 ± 6,60	45,62	45,10 ± 2,10
U2	51,31 ± 9,80	44,14	46,00 ± 2,10
Th1	254,22 ± 36,00	248,63	271,00 ± 10,00
UTh1	69,84 ± 12,00	68,81	74,10 ± 3,10
UTh2	150,62 ± 35,00	162,11	174,20 ± 6,60

Os dados gamaespectrométricos foram tomados em solos, utilizando-se o valor médio de três leituras por ponto, com tempo de 3 minutos por leitura, de acordo com os pontos indicados

nas Figuras 5 e 6, bem como em solos sob floresta nativa (sem contaminação por atividade antrópica), em amostras de adubos, gesso e rochas. Nos solos, noventa por cento dos raios gama são emanados pela camada subsuperficial, compreendida entre 30 e 45 cm de profundidade (Wilford et al., 1997). As Figuras 7 a 11 ilustram algumas atividades de campo.



Figura 7 Aquisição de dados gamaespectrométricos dos solos - Área 1



Figura 8. Área testemunha (mata) – solo areno/argiloso - Área 1





Figura 9. Área testemunha (mata) – solos argilosos - Área 1



Figura 10. Aquisição de dados gamaespectrométrico dos solos - Área 2





Figura 11. Aquisição de dados gamaespectrométricos do gesso - Área 2

#### 4.2.1.2 Resistividade elétrica – Área 1

Segundo (Koefoed, 1979), a resistividade elétrica de uma substância pode ser definida como a resistência da passagem da corrente elétrica expressa em (Ohm.m).

A resistividade elétrica de solos e rochas está diretamente relacionada com a constituição mineralógica, textura, porosidade, teor de umidade, presença de sais. Neste sentido, por exemplo, solos com maior teor de argila facilitam a passagem da corrente elétrica, ao passo que aqueles onde predominam a textura arenosa irão proporcionar maior resistividade (Fukue et al., 1999).

No método de corrente contínua, usa-se dois eletrodos de corrente (**A e B**) e dois eletrodos de potencial (**M e N**), fixados em linha reta na superfície do terreno. Através dos eletrodos **A e B**, aplica-se uma corrente elétrica medindo-se a diferença de potencial nos eletrodos **M e N**. O solo pode possuir um potencial elétrico natural, denominado potencial espontâneo, o qual deverá ser deduzido da medição obtida com os eletrodos **M e N**. Conhecendo-se a corrente que percorre o subsolo, a disposição dos eletrodos e a diferença de potencial, pode-se calcular o valor da resistividade aparente em cada posição do arranjo.

A resistividade aparente foi determinada sobre os mesmos pontos indicados na Figura 5. O equipamento utilizado foi o resistivímetro ER-300 (Figura 13), cedido na forma de empréstimo pelo Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UNB).

O espaçamento utilizado entre os eletrodos de corrente e de potencial foi de 1 m, segundo o arranjo Wenner, objetivando adquirir valores de resistividade aparente até aproximadamente 50 cm de profundidade. Robain et al., (1996), utilizaram arranjo de eletrodos com espaçamento de 0,1 m, visando obter medidas de resistividade para descrição de perfis de solos lateríticos na República de Camarões. Por outro lado se o interesse é pesquisa geológica, o espaçamento pode variar de alguns metros até quilômetros (Telford et al., 1985).

A resistência é definida pela **Lei de Ohm**, a qual estabelece uma relação entre a corrente elétrica que flui através de um condutor e a diferença de potencial que produz esta corrente. Assim, a corrente (**I**), expressa em ampère (**A**), é proporcional a voltagem (**V**), medida em volt, segundo a expressão  $V = R.I$ , onde **R** é a resistência elétrica do material, cuja unidade no sistema **SI** é **Ohm** ( $\Omega$ ). No entanto, é necessário definir uma propriedade física que descreva a capacidade dos materiais pedolitológicos em transmitir a corrente elétrica em função das dimensões de um dado corpo. Desta maneira, a **resistividade elétrica** ( $\rho$ ) de um corpo pode ser definida da seguinte forma:  $\rho = R.S/L$ , onde **R** é a resistência do material e **S** e **L** representam, respectivamente, a área e o comprimento do mencionado corpo por onde circula a corrente elétrica **I**, sendo a unidade de  $\rho$  no sistema **SI** dada por **Ohm.m** ( $\Omega.m$ ).

Para a aplicação dos conceitos previamente definidos em estudos geofísicos é preciso conceituar o semi-espaço, ou seja, uma porção homogênea e isotrópica do subsolo com resistividade  $\rho$ , no qual flui uma corrente elétrica através de eletrodos cravados no solo. Portanto, o princípio fundamental dos métodos elétricos é baseado na injeção, no terreno, de uma corrente **I**, em ampère (**A**), através de dois eletrodos, **A** e **B**, e na medida da diferença de potencial  $\Delta V$ , em volts (**V**), entre outros dois eletrodos, **M** e **N**, constituindo um circuito como indicado na Figura 12.

Ao utilizar um mesmo arranjo de eletrodos para efetuar medições sobre um meio heterogêneo e anisotrópico, a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) será diferente da registrada sobre um meio homogêneo e isotrópico, pois o campo elétrico sofre modificações em função destas heterogeneidades e anisotropias. Estas últimas características são comuns nos ambientes geológicos subsuperficiais, de maneira que a resistividade varia em cada ponto, representando, pois, uma média de todas as resistividades presentes no semi-espaço onde a corrente circula. Em função desta constatação, utiliza-se o conceito de **resistividade aparente** ( $\rho_a$ ) o qual não obedece mais a **Lei de Ohm**.

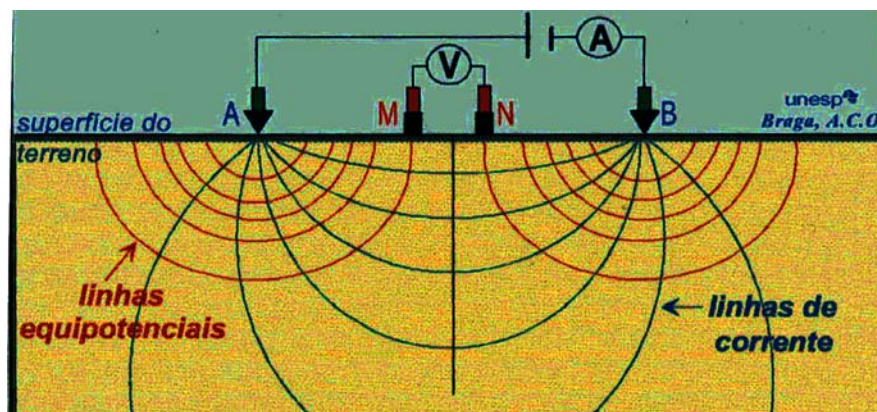


Figura 12 – Princípio dos métodos elétricos indicando as linhas de corrente e de potencial (Fonte: Braga, 2002)

Em outras palavras, a **resistividade aparente** ( $\rho_a$ ) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espço, para a qual contribuem os valores da **resistividade** em cada ponto, a geometria elétrica do terreno e a disposição geométrica dos eletrodos:

$$\rho_a = K * \Delta V/I$$

O fator **K** que multiplica  $\Delta V/I$  é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos **A**, **B**, **M** e **N**. Como existem várias formas de arranjar os eletrodos no terreno, o fator **K** poderá ser calculado através de expressões específicas ou de acordo com a seguinte equação geral:

$$K = 2\pi \cdot (1/|AM| - 1/|BM| - 1/|AN| + 1/|BN|)^{-1}$$

Devido a grande heterogeneidade e anisotropia do meio geológico, é natural que cada tipo litológico apresente uma resposta diferente em relação ao parâmetro físico da resistividade elétrica. De outra maneira, este parâmetro pode refletir diferentes formas de ocorrência de um mesmo material geológico, servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, conteúdo mineral, etc.

Uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como um agregado, com estruturas de minerais sólidos, líquidos e gases, na qual sua resistividade é influenciada pelos seguintes fatores (Braga, 2002):

1. Resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha;
2. Resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;
3. Umidade da rocha;
4. Porosidade da rocha;
5. Textura da rocha, forma e distribuição de seus poros;
6. Processos que ocorrem no contato dos líquidos nos poros e na estrutura mineral.



Figura 13. Aquisição de dados da resistividade elétrica – Área 1

#### 4.2.2 Amostragem de solos

Utilizando-se trado holandês efetuou-se as coletas de solos em ambas as áreas (Figuras 14 e 15). As profundidades amostradas foram de 0 a 20 e 20 a 40 cm.

Através das análises dos solos, determinou-se os seguintes elementos: argila, pH, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, cobre, zinco, ferro e manganês, totalizando 3.808 (tres mil oitocentas e oito análises químicas e físicas).

Os laudos foram emitidos pelo Laboratório de Análise de Solos da Universidade do Estado de Santa Catarina - Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages, credenciado pela Rolas - Rede Oficial de Laboratórios de Solos dos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, cujo controle de qualidade é feito pela EMBRAPA/Passo Fundo-RS. A metodologia das análises foi baseada em Tedesco et al., (1995).

As Figuras 14 e 15 mostram as coletas de solos das áreas pesquisadas.



Figura 14. Coleta de solos - Área 2



Figura 15. Coleta de solos - Área 1



### 4.2.3 Difractometria de raios X

As amostras *in natura* foram quarteadas, pulverizadas e homogeneizadas com água em moinho excêntrico, para preparação das lâminas. A medição dos parâmetros cristalinos foi realizada através da difração de raios X. O equipamento utilizado foi o difratômetro da marca PHILIPS modelo PW 1830, do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná.

Para interpretação dos dados, utilizou-se o software *X Pert HighScore*, que possui um banco de dados de todos os minerais conhecidos, onde é possível, por comparação dos valores dos picos em Angstrom, identificar os minerais.

Para determinação dos minerais utilizaram-se diferentes tratamentos, objetivando a comparação dos difratogramas. Cada um dos tratamentos ocasiona modificações nas estruturas cristalinas evidenciando as seguintes características diagnósticas:

- Análise com lâmina do material lavado, precipitado e seco;
- Análise com lâmina do material tratado com etilenoglicol;
- Análise com lâmina do material aquecido (2 horas) em mufla a 550 °C.

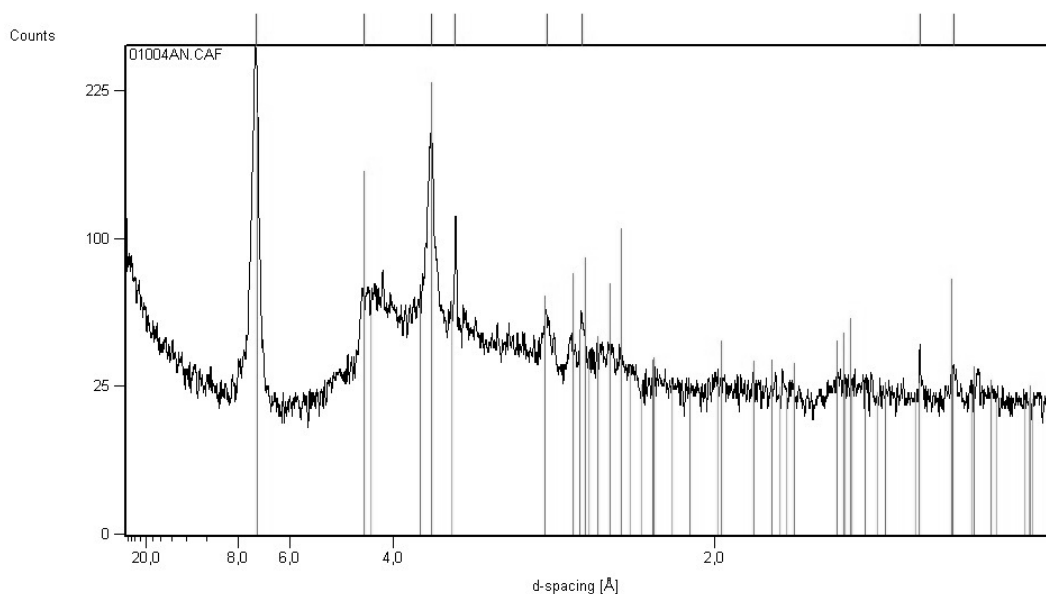


Figura 16. Difratograma de raios X da amostra *in natura*

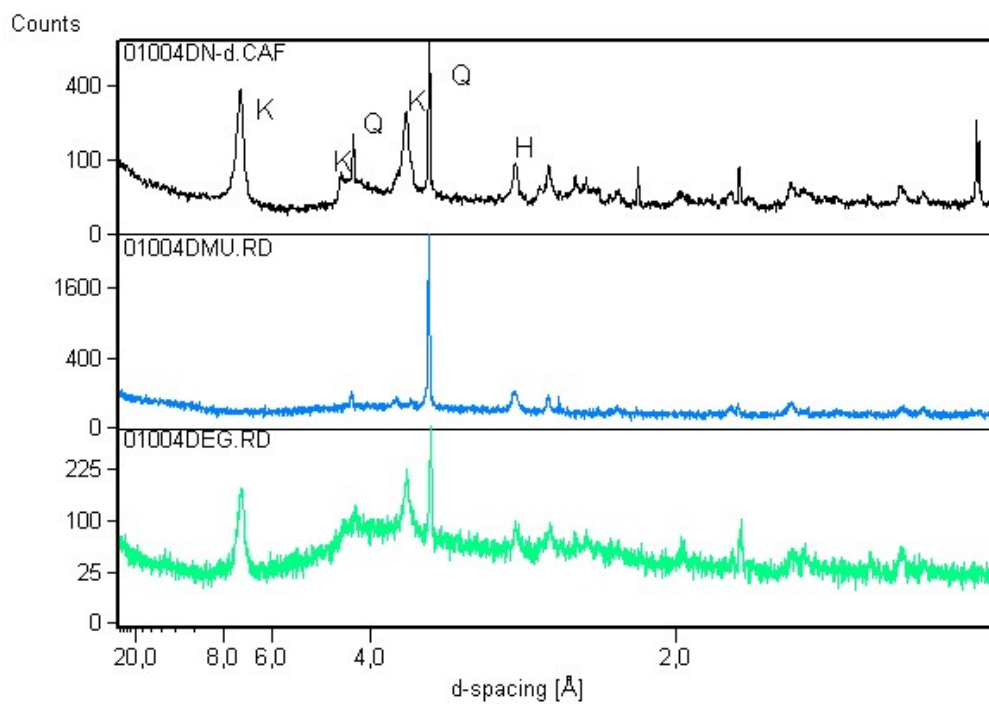


Figura 17. Difratoqramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos. De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol (K = caulinita; H = hematita e Q = quartzo)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Área 1

A Tabela 9 mostra os números de aquisições de dados geofísicos e análises químicas, cujas variáveis estão expressas e quantificadas em suas respectivas tabelas, que serão apresentadas ao longo deste item. As discussões se darão por partes, ou seja, num primeiro momento far-se-á dos dados geofísicos, e, numa segunda etapa com a integração dos dados geoquímicos e geofísicos, objetivando-se estabelecer as possíveis inter-relações entre as variáveis.

Tabela 9. Número de aquisições de dados geofísicos e análises geoquímicas.

Atributos	Geofísica		Geoquímica
	----- Gamasspectrometria	Resistividade aparente	
Solos agrícolas	77	77	1.872
Solo areno/argiloso (testemunha)	20	-	-
Solos argilosos (testemunha)	20	-	-
Adubo fórmula (N-P-K) (5-25-25)	20	-	-
Adubo fórmula (N-P-K) (0-16-26)	20	-	-
Gesso Agrícola (Ca <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	20	-	-
Rochas	20	-	-
Análises mineralógicas	-	-	06
Dados dos perfis dos solos	60		
<b>Total</b>	<b>257</b>	<b>77</b>	<b>1.878</b>



Em função de diferentes tipos de dados, foram elaboradas duas matrizes (matriz 1 e matriz 2) relativas a área onde há atividade antrópica, com as seguintes variáveis nas profundidades de 0 - 20 e 20 - 40 cm: K, eU, eTh, resistividade elétrica, pH, argila, matéria orgânica, pH, fósforo, potássio, matéria orgânica, alumínio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, ferro e manganês.

As discussões se darão com os dados de ambas as matrizes, das áreas testemunhas, dos teores dos radionuclídeos das diferentes formulações de adubos, das concentrações no gesso agrícola e nas rochas das áreas de contato.

Na presente área ocorre três tipos de solos (Figura 18), utilizando-se a nova classificação que entrou em vigor a partir de 1999, cujas correlações com as antigas nomenclaturas podem ser vistas em Prado (2001): Nitossolo Vermelho Eutrófico de textura argilosa (antiga Terra Roxa Estruturada), derivado de rochas basálticas, cuja inserção espacial se dá mais próximo aos canais de drenagens, com relevo mais acidentado; Latossolo Vermelho Eutroférrico (antigo Latossolo Roxo), é um solo mais velho comparativamente ao anterior, de textura argilosa mais profundo, também originado de rochas eruptivas básicas situado em relevo suave ondulado à praticamente plano e Latossolo Vermelho Distrófico (antigo Latossolo Vermelho), oriundo do retrabalhamento das formações Serra Geral e Goio-Erê, cujos teores de argila estão entre 16 e 35%, considerado pedologicamente de textura média, espacialmente distribuído em relevo praticamente plano.

Em virtude dos preços da soja os quais estiveram em alta na bolsa de Chicago (USA) nos anos 2002, 2003 e 2004, o produtor da presente área utilizou o que havia de melhor em termos tecnológicos, ou seja, adubos, gesso, pesticidas e maquinários. Para o plantio de soja e trigo, utilizou-se aproximadamente 100 toneladas de fertilizantes ao ano para ambas as culturas, objetivando altas produtividades.

O volume de fertilizantes é a principal variável que entra na composição dos custos de produção das culturas, influenciando o produtor na tomada de decisão, cuja quantidade a ser utilizada pode variar em função do preço do produto em vigor na época de plantio, bem como nas perspectivas de curto e médio prazo.

A Figura 19 mostra tomada aérea da Área 1, as Figuras 20, 21 e 22 ilustram os perfis dos solos estudados e a Figura 23 o modelo de elevação do terreno.

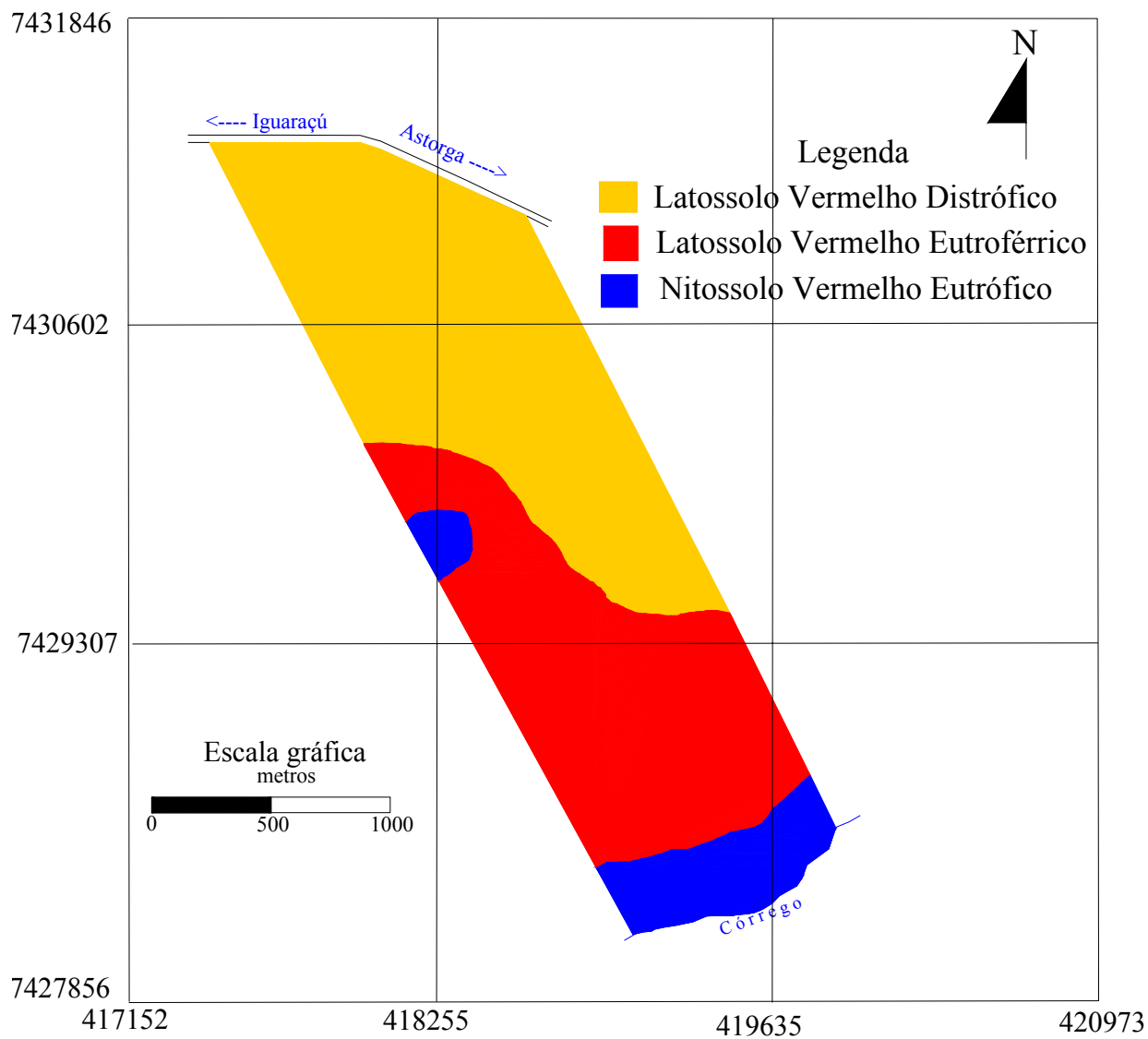


Figura 18. Mapa de solos da Área 1  
Fonte: O autor

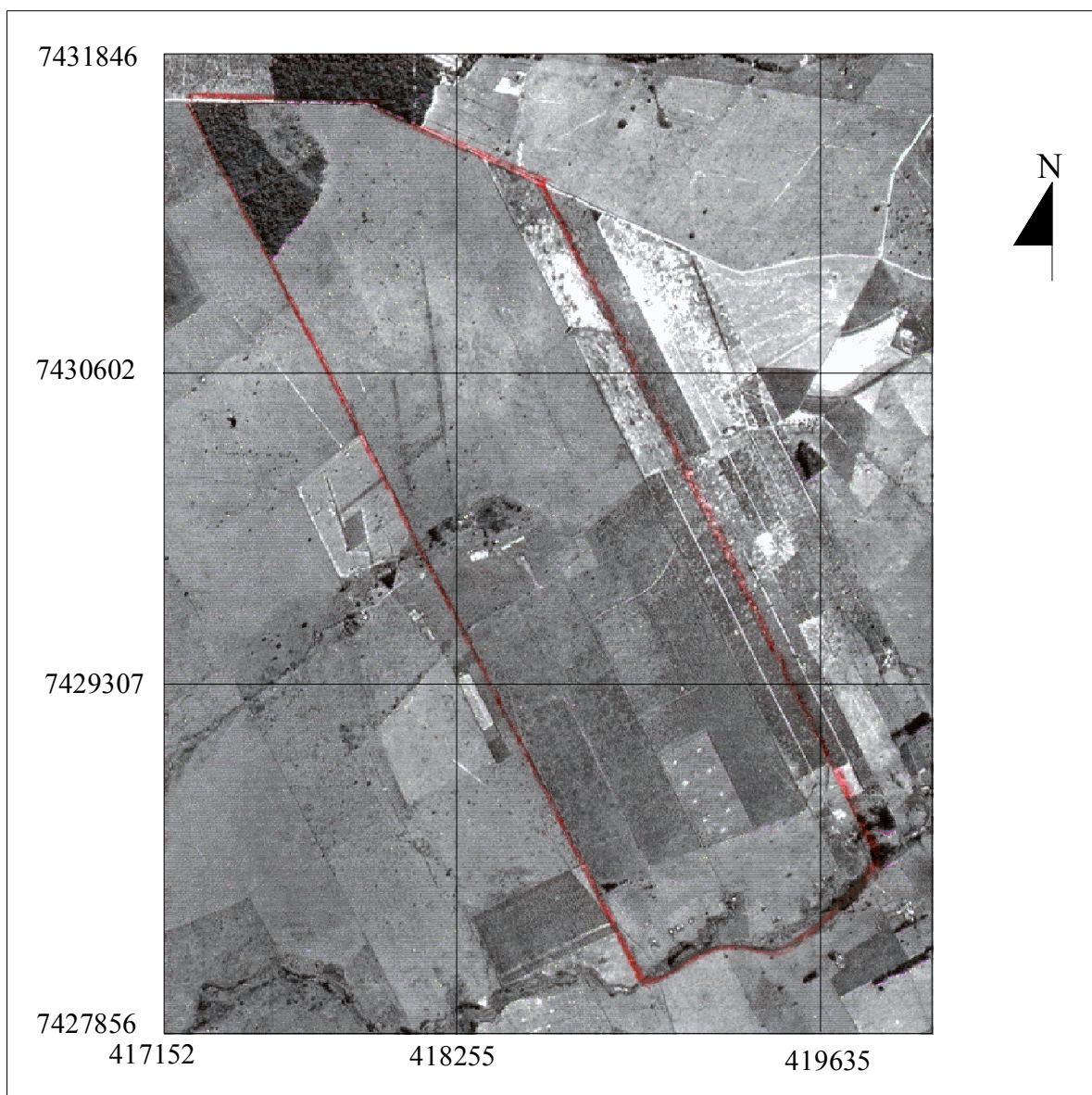


Figura 19. Fotografia aérea do ano de 1980, escala aproximada 1:25.000 - Área 1 delimitada pelo polígono vermelho



Figura 20. Perfil do Latossolo Vermelho Distrófico

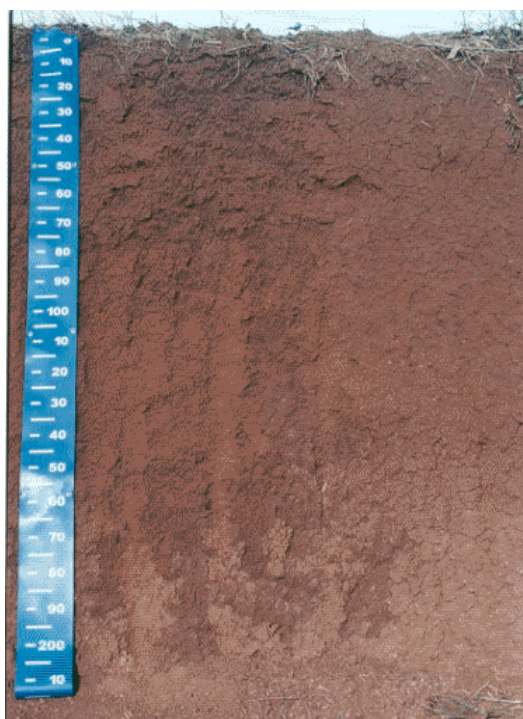


Figura 21. Perfil do Nitossolo Vermelho Eutrófico

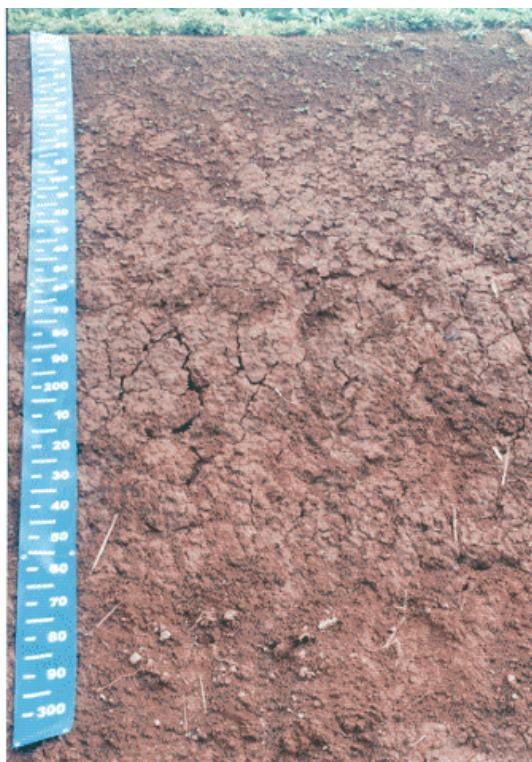


Figura 22. Perfil do Latossolo Vermelho Eutroférrico

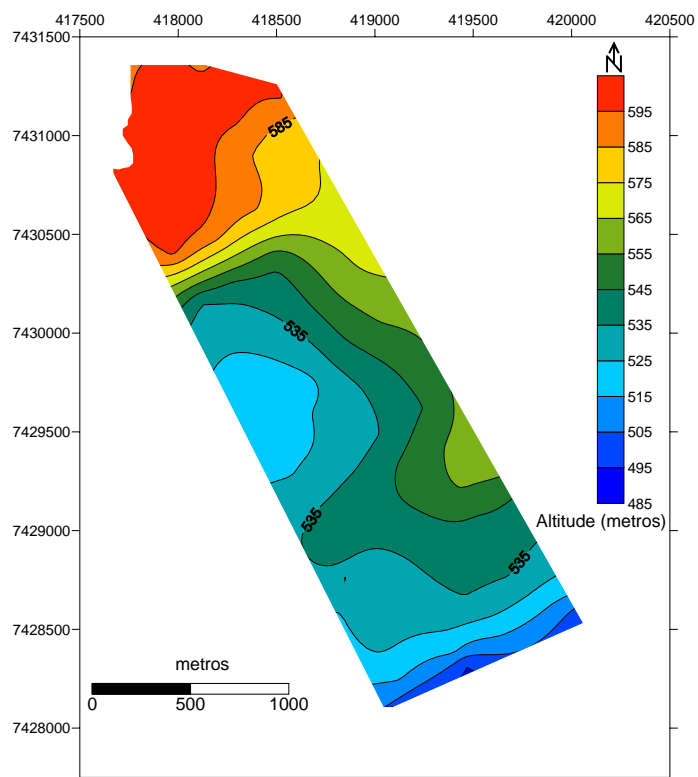


Figura 23. Modelo de elevação do terreno  
Fonte: O autor



### 5.1.1 Dados Geofísicos

#### 5.1.1.1 Correlações entre radiação gama dos solos, adubos, gesso e rochas

Os teores dos radionuclídeos obtidos por espectrometria de raios gama da área com atividade antrópica, podem ser vistos na Tabela 10. Os valores médios dos 77 pontos foram de 54,75 Bq/Kg de K, 10,22 Bq/Kg de U e 7,25 Bq/Kg de Th. Tais valores representam as concentrações dos radionuclídeos, do conjunto dos três tipos de solos (Figura 18). Portanto é de se esperar certo grau de variabilidade, decorrente da diferença nas texturas dos solos, quanto ao teor de argila. O coeficiente de variação, dado em percentagem, é obtido pela relação entre o desvio padrão e a média aritmética. Observa-se que o potássio apresenta variação de 42%, o urânio 48,4% e o tório 60%.

Levando-se em consideração os solos analisados e suas respectivas texturas, os argilosos (Latosolo Vermelho Eutroférico e o Nitossolo Vermelho Eutrófico), apresentaram valor médio de urânio de 14,96 Bq/Kg e o areno/argiloso (Latosolo Vermelho Distrófico) indica teor de 7,03 Bq/Kg (Tabelas 11 e 12). O teor de urânio é duas vezes maior nos solos argilosos, cujo coeficiente de variação foi de 19,92%, representando menor dispersão dos dados, quando comparado com os 48,4% de toda a área.

Tabela 10. Dados geofísicos e resumo estatístico.

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Potássio ----- -----	Urânio Bq/Kg	Tório -----	Resistividade aparente (Ohm.m)	Suscetibilidade magnética (x10 <sup>-3</sup> SI)	
							0-20	20-40
							-----cm-----	
420057	7428567	1	31	14,76	2,04	53	0,91	0,89
419766	7428249	2	62	17,22	2,85	29	0,97	0,95
419462	7428312	3	31	18,45	6,11	57	0,78	0,79
419213	7428109	4	62	13,53	2,44	53	1,1	0,91
420012	7428705	5	62	20,91	1,63	52	0,80	0,83
419795	7428598	6	31	15,99	4,88	73	0,82	0,78
419620	7428510	7	62	14,76	4,07	66	0,87	0,88
419396	7428394	8	31	18,45	10,58	29	0,69	0,71
419125	7428252	9	31	14,76	13,43	81	0,65	0,61
419903	7428910	10	62	15,99	3,26	336	0,52	0,64
419682	7428790	11	93	13,53	7,73	188	0,60	0,66
419456	7428667	12	62	15,99	0,41	300	0,42	0,51
419286	7428582	13	62	11,07	7,33	167	0,81	0,79
419016	7428421	14	62	11,07	8,95	126	0,8	0,82
419766	7429136	15	31	9,84	3,26	120	0,63	0,61

(continua)

Tabela 10. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Potássio	Urânio ----- Bq/Kg -----	Tório	Resistividade aparente (Ohm.m)	Suscetibilidade magnética (x10 <sup>-3</sup> SI)	
							0-20	20-40
							-----cm-----	
419530	7429043	16	93	12,3	8,55	166	0,59	0,58
419259	7428940	17	62	9,84	3,66	314	0,78	0,8
418999	7428844	18	31	15,99	2,04	128	0,69	0,68
418841	7428782	19	93	14,76	1,22	188	0,75	0,72
419653	7429366	20	31	9,84	8,14	413	0,82	0,82
419433	7429233	21	62	13,53	6,51	446	0,59	0,58
419216	7429105	22	62	12,3	3,66	267	0,66	0,65
418984	7428987	23	62	17,22	0,41	201	0,53	0,55
418797	7428876	24	62	18,45	12,21	182	0,61	0,59
419571	7429550	25	31	7,38	0,81	530	0,48	0,55
419351	7429427	26	31	8,61	6,92	419	0,7	0,72
419144	7429318	27	62	9,84	2,85	188	0,68	0,59
418914	7429201	28	62	15,99	0,41	223	0,51	0,56
418684	7429082	29	62	12,3	6,11	145	0,57	0,58
419465	7429744	30	62	7,38	2,04	453	0,56	0,61
419246	7429625	31	31	7,38	3,26	443	0,50	0,49
419005	7429491	32	62	8,61	2,04	111	0,61	0,64
418800	7429356	33	31	17,22	8,55	209	0,49	0,56
418577	7429272	34	0	15,99	1,63	140	0,53	0,54
419352	7429969	35	124	4,92	6,51	401	0,43	0,46
419122	7429842	36	31	6,15	13,02	341	0,46	0,48
418927	7429726	37	62	4,92	9,36	132	0,58	0,61
418703	7429603	38	0	18,45	4,48	25	0,61	0,66
418475	7429460	39	62	17,22	2,04	74	0,94	0,91
419258	7430183	40	62	7,38	9,36	233	0,39	0,41
419022	7430033	41	62	8,61	8,95	283	0,46	0,42
418799	7429903	42	62	11,07	15,47	145	0,42	0,44
418721	7429851	43	62	12,3	9,36	52	0,65	0,66
418663	7429730	44	31	13,53	0,41	34	0,79	0,74
418409	7429605	45	31	17,22	0,81	53	0,80	0,9
419113	7430392	46	62	4,92	5,70	314	0,37	0,41
418870	7430270	47	62	3,69	6,51	556	0,41	0,45
418667	7430147	48	31	6,15	6,92	209	0,46	0,42
418407	7430072	49	62	6,15	2,44	215	0,51	0,48
418155	7430038	50	31	6,15	6,51	144	0,55	0,53
419002	7430621	51	31	4,92	9,77	402	0,39	0,41
418752	7430494	52	31	4,92	10,58	341	0,36	0,38
418503	7430363	53	31	7,38	10,58	226	0,30	0,33
418279	7430247	54	62	6,15	10,58	284	0,42	0,40
418112	7430157	55	62	11,07	13,84	261	0,35	0,33

continua

Tabela 10. Conclusão

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Potássio ----- -----	Urânio Bq/Kg	Tório ----- -----	Resistividade aparente (Ohm.m)	Suscetibilidade magnética (x10 <sup>-3</sup> SI)	
							0-20 -----cm-----	20-40
418883	7430854	56	93	6,15	7,73	308	0,33	0,29
418626	7430735	57	62	6,15	7,73	442	0,40	0,31
418401	7430621	58	62	3,69	8,55	475	0,35	0,32
418180	7430497	59	93	6,15	8,14	571	0,44	0,40
417975	7430407	60	31	14,76	6,51	502	0,47	0,42
418776	7431070	61	62	6,15	14,65	304	0,37	0,38
418555	7430981	62	62	7,38	12,62	426	0,45	0,41
418338	7430910	63	62	4,92	12,21	571	0,37	0,36
418114	7430829	64	62	6,15	17,09	296	0,47	0,42
417808	7430726	65	62	6,15	12,21	258	0,45	0,48
418529	7431181	66	62	3,69	15,47	411	0,39	0,32
418282	7431091	67	62	2,46	13,43	285	0,41	0,40
418062	7431012	68	62	11,07	14,25	550	0,35	0,37
417926	7430973	69	93	8,61	12,62	433	0,34	0,36
418307	7431269	70	31	14,76	8,95	359	0,48	0,41
418008	7431187	71	124	4,92	12,21	380	0,38	0,37
417857	7431094	72	62	11,07	7,73	352	0,29	0,28
418113	7431357	73	62	4,92	8,55	647	0,33	0,31
417949	7431351	74	62	2,46	9,77	477	0,37	0,33
417827	7431348	75	62	3,69	5,70	377	0,31	0,35
417708	7431223	76	31	3,69	9,36	325	0,36	0,38
417672	7431349	77	31	3,69	9,77	513	0,40	0,32
Mínimo			0	2,46	0,41	24,8	0,29	0,28
Máximo			124	20,91	17,1	647,03	1,10	0,95
<b>Média</b>			<b>54,75</b>	<b>10,22</b>	<b>7,25</b>	<b>271,2</b>	<b>0,55</b>	<b>0,54</b>
Desvio padrão			23	4,94	4,35	162	0,18	0,18
Coeficiente de variação (%)			42	48,4	60	59,7	33	33
Assimetria			0,4	0,26	0,15	0,25	0,8	0,50
Curtose			1,18	-1,20	-0,87	-0,90	0,05	-0,80



Tabela 11. Estatística descritiva dos dados geofísicos e dos teores de argila para o solo areno/argiloso.

	Potássio ----- Bq/Kg	Urânio ----- Bq/Kg	Tório -----	Resistividade aparente (Ohm.m)	Argila (%)
Mínimo	31,00	2,46	0,81	131,88	14,00
Máximo	124,00	14,76	17,09	647,03	47,00
<b>Média</b>	<b>57,28</b>	<b>7,03</b>	<b>9,03</b>	<b>367,56</b>	<b>25,20</b>
Desvio padrão	22,61	3,10	3,83	125,35	7,40
Coefficiente de variação (%)	39,47	44,10	42,41	34,10	29,36
Curtose	1,77	0,29	-0,39	-0,60	2,14
Assimetria	0,96	0,91	-0,05	0,08	1,43

Tabela 12. Estatística descritiva dos dados geofísicos e dos teores de argila para os solos argilosos.

	Potássio ----- Bq/Kg	Uranio ----- Bq/Kg	Tório -----	Resistividade aparente (Ohm.m)	Argila (%)
Mínimo	0,00	8,61	0,41	24,79	46,00
Máximo	93,00	20,91	13,43	336,43	92,00
<b>Média</b>	<b>51,00</b>	<b>14,96</b>	<b>4,61</b>	<b>128,23</b>	<b>73,58</b>
Desvio padrão	23,40	2,98	3,74	87,02	12,40
Coefficiente de variação (%)	45,88	19,92	81,13	67,86	16,85
Curtose	0,03	-0,43	-0,37	0,05	-0,66
Assimetria	-0,28	-0,35	0,80	0,86	-0,42

O teor médio de potássio nos solos areno/argiloso foi de 57,28 Bq/Kg ligeiramente maior do que nos solos argilosos, cuja média foi de 51 Bq/Kg. Já o tório indicou 9,03 Bq/Kg no solo arenoso/argiloso, maior do que 4,61 Bq/Kg nos argilosos (Tabelas 11 e 12).

Boyle (1982), observou que os solos apresentaram teores médios de urânio de 12,3 Bq/Kg e de 20,35 Bq/Kg de Th. Souza (1998), obteve valor médio de 85,98 Bq/Kg de U para Latossolo Roxo em área cultivada com cana de açúcar; Kannan et al., (2002), em solos da Índia, encontraram teores que vão desde 16 até 359,65 Bq/Kg de U; Baixeras et al., (2001) citaram 98,89 Bq/Kg de U e Kumru & Bakaç (2003), detectaram teores médios de 135 Bq/Kg de U e 17,05 Bq/Kg de Th. O valor médio de U (toda a área) foi de  $10,22 \pm 4,94$  Bq/Kg e para os solos argilosos foi de  $14,91 \pm 2,98$  Bq/Kg. Para o tório, a média geral foi de  $7,25 \pm 4,35$  Bq/Kg (Tabelas 10 e 12).

Para as áreas testemunhas, cujos solos se encontram sob vegetação nativa, fragmentos de matas consideradas reservas, sem atividade antrópica, os valores estão expressos na Tabela 13, servindo de comparativo para a área cultivada. Para a testemunha com solo areno/argiloso, a média do U foi de 1,97 Bq/Kg, portanto maior do que os 1,41 Bq/Kg dos solos argilosos. Já os teores de K e Th na testemunha com solo areno/argiloso foram respectivamente de 41,9 e 8,91 Bq/Kg, e maiores do que as médias dos solos argilosos, ou seja 26,4 e 1,81 Bq/Kg. Uma possível explicação, reside na idade dos respectivos solos. Os solos argilosos oriundos da Formação Serra Geral são mais velhos, intemperizados e, conseqüentemente mais lixiviados, propiciando percolações de K e Th no perfil. No solo de textura mista, originado do retrabalhamento das formações Serra Geral e Goio-Erê, sendo este último de textura arenosa, cuja deposição é mais recente, pode ter havido contribuição de sedimentos mais concentradas em minerais com potássio.

Comparando-se as médias de K, U e Th dos solos argilosos da área agricultável (Tabela 12), cujos teores médios são respectivamente de 51,0; 14,96 e 4,61 Bq/Kg, maiores do que os teores médios das respectivas testemunhas (26,4; 1,41 e 1,81 Bq/Kg) (Tabela 13), nota-se que os teores são maiores no primeiro trato. Tais diferenças são comprovadas estatisticamente, conforme letras atribuídas às médias, cujo comparativo foi feito pelo teste **t** (Student). Tal fato ocorre também com o solo arenoso/argiloso da área agrícola e da testemunha, exceto pelo fato de que não existe diferença significativa entre as médias do Th para ambas as áreas, conforme indica letras iguais nas respectivas médias. Tais incrementos nos radionuclídeos observados nas áreas agricultáveis podem ser creditados à aplicação de adubos.

As curvas de distribuição dos radionuclídeos da área cultivada podem ser vistas na Figura 24. Tais gráficos referem-se a área geral, sem discriminar tipos de solos. Os coeficientes de

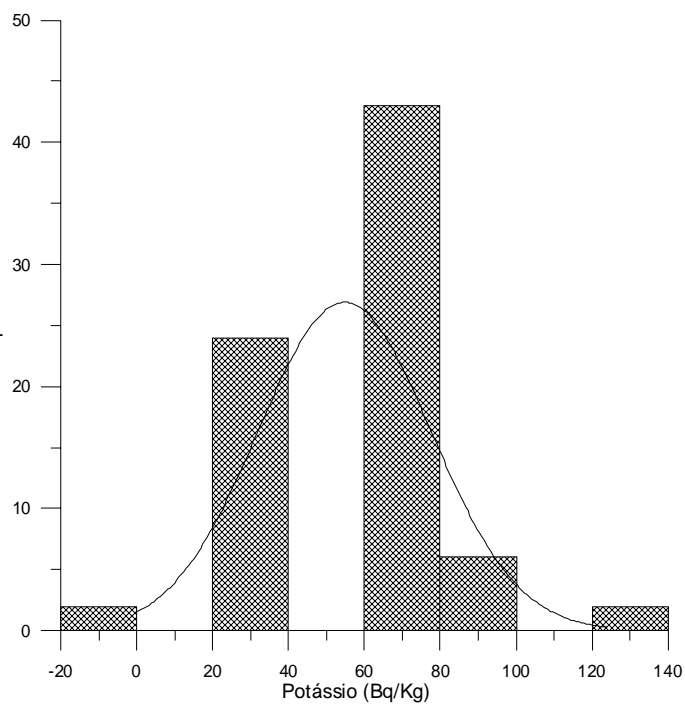
Tabela 13. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos medidos *in loco* nos solos sob floresta nativa (testemunhas).

Amostras	Areno/argiloso			Argiloso		
	K	U	Th	K	U	Th
----- Bq/Kg -----						
01	31	1,23	8,14	31	2,46	1,63
02	31	0	11,8	0	1,23	2,44
03	31	0	9,36	0	0	2,85
04	62	6,15	8,55	31	1,23	0,81
05	31	4,92	7,33	31	2,46	1,22
06	31	0	9,77	0	0	2,03
07	62	3,69	9,36	0	1,23	3,66
08	31	2,46	7,73	0	1,23	0,81
09	31	1,23	7,32	31	0	1,63
10	0,0	0	8,14	62	2,46	2,03
11	31	2,46	8,95	31	0	2,85
12	0	1,23	8,55	0	1,23	2,44
13	62	2,46	10,91	0	1,23	1,63
14	31	0	10,53	31	2,46	2,04
15	62	2,46	9,77	62	1,23	3,26
16	31	2,46	8,55	31	1,23	1,22
17	93	3,69	7,73	62	2,46	1,63
18	62	2,46	8,14	31	2,46	0,81
19	62	1,23	8,95	31	1,23	0,40
20	62	1,23	8,55	62	2,46	0,81
Mínimo	0	0	7,32	0	0	0,40
Máximo	93	6,15	11,8	62	2,46	3,66
<b>Média(*)</b>	<b>41,9a</b>	<b>1,97c</b>	<b>8,91e</b>	<b>26,4f</b>	<b>1,41h</b>	<b>1,81j</b>
<b>Média(**)</b>	<b>57,28b</b>	<b>7,03d</b>	<b>9,03e</b>	<b>51,0g</b>	<b>14,9i</b>	<b>4,61k</b>
Desvio padrão	23,10	1,71	1,19	23,1	0,92	0,90
Coefficiente de variação (%)	55,20	86,90	13,40	87,7	64,8	49,8
Assimetria	0,15	0,81	0,87	0,25	-0,25	0,39
Curtose	0,08	0,47	0,47	-1,04	-1,04	-0,59

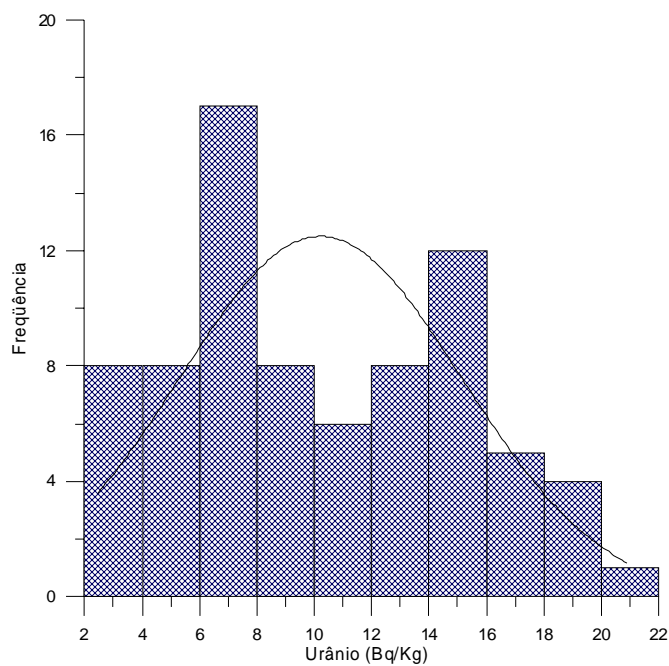
Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente a 5% pelo teste t.

(\*) média das testemunhas; (\*\*) média dos solos areno/argiloso e argilosos respectivamente.

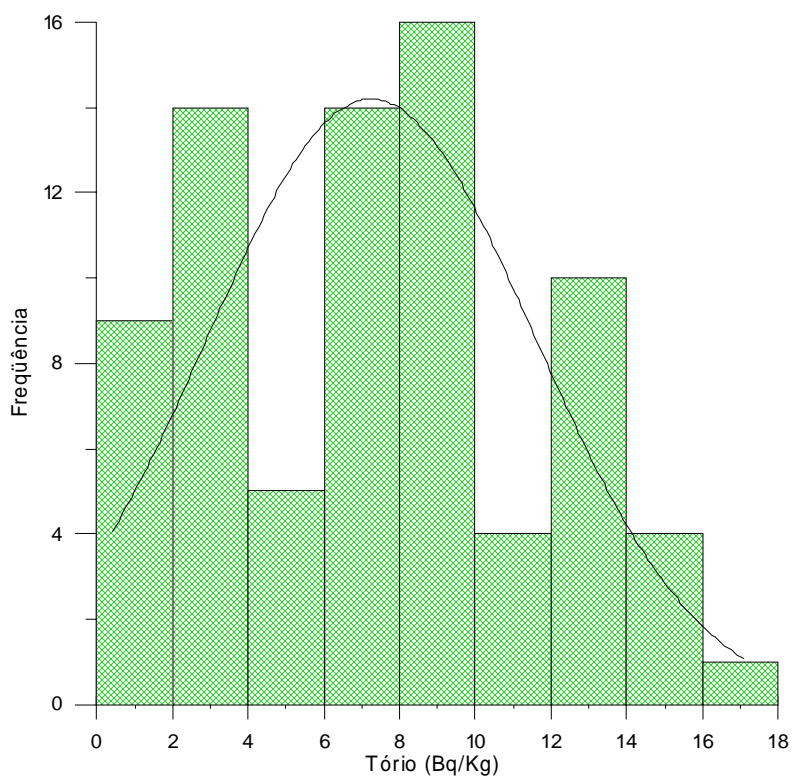
assimetria para o K, U e Th são respectivamente de 0,4; 0,26 e 0,15 (Tabela 10), mostrando que os valores dos mesmos demonstram um comportamento levemente assimétrico positivo, porém com tendência a normalidade, cujos coeficientes de assimetria e curtose para uma distribuição normal deveriam ser, respectivamente de, 0 e 3 (Snedecor & Cochran, 1967).



(a)



(b)



(c)

Figura 24. Histogramas com curvas de distribuições dos radionuclídeos da área cultivada

A distribuição espacial dos radionuclídeos encontra-se nas Figuras 25, 26 e 27. Observa-se pela Figura 25, do urânio, que a maior concentração de radioatividade ocorre nas partes mais argilosas onde ocorrem os solos Nitossolo Vermelho Eutrófico e Latossolo Vermelho Eutroférico (Figura 18).

A espacialização do tório (Figura 26), evidencia que a maior parte da radioatividade coincide com exposição do Latossolo Vermelho Distrófico (Figura 18), talvez pela permanência de minerais resistatos, como indicado no perfil deste solo (Figura 29).

O mapa referente ao potássio (Figura 27), mostra que a parte mais radioativa se concentra na área com solo de textura mais arenosa, refletindo a possível presença de minerais contendo potássio, fato corroborado por Nascimento (2003). Também é possível constatar tal afirmação, analisando-se a Figura 28, que exprime a relação K/U, onde se insere o Latossolo Vermelho Distrófico. Contudo as difratometrias de raios X não constataram minerais que possuam potássio em sua constituição, possivelmente por ter sido analisado apenas duas amostras para esse tipo de solo.

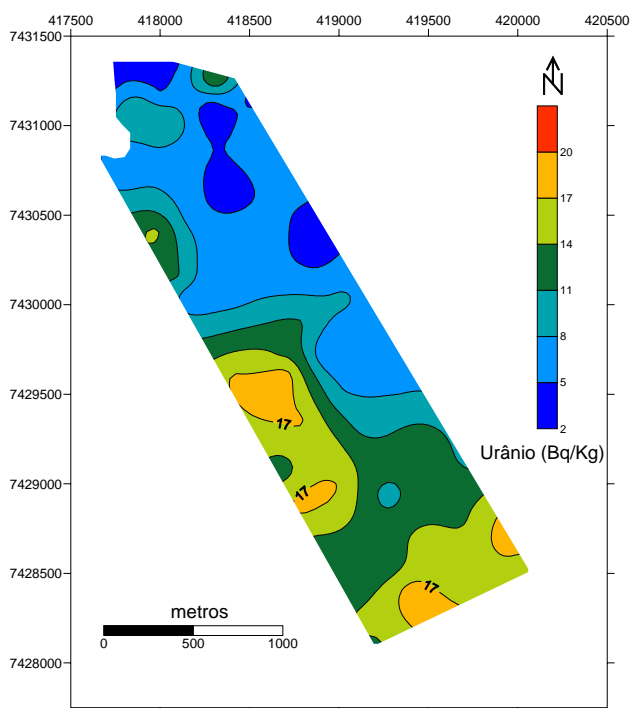


Figura 25. Distribuição espacial do urânio

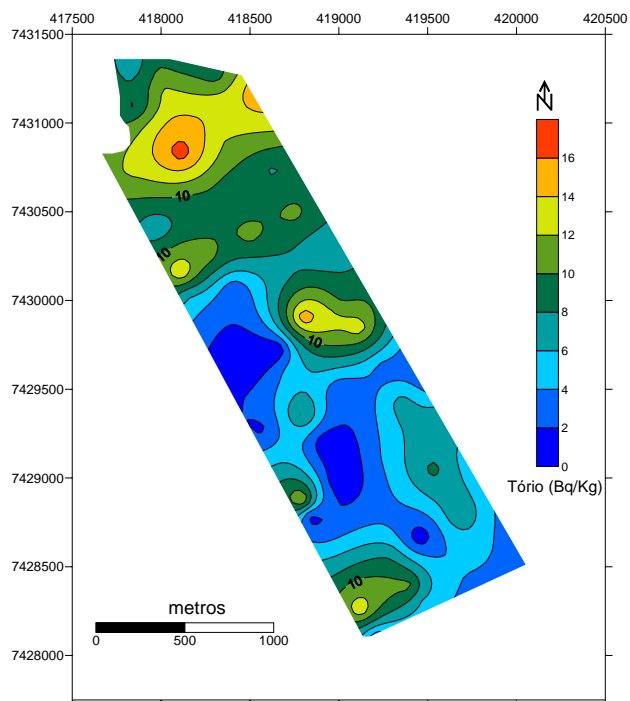


Figura 26. Distribuição espacial do tório

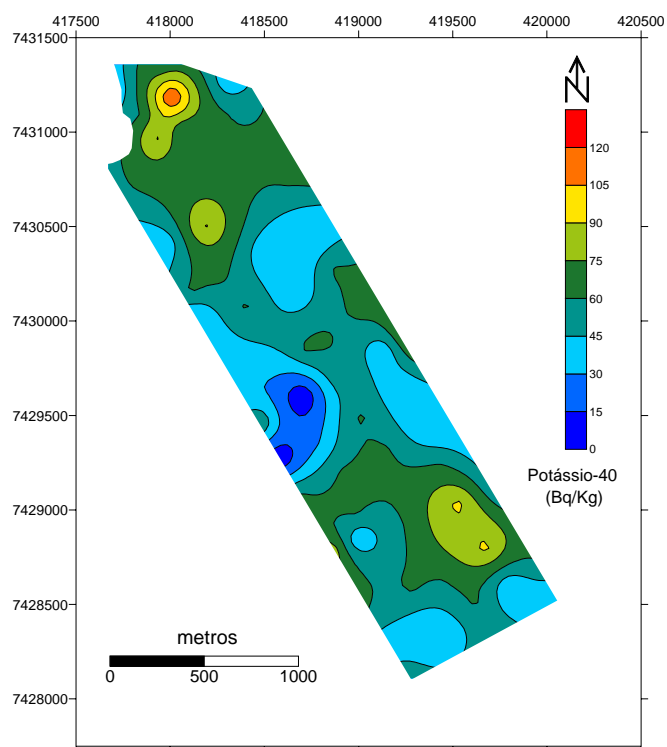


Figura 27. Distribuição espacial do potássio

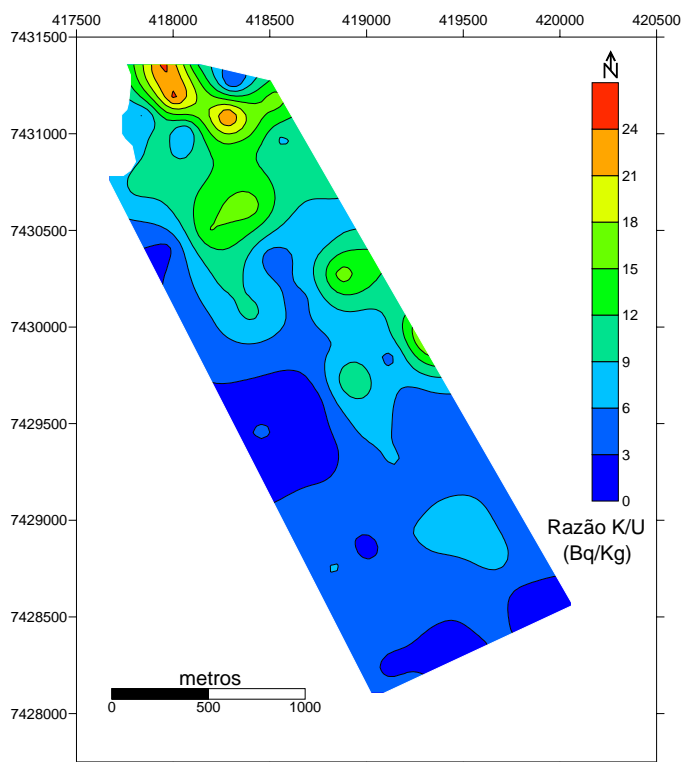


Figura 28. Distribuição espacial da relação potássio/urânio

Os valores da radioatividade obtidos nas rochas eruptivas básicas nas áreas de contato estão expressos na Tabela 14. Os teores médios de U e Th foram 23,67 e 11,14 Bq/Kg respectivamente que, comparativamente aos divulgados por Marques (1988) em derrame de basalto na Bacia do Paraná, mostram valores semelhantes para o U (26,81 Bq/Kg), porém muito diferentes para o Th (1,59 Bq/Kg). Rochas ígneas apresentam variações quanto aos teores de potássio, urânio e tório, onde as félsicas apresentam maiores concentrações de elementos radioativos, em relação às máficas.

Dickson & Scott (1997), enfatizaram que para um tipo de rocha, pode haver ampla variação das concentrações dos radioelementos. Os referidos autores analisaram teores de elementos radioativos em vários tipos rochas da Austrália, mostrando que devido a grande dispersão dos teores em cada classe de rocha, não é possível estabelecer uma classificação petrográfica com base nas concentrações de radionuclídeos.

De acordo com Wilford et al., (1997), durante o intemperismo químico e físico, os radioelementos são liberados da rocha, redistribuídos e incorporados ao regolito/solo. Em muitos casos, as características dos elementos radioativos de regolitos, podem em muito diferir da origem, devido à reorganização textural e geoquímica que ocorre no perfil intemperizado.

As Figuras 29, 30 e 31 mostram a distribuição dos radionuclídeos nos perfis dos três solos. As concentrações dos radionuclídeos no perfil do Latossolo Vermelho Distrófico (Figura 29) de textura areno/argilosa, mostram-se mais altos nos primeiros 60 cm do perfil e vão diminuindo até a profundidade aproximada de 2,2 metros. Tal fato possivelmente, esteja vinculado à lixiviação de tais elementos para as camadas mais profundas. A percolação de água neste tipo de solo favorece a migração de cátions, devido à textura arenosa do mesmo, cuja macroporosidade é maior, comparativamente a solos de textura argilosa.

Para os perfis dos solos argilosos, como o Nitossolo Vermelho Eutrófico e o Latossolo Vermelho Eutrófico (Figuras 30 e 31), os teores de U e Th são mais elevados nos primeiros 40 cm e vão diminuindo na medida em que aumenta a profundidade dos solos. As concentrações voltam a aumentar em função da aproximação com o material de origem destes solos, rochas eruptivas básicas, cujos teores nas rochas são maiores do que nos primeiros 40 cm dos solos. Uma possível explicação para tal comportamento, está na localização de tais solos em região subtropical úmida, com precipitações médias de 1.492 mm/ano (Rufino et al., 1993), aliado ao intemperismo físico/químico principalmente do Latossolo Vermelho Eutrófico, mais velho e mais profundo.



Tabela 14. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos medidos em rochas eruptivas básicas.

Amostras	Potássio	Urânio	Tório
	----- Bq/Kg -----		
01	124	3,60	0,81
02	124	20,91	0,40
03	155	2,46	3,256
04	124	11,07	7,73
05	403	27,06	13,43
06	217	39,36	7,32
07	341	14,76	9,36
08	496	20,91	8,55
09	496	27,06	11,80
10	682	24,60	21,97
11	465	19,68	17,91
12	465	35,67	10,58
13	465	43,05	16,28
14	434	50,43	6,51
15	403	45,51	14,65
16	806	18,45	18,72
17	248	28,29	8,14
18	651	12,30	23,60
19	434	19,68	8,54
20	465	8,61	13,20
-----			
Mínimo	124	2,46	0,40
Máximo	806	50,40	23,60
<b>Média</b>	<b>400</b>	<b>23,67</b>	<b>11,14</b>
Desvio padrão	191,1	13,62	6,42
Coefficiente de variação (%)	47,80	57,50	57,60
Assimetria	0,17	0,39	0,23
Curtose	-0,26	-0,54	-0,40

Dickson e Scott (1997) observaram mudanças significativas dos elementos radiogênicos em solos oriundos de rochas máficas na Austrália. O basalto originou solos com perdas de até 50% de K e aumento do U e do Th. Tais solos mostraram teores de U e Th muito próximos de rochas félsicas. Ainda segundo os autores, em áreas dominadas por solos mais profundos, fortemente intemperizados, também derivados de rochas basálticas, houve diminuição de K e a resposta gamaespectrométrica do U e do Th foram semelhantes àquelas obtidas para solos derivados de rochas félsicas. Tal comportamento difere do presente estudo, possivelmente em função da pluviosidade de 1.492 mm/ano (Rufino et al., 1993) na área pesquisada, proporcionando maior percolação dos radionuclídeos ao longo dos perfis dos solos, diferentemente de um clima mais seco como ocorre na Austrália, acarretando teores mais concentrados dos referidos elementos nos perfis daqueles solos. Condição climática análoga ao da Austrália, é àquela que ocorre em algumas partes do nordeste brasileiro, onde determinados solos acumulam teores elevados de sais em subsuperfície, oriundos do processo por capilaridade.

Dowdall & O’Dea (2002) estudando a radioatividade em perfis de solos orgânicos na Irlanda, observaram que há um acréscimo de U nos perfis onde a oxidação da matéria orgânica é significativamente reduzida, o que acontece a partir de aproximadamente 15-20 cm de profundidade, cuja ausência de oxigênio origina um ambiente predominantemente redutor, desacelerando a decomposição da matéria orgânica pelos microorganismos do solo, e, conseqüentemente aumentando a capacidade de troca catiônica de tais solos, o que culminaria com o aumento da retenção do U.

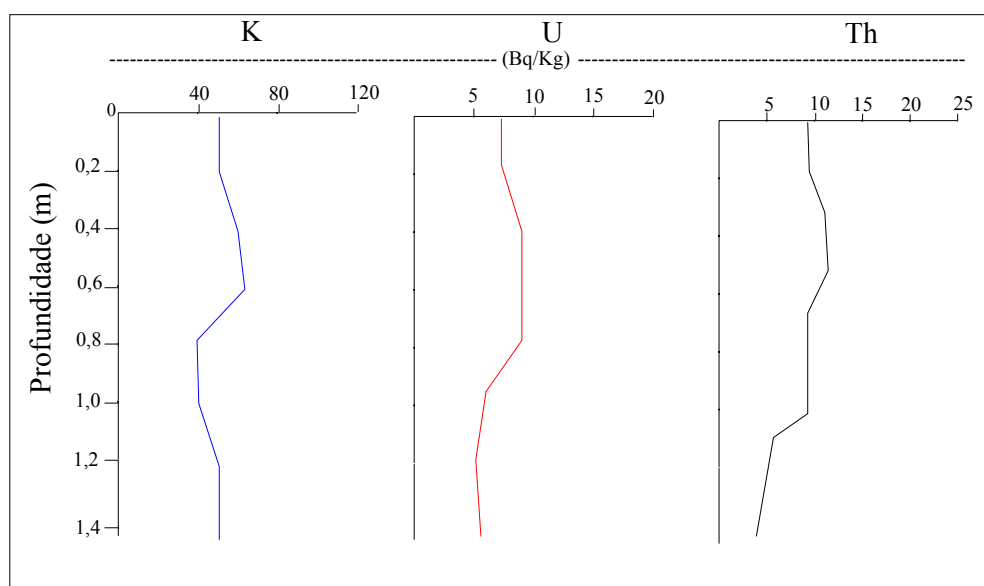


Figura 29. Variações dos teores dos radionuclídeos no perfil do Latossolo Vermelho Distrófico

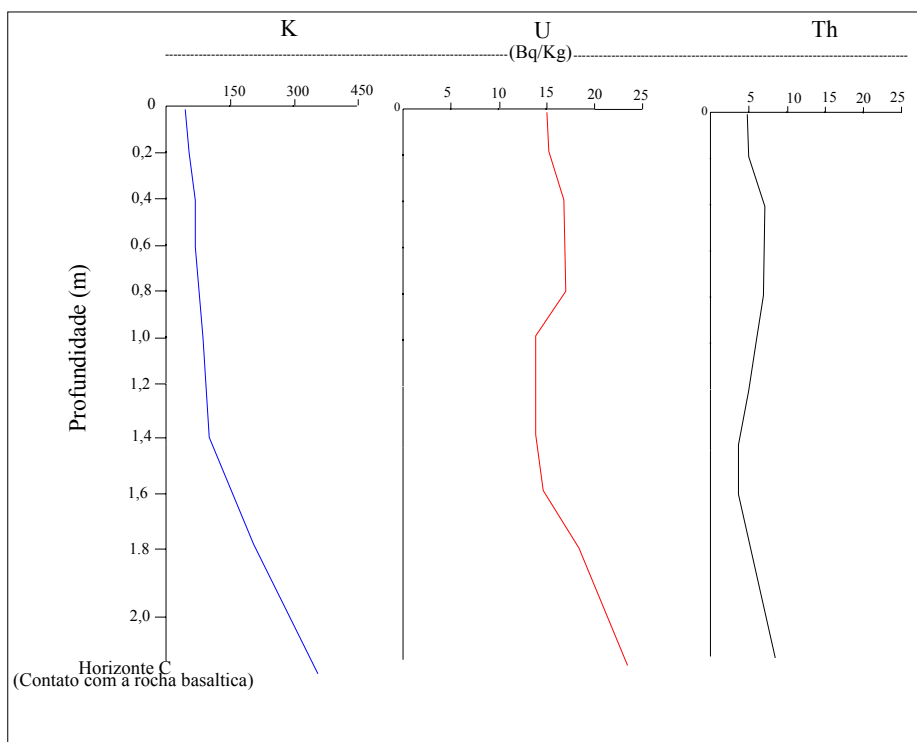


Figura 30. Variações dos teores dos radionuclídeos no perfil do Nitossolo Vermelho Eutrófico

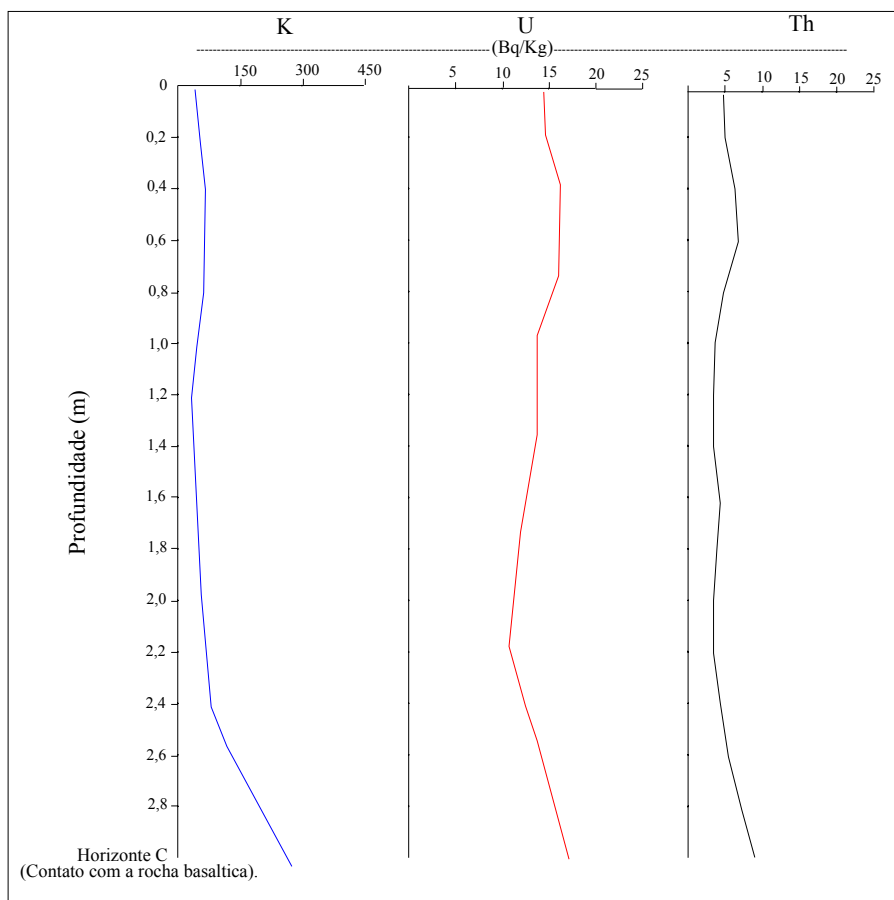


Figura 31. Variações dos teores dos radionuclídeos no perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico

Os teores dos radionuclídeos tomados por amostragens no depósito de adubos, num total de 20 determinações para cada formulação e em pilhas de gesso (Tabela 16), mostraram grande variabilidade nas concentrações dos radioelementos, principalmente para os adubos. Para estes, as amplitudes de K, U e Th foram de 522,4 a 603, 58 a 647,60 e 10,82 a 753,90 Bq/Kg respectivamente, cujas médias foram de 562,7; 352,8 e 382,3 Bq/Kg. Na Tabela 12 encontram-se alguns estudos referentes aos teores de eU(Bq/Kg) determinados em fertilizantes fosfatados para diferentes países, comparativamente à este trabalho.

Paschoa et al., (1984) analisaram as concentrações de U (Tabela 17), em amostras de vários tipos de adubos e obtiveram como média 1044,26 Bq/Kg; Yamazaki & Geraldo (2003), estudando os teores de U em amostras de adubos N-P-K de diversos fabricantes brasileiros (Tabela 18), determinaram valores, cuja amplitude variou desde 63, 59 a 667,89 Bq/Kg, com média de 333,25 Bq/Kg.

Segundo Pfister et al., (1976), as diferenças nas concentrações da radioatividade de vários produtos, são atribuídas principalmente ao modo de fracionamento durante a reação química na fase de acidulação da produção do ácido fosfórico. Produtos como o MAP (mono amônio fosfato), mostraram que as concentrações de rádio são dez vezes maiores do que a de urânio, face ao processo de fabricação do referido fertilizante, que utiliza amônia por não ter reação direta com a rocha fosfática, ao contrário do ácido fosfórico que é rico em urânio.

Os teores médios dos radionuclídeos encontrados nas amostras de gesso foram de 51,1, 607,31 e 170,33 Bq/Kg de K, U e Th, respectivamente (Tabela 16), comparativamente àqueles encontrados por Bolivar et al., (1995) 600 Bq/Kg de U em depósitos de gesso em fábricas de fertilizantes. Aguirre et al., (1995) citaram intervalos de 4,3 a 502 Bq/Kg de U e de 2,4 a 156 Bq/Kg de Th em sedimentos de rios próximos a fábrica de fertilizantes. Mazzili et al., (2000), amostraram porções de gesso de quatro fabricantes (Tabela 16) e detectaram valores médios dos radionuclídeos de 17,75, 27,75 e 128 Bq/Kg, respectivamente de K, U e Th.

Tabela 15. Comparativo das concentrações de  $^{238}\text{U}$  em fertilizantes fosfatados para diferentes países.

Países	eU(Bq/Kg)	Métodos de determinação	Referências
EUA	109 – 2718	Espectrometria de raios gama	Hermamo et al., (1995)
Yugoslavia	724 – 1993	Espectrofotometria	Vucic & Ilic (1989)
Croácia	812 – 1562	Espectrometria de raios gama	Barisic et al., (1992)
Brasil	58 – 647	Espectrometria de raios gama	Este trabalho

Tabela 16. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos em amostras de adubos e gesso.

Amostras	Adubos/formulações (N-P-K)						G e s s o		
	5 – 25 – 25			0 – 16 – 25			K	eU	eTh
	K	eU	eTh	K	eU	eTh			
----- Bq/Kg -----									
1	372	911,43	985,34	527	57,81	8,95	31	656,82	183,96
2	992	635,91	733,82	527	56,58	14,65	93	552,27	175,82
3	651	403,44	571,83	620	62,73	5,29	62	628,53	166,05
4	341	589,17	815,22	403	54,12	8,95	31	575,64	169,72
5	372	722,01	728,12	558	61,5	13,43	62	629,76	182,33
6	558	714,63	832,31	434	59,04	12,62	0	624,84	175,82
7	589	643,29	772,89	496	52,89	7,73	93	645,75	164,43
8	806	854,85	782,66	465	63,96	11,39	31	610,08	183,56
9	961	505,53	725,27	558	51,66	10,17	31	608,85	172,57
10	496	755,22	733,00	651	55,35	13,83	0	640,83	170,94
11	589	447,72	721,61	465	54,12	7,73	0	594,09	161,58
12	558	601,47	691,08	496	63,96	9,76	31	653,13	181,12
13	465	723,24	815,62	527	57,81	11,80	62	586,71	173,38
14	403	865,92	767,60	434	62,73	12,61	93	616,23	163,61
15	806	581,79	724,46	589	56,58	14,24	62	562,11	160,76
16	527	618,69	750,10	465	59,04	11,80	93	618,69	168,09
17	651	384,99	567,36	496	55,35	6,92	62	597,78	166,05
18	589	624,84	778,59	558	61,50	10,17	93	552,27	155,88
19	775	632,22	772,89	527	52,89	13,02	31	603,93	160,36
20	558	735,54	808,30	651	60,27	11,39	62	587,94	170,53
-----									
Mínimo	341	385,0	567,36	403	51,66	5,3	0	552,27	155,8
Máximo	992	911,43	985,3	651	63,97	14,65	93	656,82	183,96
<b>Média</b>	<b>603</b>	<b>647,60</b>	<b>753,90</b>	<b>522,40</b>	<b>58,0</b>	<b>10,82</b>	<b>51,10</b>	<b>607,31</b>	<b>170,33</b>
Desvio padrão	185,6	144,3	88,48	69,88	3,89	2,62	32,2	31,47	8,25
Coefficiente de variação (%)	30,78	22,29	11,74	13,38	6,7	24,16	63,0	5,19	4,8
Assimetria	0,65	-0,06	0,05	0,33	0,05	-0,45	-0,13	-0,25	0,20
Curtose	-0,12	-0,27	2,68	-0,44	-1,22	-0,6	-1,07	-0,71	-0,85

Tabela 17. Teor de urânio em alguns fertilizantes comercializados no Brasil.

<b>Origem das rochas</b>	<b>Tipo de adubo e número de amostras</b>	<b>Média e desvio padrão (U em ppm)</b>	<b>Média (U em Bq/Kg)</b>
Araxá	Concentrado (3)	212 ± 22	2607
Tapira	Concentrado (3)	21 ± 3	258,3
Araxá	FAC (3)	209 ± 21	2570
Araxá	CAC (3)	110 ± 13	1353
Araxá	FAPS (3)	88 ± 8	1082,4
Araxá	SSP (8)	94 ± 10	1156,2
Tapira	SSP (4)	24 ± 3	295,2
Araxá	SST (5)	100 ± 8	1230
Tapira	SST (4)	30 ± 3	369
Tapira	MAP (5)	11 ± 2	135,3
Tapira	DAP (5)	35 ± 5	430,5
<b>Média</b>		<b>84,91</b>	<b>1044,26</b>

Fonte: Adaptada de Paschoa et al., (1984)

Tabela 18. Concentração de urânio para diferentes fabricantes e formulações de NPK (%) em alguns adubos produzidos no Brasil.

<b>Fabricante</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Urânio(ppm)</b>	<b>Urânio (Bq/Kg)</b>
Nitrobras	10	10	10	28,45±0,60	349,95
Nitrobras	04	14	08	29,50±0,25	362,85
Manah	13	13	28	19,34±0,74	237,88
Manah	04	30	20	26,10±0,55	321,03
Ultrafertil	06	30	24	22,26±0,78	273,80
Ultraverde	10	10	10	30,60±0,42	376,38
Serrana	04	14	08	54,3±2,3	667,89
Mitsui	04	14	08	34,29±0,79	421,77
Fertibras	10	10	10	20,81±0,45	255,96
Nutrisafra	04	14	08	38,57±0,85	474,41
Fertiliza	02	20	20	15,72±0,34	193,56
Heringer	03	15	15	5,17±0,27	63,59
<b>Média</b>				<b>27,09</b>	<b>333,25</b>

Fonte: Adaptada de Yamazaki & Geraldo (2003)

A utilização do gesso ( $\text{CaSO}_4$ ) na agricultura, tem por finalidade fornecer cálcio e enxôfre para as plantas nos horizontes subsuperficiais. Ao contrário do calcário que tem por objetivo corrigir o pH dos solos fornecendo cálcio e magnésio, o gesso, percola no perfil, fazendo com que as plantas desenvolvam o seu sistema radicular, explorando maior volume de solo e conseqüentemente nutrientes e água (Nuernberg et al., 2002). O problema na percolação do gesso é o conteúdo de elementos radioativos na sua constituição, que, com o tempo, os radionuclídeos podem ser lixiviados para partes mais profundas dos perfis dos solos e em decorrência, para o lençol freático.

Guimond & Hardin (1989), observaram que o rio Mississippi (EUA) e suas margens recebem grandes quantidades de radionuclídeos provenientes de adubação agrícola, oriundos da erosão laminar, uma vez que este rio margeia dez estados norte-americanos, grandes consumidores de fertilizantes fosfatados.

Tabela 19. Concentração de radionuclídeos (Bq/Kg) obtidos por espectrometria de raios gama em amostras de gesso e rochas fosfáticas.

<b>Matéria prima</b>	<b>Fabricante</b>	<b><math>^{238}\text{U}</math></b>	<b><math>^{232}\text{Th}</math></b>	<b>K</b>
Gesso	A			
<b>Média + DP(*)</b>		42 ± 6	175 ± 23	25 ± 13
<b>Amplitude</b>		35-47	148-190	12-39
Rocha fosfatada				
<b>Média + DP</b>		1128 ± 498	245 ± 35	24 ± 4
<b>Amplitude</b>		776-1480	220-270	21-27
Gesso	B			
<b>Média + DP</b>		17 ± 5	156 ± 38	24 ± 16
<b>Amplitude</b>		13-22	129-200	< 4.2-35
Rocha fosfatada				
<b>Média + DP</b>		164 ± 20	256 ± 81	29 ± 10
<b>Amplitude</b>		148-187	197-349	21-41
Gesso	C			
<b>Média + DP</b>		41 ± 24	174 ± 17	18 ± 1
<b>Amplitude</b>		23-68	155-188	< 4.2-1.8
Rocha fosfatada				
<b>Média + DP</b>		434 ± 69	244 ± 40	18 ± 11
<b>Amplitude</b>		355-485	203-282	4.8 – 2.5
Gesso	D			
<b>Média + DP</b>		11 ± 2	7 ± 1	< 4.2
<b>Média do gesso</b>		<b>27,75</b>	<b>128</b>	<b>17,75</b>
<b>Média da rocha fosfática</b>		<b>575,33</b>	<b>248,33</b>	<b>23,67</b>

Fonte: Adaptada de Mazzilli et al., (2000); (\* DP) = desvio padrão

Na Tabela 20 encontram-se as estimativas das taxas de radiação (dose), correspondentes aos teores de potássio, urânio e tório. As maiores emanações de radioatividade advêm dos adubos e do gesso com 69,45 e 34,07 micro R/h respectivamente. As menores radiações são oriundas das áreas testemunhas. A área cultivada emite mais radiação do que as testemunhas, evidenciando que o uso periódico de fertilizantes fosfatados com o tempo, pode resultar no acúmulo de radionuclídeos nos solos estudados.

Totalizou-se os teores dos três radionuclídeos em micro R/h, objetivando comparar com o somatório em relação às doses consideradas perigosas à saúde, que são aquelas superiores a 300 mili R/semana (Sheriff, 1999) ou 1786 micro R/h. Nascimento & Ferreira (2003), tomaram medidas gamaespectrométricas em experimento agrícola conduzido pela Embrapa/Planaltina-DF, e constataram que a adição de fertilizantes, incluindo o carbonatito, elevou os teores de K, U e Th e conseqüentemente, a taxa da radioatividade natural nas parcelas experimentais, cuja maior radiação após totalizado os três radionuclídeos, advêm do carbonatito, com 34,90 micro R/h, semelhante as doses oriundas do gesso, 34,07 micro R/h, determinados neste trabalho.

Tabela 20. Taxas de radiação (dose) calculadas a partir do valor médio para cada um dos radionuclídeos.

Variáveis	K		U		Th		soma
	%	micro R/h	ppm	micro R/h	ppm	micro R/h	micro R/h
<b>Adubo (5-25-25)</b>	1,94	2,29	52,65	26,22	185,23	40,94	69,45
<b>Adubo (0-16-25)</b>	1,68	1,98	4,72	2,35	2,66	0,59	4,92
<b>Gesso</b>	0,2	0,24	49,37	24,58	41,85	9,25	34,07
<b>Solos geral</b>	0,17	0,20	0,83	0,41	1,78	0,39	1,0
<b>Solos argilosos</b>	0,16	0,19	1,22	0,61	1,13	0,25	1,05
<b>Solo areno/argiloso</b>	0,18	0,21	0,57	0,28	2,21	0,49	0,98
<b>Solo areno/argiloso (testemunha)</b>	0,13	0,15	0,16	0,08	2,19	0,48	0,71
<b>Solos argilosos (testemunha)</b>	0,08	0,09	0,12	0,06	0,45	0,10	0,25
<b>Rochas</b>	1,29	1,52	1,92	0,96	2,73	0,60	3,08

Fatores de conversão: 1% de K = 1,18 micro R/h; 1ppm de eU = 0,498 micro R/h; 1 ppm de eTh = 0,221 micro R/h (Fonte: Sheriff, 1999).



### 5.1.1.2 Resistividade aparente dos solos

Os valores da resistividade aparente da área total constam da Tabela 10, juntamente com os dados gamaespectrométricos. No entanto, a resistividade aparente calculada para os solos de textura mista e os argilosos pode ser vistas nas Tabelas 11 e 12, respectivamente. A resistividade aparente média obtida refere-se a uma profundidade aproximada de 50 cm. Os solos argilosos apresentaram resistividade média de 128,23 Ohm.m, enquanto que para o solo de textura mista, a média foi de 367,56 Ohm.m, portanto maior do que os argilosos.

A Figura 32 mostra a distribuição espacial dos valores de resistividade aparente. A variação (entre 24,8 e 647,03 Ohm.m Tabela 10), é compatível com os teores da argila e areia para as duas profundidades investigadas (0-20 e 20-40 cm). As partes mais argilosas apresentam as mais baixas resistividades, ao contrário dos tratos mais arenosos. Comparando o mapa de solos da Figura 18 e os de argila (Figuras 33 e 34) com o de resistividade aparente, fica claro a influência da textura em relação a resistividade, ou seja, solos de textura mais fina, com pouco quartzo, facilitam a passagem da corrente elétrica. Robain et al., (1996), utilizaram arranjo de eletrodos com espaçamento de 0,1 m, visando obter medidas de resistividade para descrição de perfis de solos lateríticos na República de Camarões. Nascimento (2004), encontrou valores de resistividade aparente para solos argilosos de Brasília-DF entre 8000 e 10000 Ohm.m, enquanto para os arenosos verificou-se uma variação de 20000 e 60000 Ohm.m.

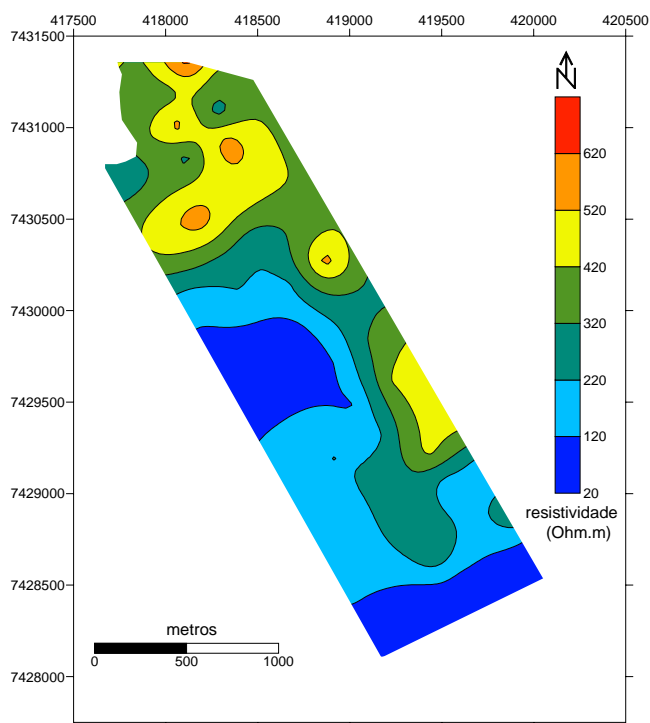


Figura 32. Distribuição espacial da resistividade aparente para a profundidade de 50 cm

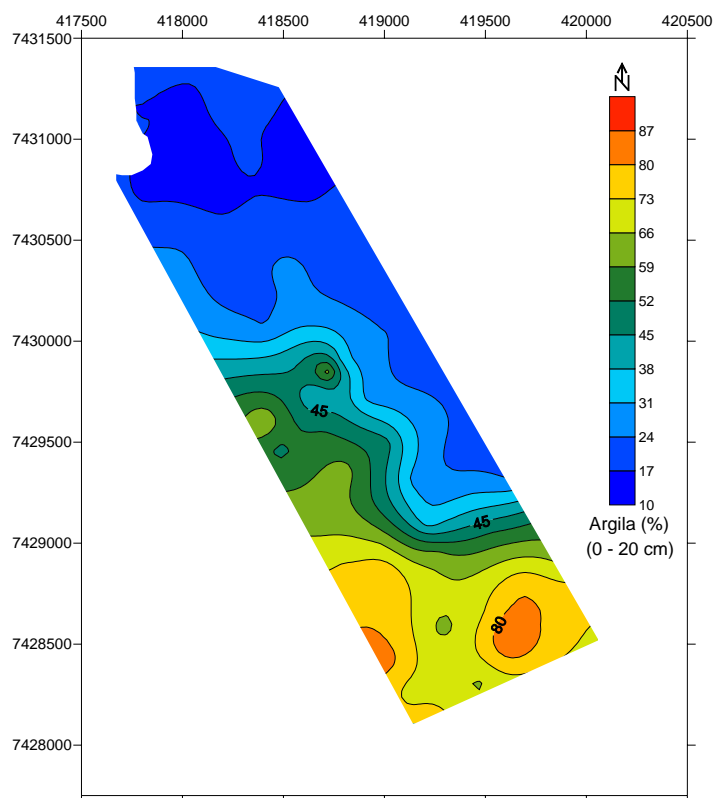


Figura 33. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 0 – 20 cm

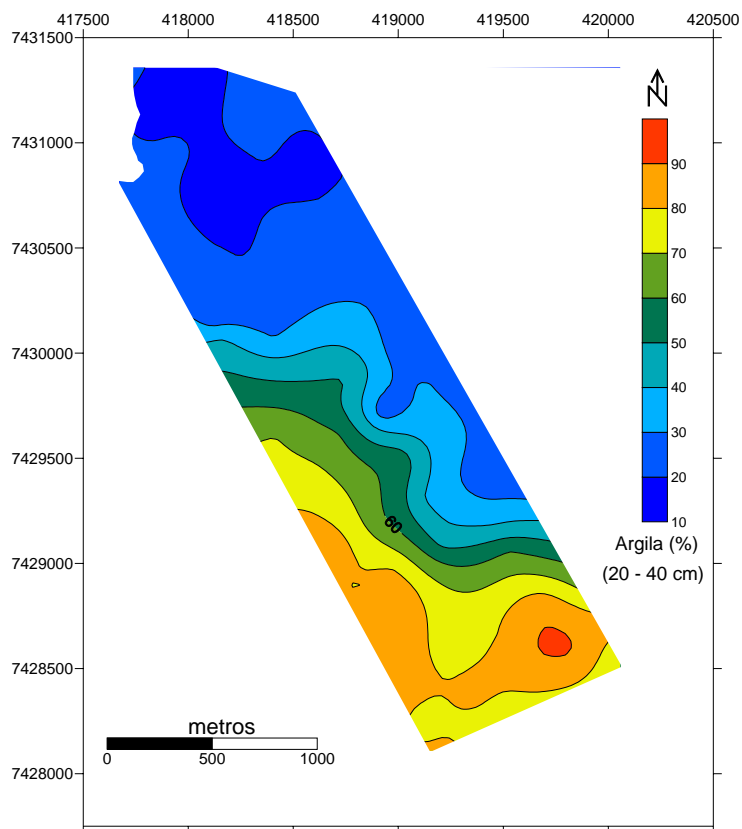


Figura 34. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 20-40 cm

Os gráficos de correlação entre a resistividade aparente e os teores de argila para as duas profundidades (0-20 e 20-40 cm), podem ser vistos nas Figuras 35 e 36. Nota-se uma correlação negativa (inversa), ou seja, na medida em que aumenta o teor de argila, diminui a resistividade aparente e vice-versa.

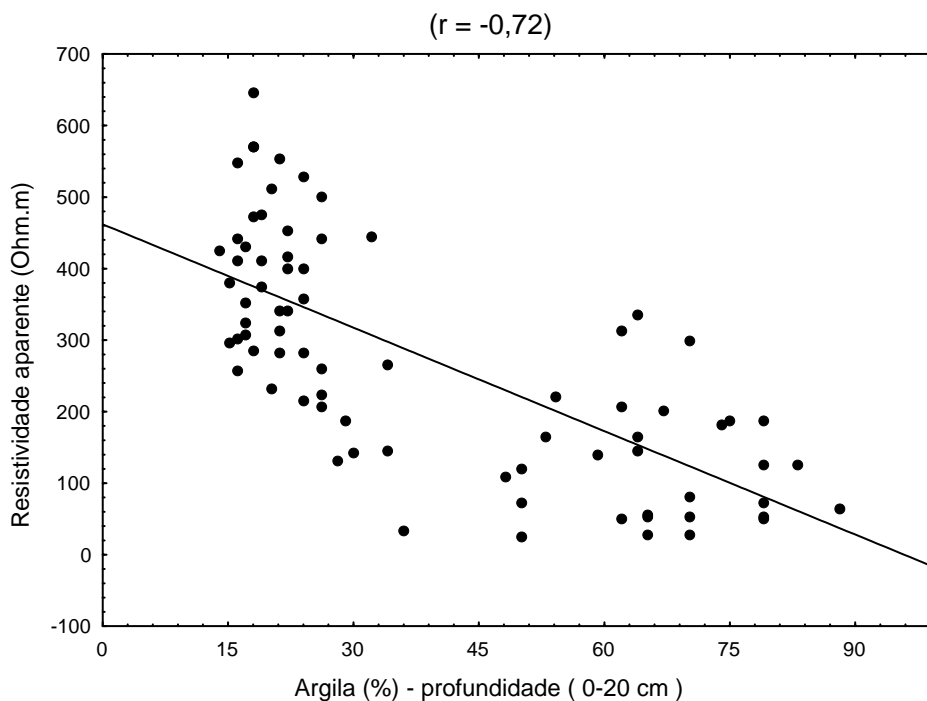


Figura 35. Correlação entre resistividade aparente e argila para a profundidade de 0-20 cm

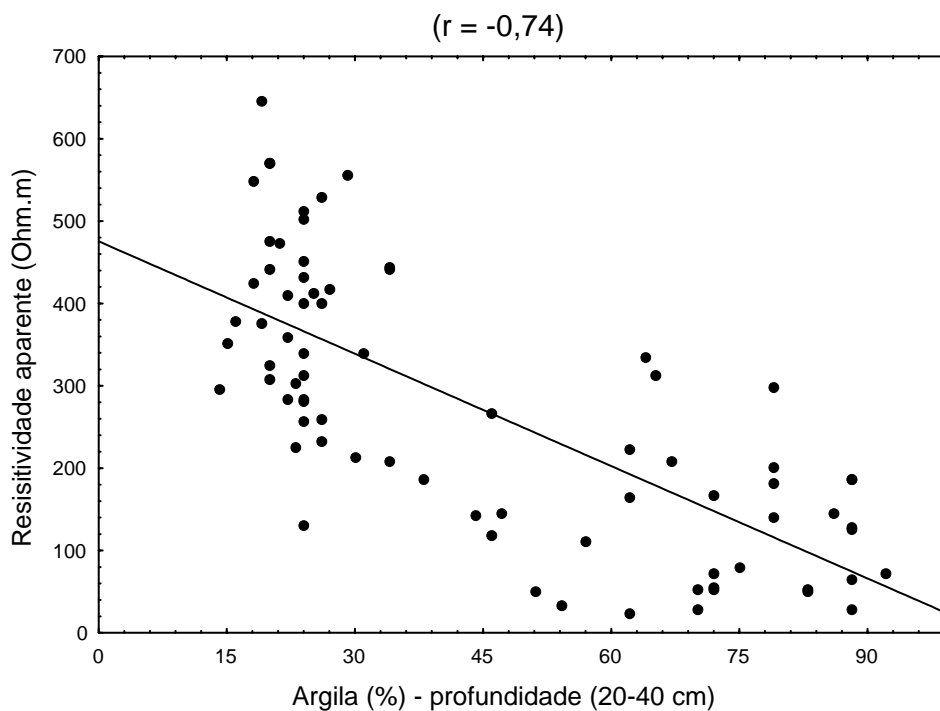


Figura 36. Correlação entre resistividade aparente e argila para a profundidade de 20-40 cm

A comparação da distribuição espacial da resistividade aparente (Figura 32), com o mapa de solos (Figura 18), mostra uma nítida discriminação dos solos argilosos dos de textura mista. Procedimento análogo foi utilizado por Banton et al., (1997), que efetuaram medidas de resistividade em solos agrícolas no Canadá, objetivando correlacioná-las com a textura. Neste sentido, o mapa de resistividade foi utilizado quando da elaboração do mapa de solos, principalmente para delimitar os contornos das unidades de solos.

Quando da tomada dos dados de resistividade aparente, os solos apresentavam umidade em nível de capacidade de campo. Entretanto, é possível que mesmo em períodos mais secos, pelo fato do produtor utilizar o sistema de plantio direto (não se faz o revolvimento da terra para o plantio), a cobertura pelos restos culturais proporciona uma sensível redução na perda de água por evapotranspiração. Os solos argilosos por terem maior volume de microporos e maior superfície específica, perdem menos água por gravidade, ao contrário dos arenosos onde o volume de microporos é pequeno, do que decorre a percolação mais rápida da água no perfil dos solos (Lopes, 1983).

Comparando-se os teores de argila entre as camadas de 0 - 20 e 20 - 40 cm, nota-se que a mesma aumenta com a profundidade, como pode ser constatado nas Tabelas 25 e 26 assim como de pela análise espacial das Figuras 34 e 35. Isto reflete a influência da litologia mais feldspática na origem dos solos argilosos, oriundos da Formação Serra Geral (Embrapa, 1984; Fernandes, 2000).

### **5.1.1.3 Suscetibilidade magnética dos solos**

De acordo com a Tabela 21, os solos argilosos apresentam maior suscetibilidade magnética, comparados ao solo areno-argiloso. Os valores médios para os solos argilosos, nas duas profundidades foram respectivamente de 0,7 e 0,69 ( $\times 10^{-3}$  SI) e para o areno-argiloso os valores médios foram 0,45 e 0,43 ( $\times 10^{-3}$  SI).

Como a litologia nas áreas de contato é composta basicamente por rochas eruptivas básicas, originando solos de textura argilosa como o Nitossolo Vermelho Eutrófico e o Latossolo Vermelho Eutroférico (Figura 18), ricos em minerais magnéticos (Vieira et al., 1988), a resposta magnética de tais solos são maiores que a do solo Latossolo Vermelho Distrófico de textura areno/argilosa, em virtude do material de origem do mesmo ser composto pelo retrabalhamento das formações Serra Geral e Goio-Erê, sendo esta última de textura arenosa.

Nota-se a existência de uma forte relação espacial entre os mapas da suscetibilidade magnética (Figuras 37 e 38), com a resistividade aparente (Figuras 32), com a argila (Figuras 33

e 34) e com o ferro (Figuras 53 e 54). As Figuras 39 e 40 representam a correlação entre argila e a suscetibilidade magnética para as duas profundidades respectivamente.

Tabela 21. Síntese dos dados da suscetibilidade magnética por tipo de solo quanto a textura para as duas profundidades.

	Areno/argiloso	Argilosos	Areno/argiloso	Argilosos
	Profundidades (cm)			
	0 – 20	0 – 20	20 – 40	20 – 40
	(x 10 <sup>-3</sup> SI)			
Mínimo	0,29	0,42	0,28	0,44
Máximo	0,82	1,1	0,82	0,95
<b>Média</b>	<b>0,45</b>	<b>0,7</b>	<b>0,43</b>	<b>0,69</b>
Desvio padrão	0,12	0,16	0,12	0,14
Coefficiente de variação (%)	26,6	22,9	27,9	20,3
Assimetria	1,39	0,49	1,30	0,21
Curtose	1,74	-0,2	1,64	-1,05

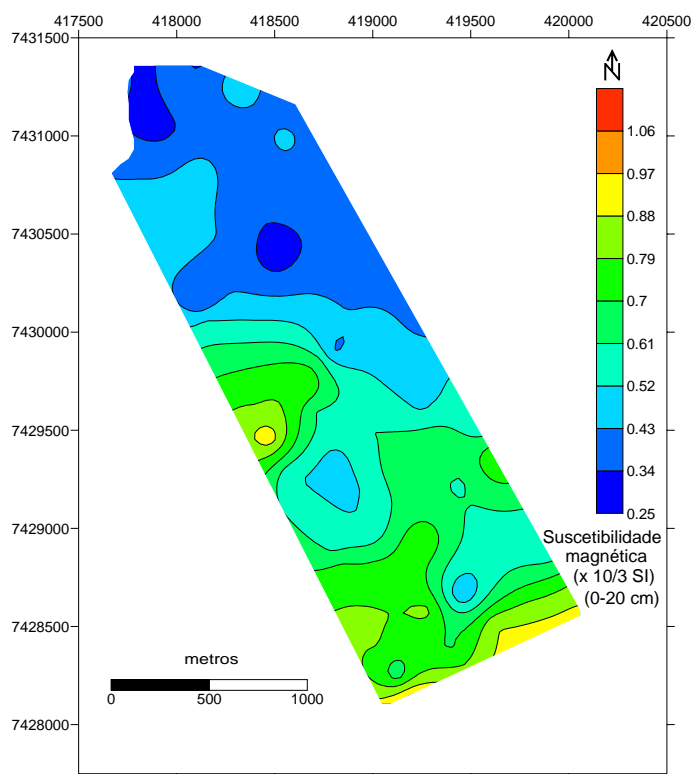


Figura 37. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade 0 – 20 cm

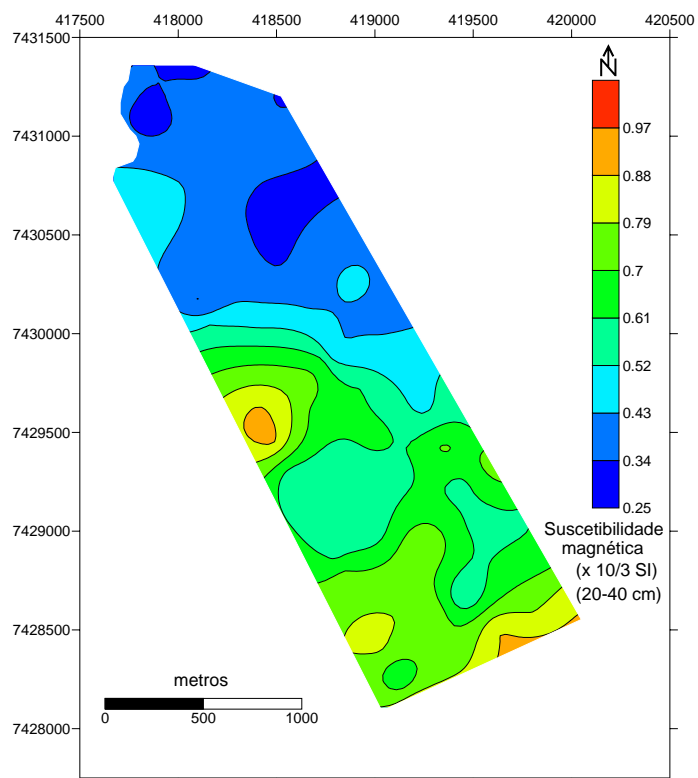


Figura 38. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade 20 – 40 cm

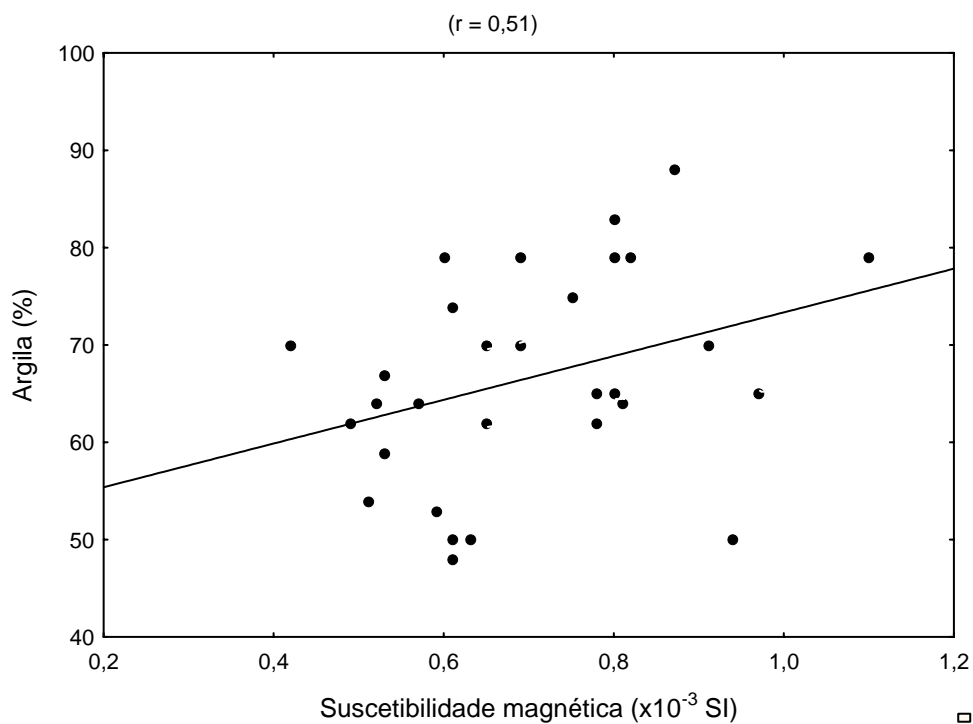


Figura 39. Correlação entre argila e suscetibilidade magnética para a profundidade de 0-20 cm

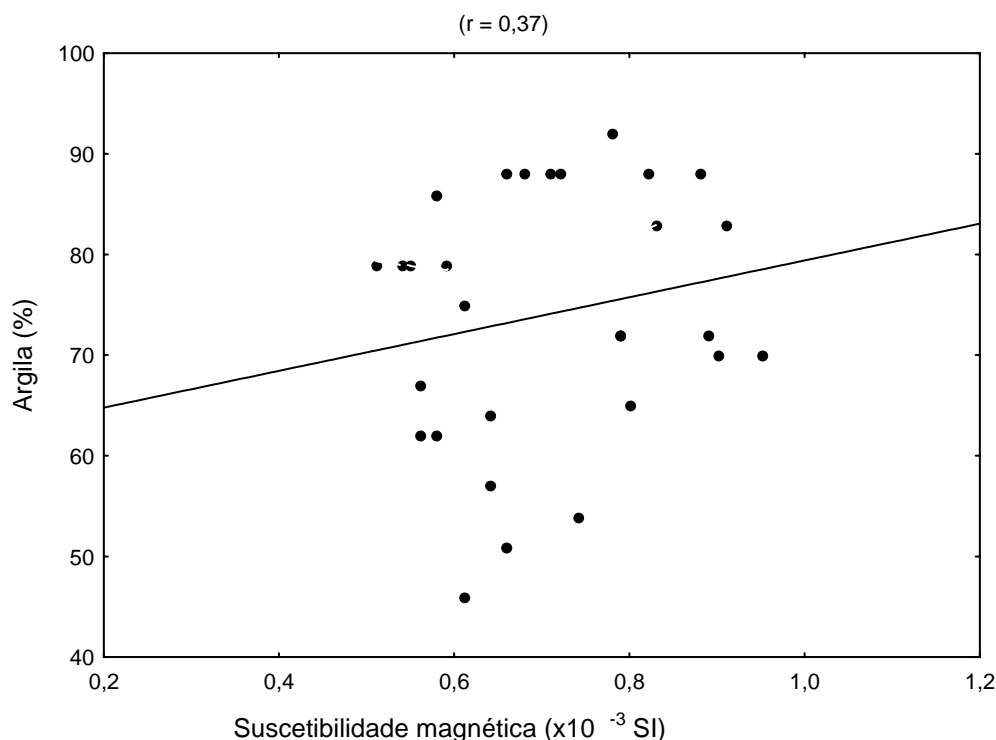


Figura 40. Correlação entre argila e suscetibilidade magnética para a profundidade de 20-40 cm

### 5.1.2 Dados geoquímicos

Este conjunto de dados é constituído por difratometrias de raios X de algumas amostras de solos e por duas matrizes, cada uma com 12 variáveis, as quais se referem aos resultados das análises de solos coletadas em duas profundidades (0 - 20 e 20 - 40 cm).

#### 5.1.2.1 Mineralogia dos solos

Foram realizadas seis análises por difratometria de raios X em amostras compostas para as profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm, sendo duas para cada um dos três tipos de solos.

As Figuras 41 a 48, referem-se às difratometrias de raios X dos solos argilosos: (Nitossolo Vermelho Eutrófico e Latossolo Vermelho Eutroférico), oriundos da decomposição de rochas eruptivas básicas. A constituição mineralógica de tais solos mostrou-se bastante uniforme, onde foram identificados os seguintes minerais: montmorilonita, caulinita, quartzo, goethita e hematita.

Os difratogramas mostram as formas de tratamento das amostras objetivando a identificação dos minerais: primeiramente procurou-se identificá-los *in natura*, após fez-se o aquecimento em mufla a 550 °C e posteriormente, a amostra foi tratada com etilenoglicol.

Os picos da montmorilonita (grupo das esmectitas), identificada pelo espaçamento de 13,7 Å, pertence ao grupo dos minerais de argila de grade 2:1, ou seja, possui duas lâminas de

sílica tetraédricas laterais e uma de alumina octaédrica central, e apresenta grande expansibilidade. Isto torna possível um grande número de substituições isomórficas de cátions (K, Na, Ca, etc.), por apresentar alta CTC (80 a 120  $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ ) e grande área de superfície específica (800  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ). Os radionuclídeos, por possuírem cargas positivas, podem ficar adsorvidos nas cargas negativas destes minerais, principalmente o urânio, cuja concentração se mostrou maior nestes solos, com teores de argila ultrapassando 70% (Tabela 12).

É plausível que os radionuclídeos não fiquem apenas adsorvidos nos bordos do referido mineral de argila, mas também podem fazer parte das substituições isomórficas, cujos cátions são retidos no solo, na seguinte ordem:  $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$  denominada série liotrópica (Raij, 1983).

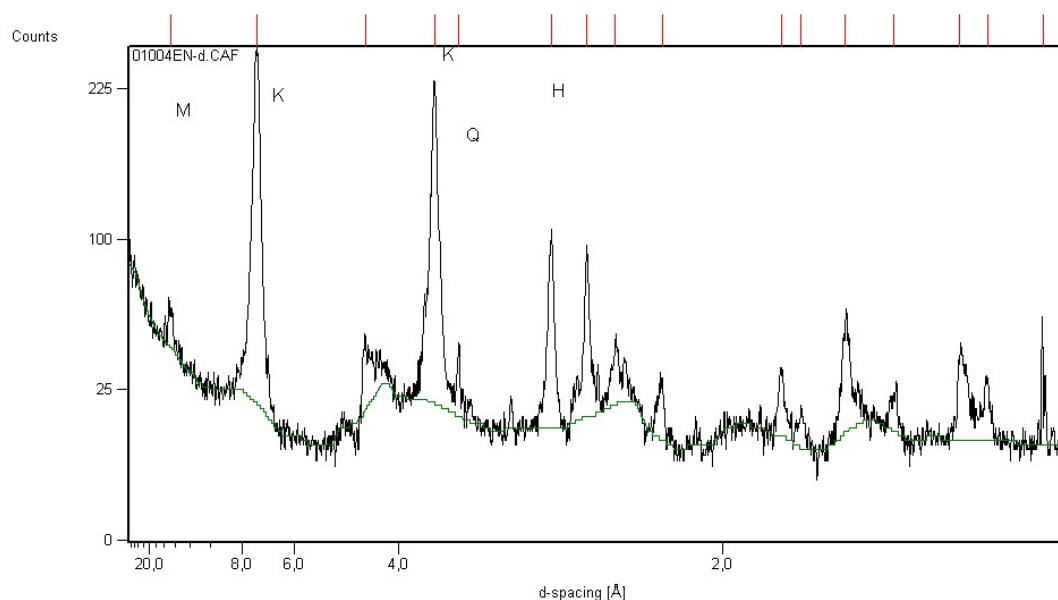


Figura 41. Difratomia de raios X da amostra *in natura* (amostra 1 – Nitossolo Vermelho Eutrófico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo)



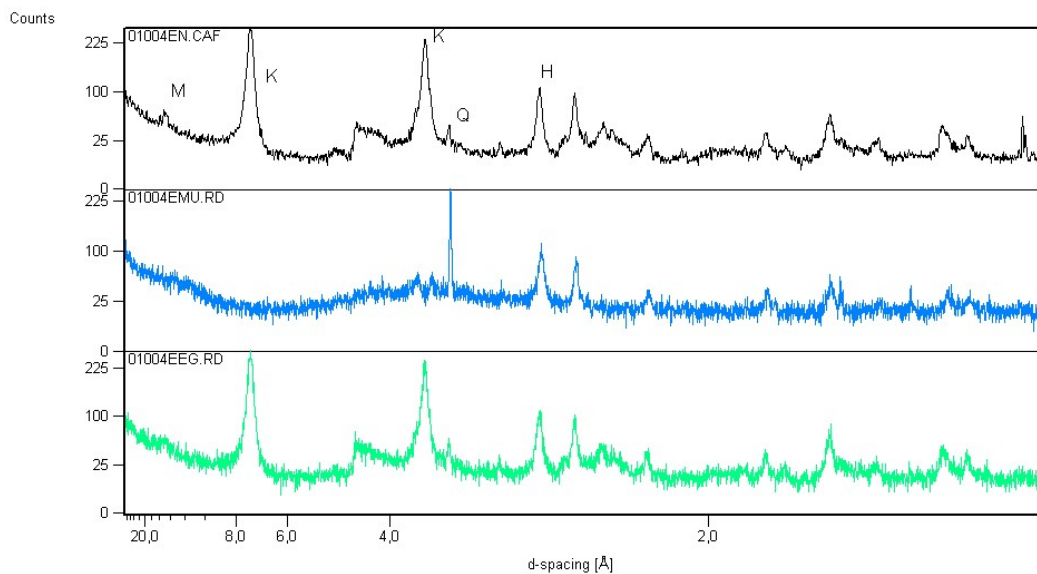


Figura 42. Difratoformas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra 1 – Nitossolo Vermelho Eutrófico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo

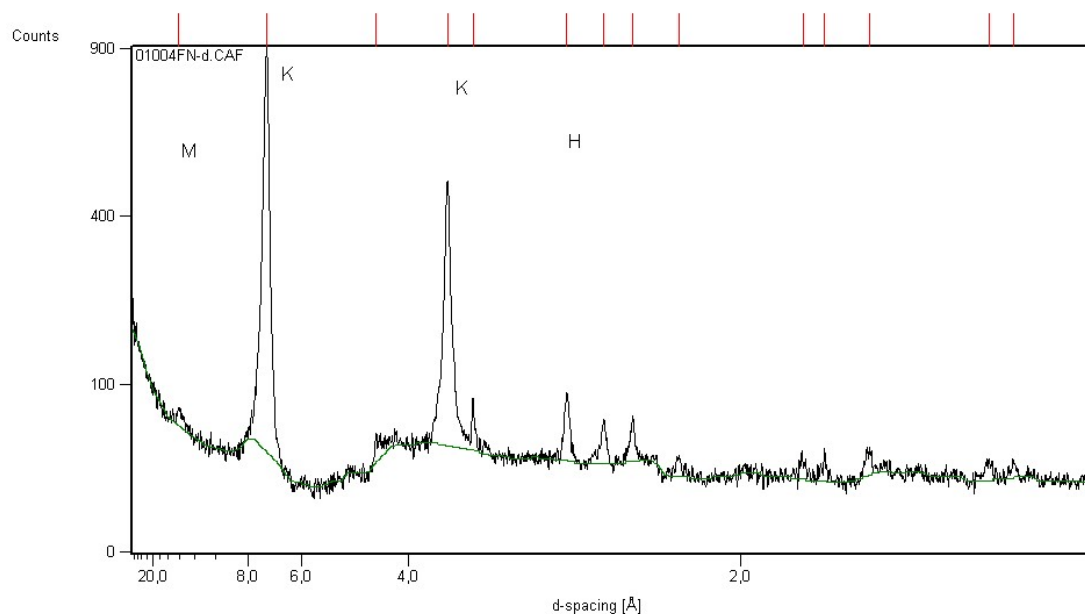


Figura 43. Difratoforma de raios X da amostra *in natura* (amostra 2 – Nitossolo Vermelho Eutrófico). M = montmorilonita; K = caulinita e H = hematita

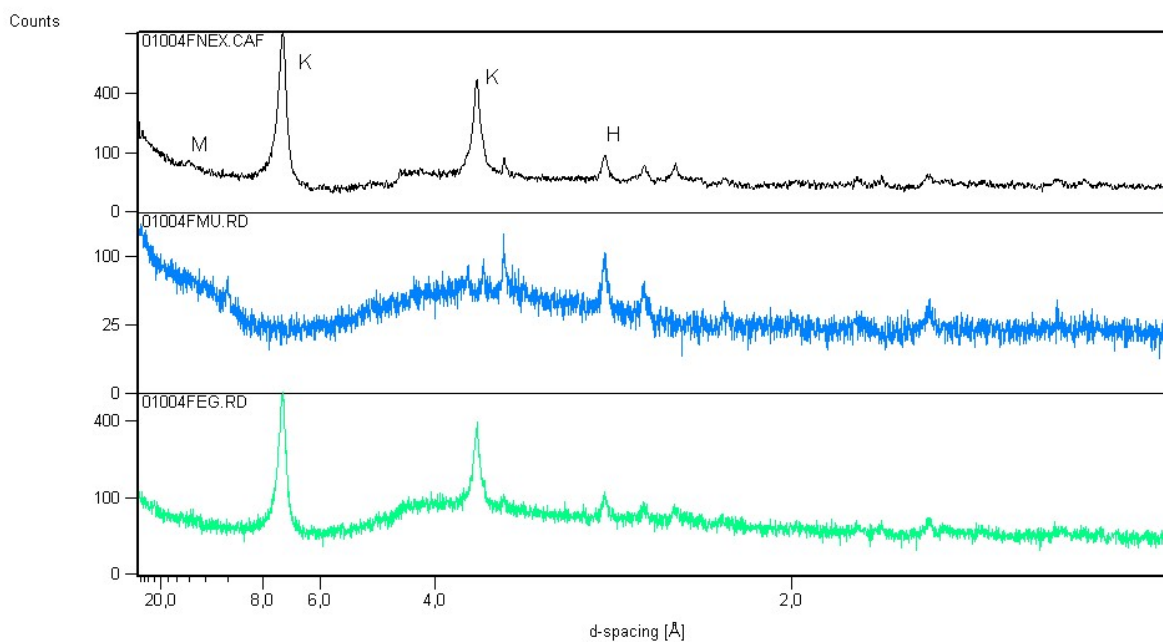


Figura 44. Difratomogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra 2 – Nitossolo Vermelho Eutrófico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita

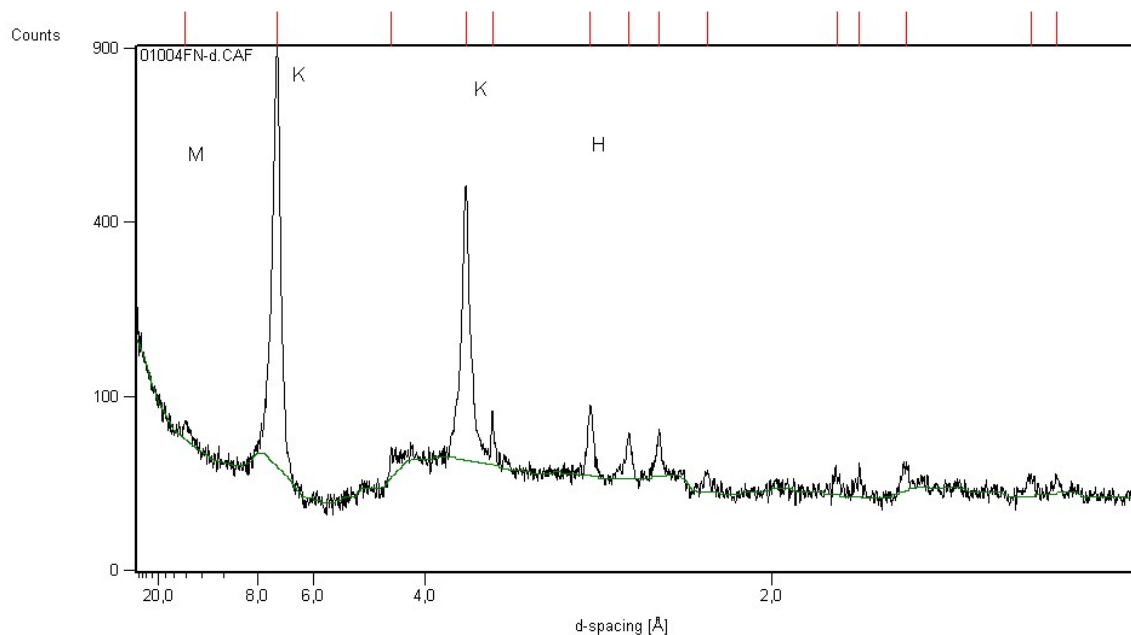


Figura 45. Difratomografia de raios X da amostra *in natura* (amostra 1 – Latossolo Vermelho Eutrófico). M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo

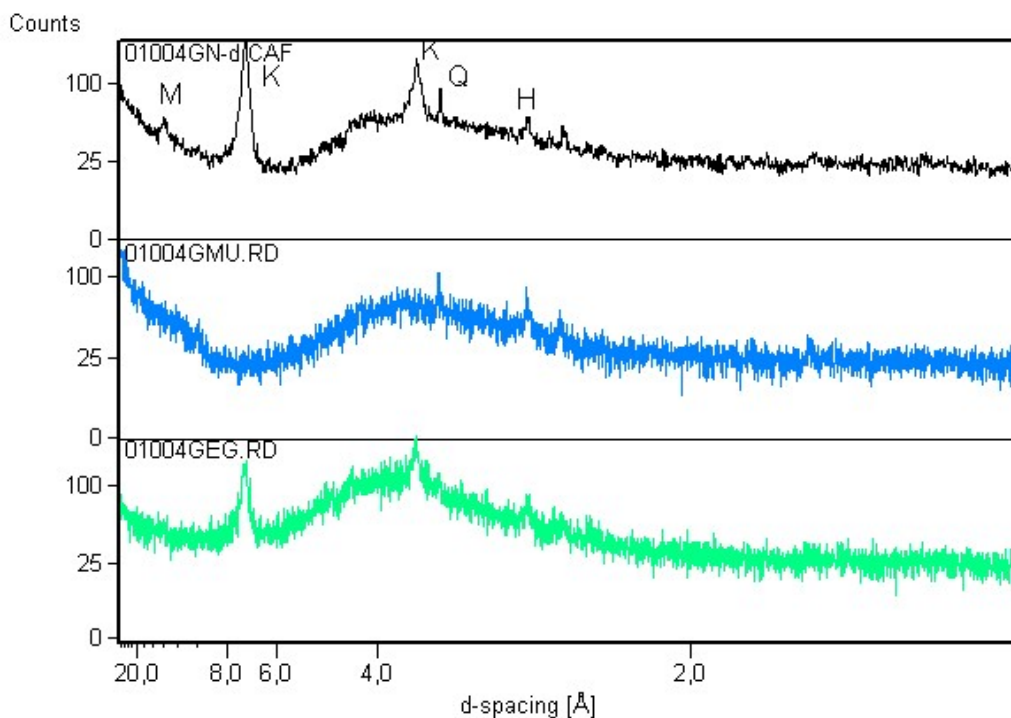


Figura 46. Difratoogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra 1 - Latossolo Vermelho Eutroférrico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo

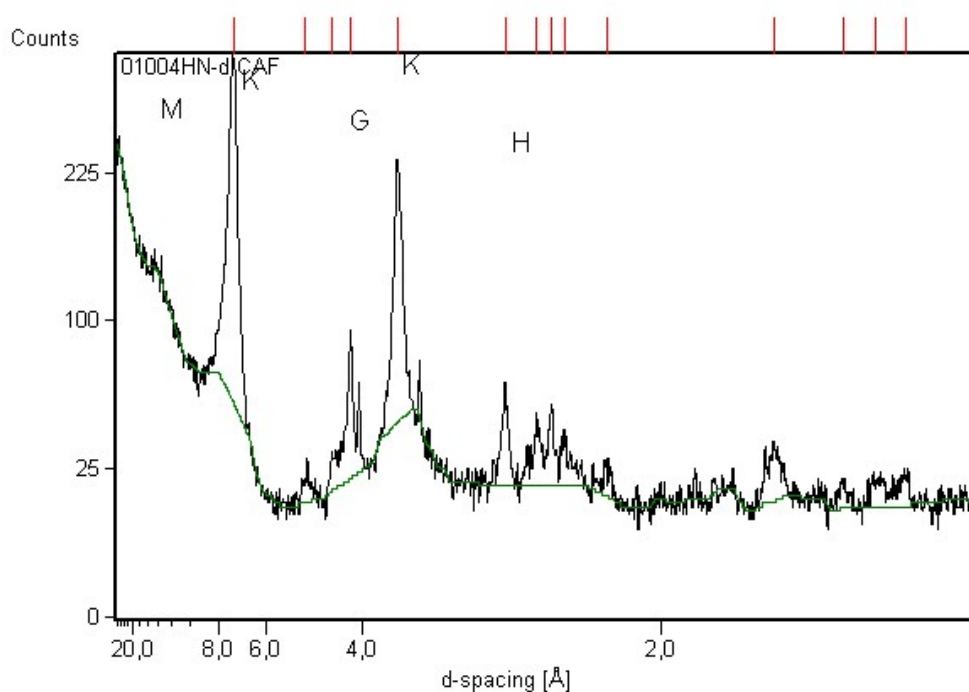


Figura 47. Difratomia de raios X da amostra *in natura* (amostra 2 – Latossolo Vermelho Eutroférrico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; G = goetita)

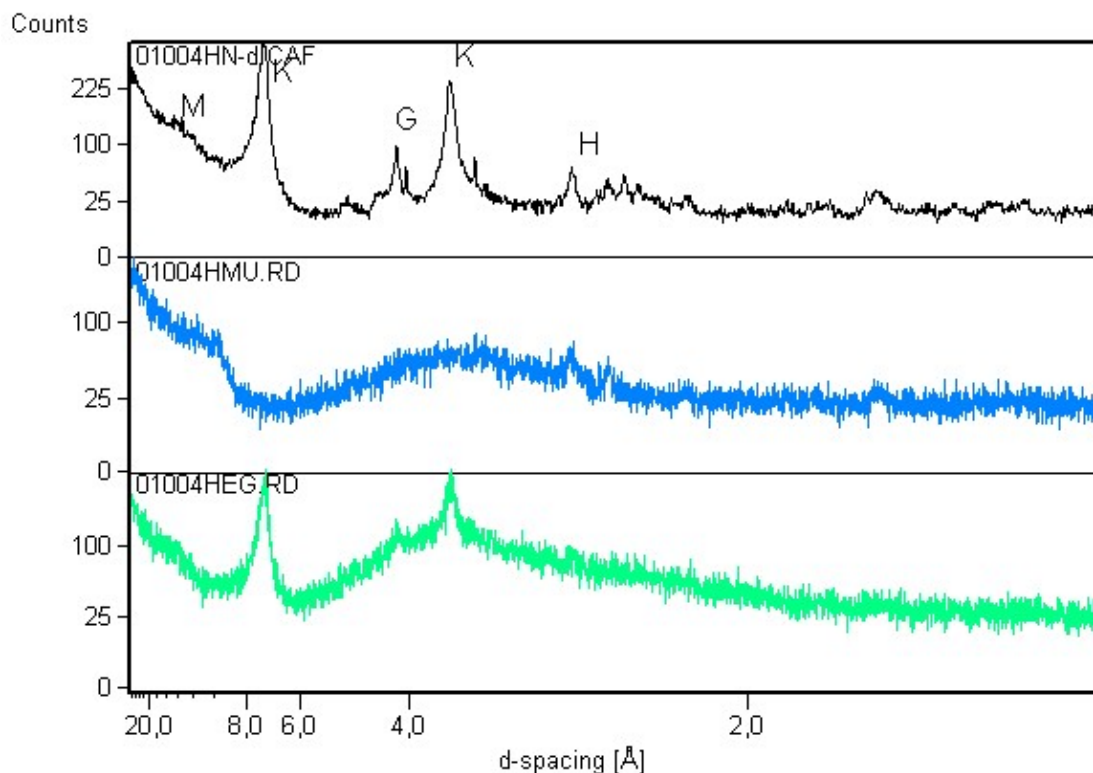


Figura 48. Difratogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra 2 – Latossolo Vermelho Eutroférico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita ; G = goetita

O primeiro fator determinante para atração é a carga dos cátions, o segundo é o tamanho dos íons hidratados (raio iônico), sendo os menores retidos com maior energia (Malavolta, 1976; Rajj, 1983). Em função de seu potencial iônico mais elevado no ambiente subsuperficial rico em oxigênio, o  $U^{+4}$  oxida-se pela perda de elétrons, passando ao estado de  $U^{+6}$  e o  $Th^{+4}$  permanece devido a sua configuração eletrônica (Rebelo, 2000). O raio iônico do U é 0,95Å, do Th 0,98Å e do K é 1,33Å, portanto comparáveis aos do  $Ca^{+2}$  0,99Å e a do  $Na^{+1}$  0,97Å. Assim, principalmente o U apresenta todas as condições de competitividade por sítios de trocas com o  $Ca^{+2}$  e o  $Na^{+1}$  na superfície dos minerais de argila, bem como na substituição isomórfica da rede cristalina nos minerais de argila expansíveis, como a montmorilonita, tanto no que se refere a sua valência, bem como pelo seu menor raio iônico. A Tabela 22 indica as características de alguns elementos químicos e a ordem preferencial de adsorção química nos solos.

Tabela 22. Características de alguns elementos químicos e ordem preferencial de adsorção química nos solos.

<b>Elementos</b>	<b>Raio iônico (Å)</b>	<b>Valência</b>	<b>Ordem preferencial</b>
Urânio	0,95	+6	1
Tório	0,98	+4	2
Alumínio	0,51	+3	3
Magnésio	0,66	+2	4
Cálcio	0,99	+2	5
Lítio	0,83	+1	6
Sódio	0,97	+1	7
Potássio	1,33	+1	8

Fonte: adaptada de Raij (1983)

Com o intemperismo químico intenso, as argilas como a montmorilonita se transformam em caulinita em solos mais velhos e altamente lixiviados, que possuem menor poder de adsorção de íons metálicos (Borovec, 1981), cuja presença foi detectada em todos os difratogramas. Fica evidenciado que ao se aquecer as amostras a 550 °C, a caulinita desaparece por ter suas estruturas cristalinas destruídas (Moraes, 1992; Almeida et al., 1997). Mesmo com menor capacidade de retenção de cátions, ela contribui com cargas negativas para a retenção de cátions, embora não seja expansível, praticamente impedindo a substituição de cátions na rede cristalográfica. A presença da caulinita nos solos estudados, pode ser atribuída ao intenso intemperismo a que ficam submetidos esses solos e na decomposição de alguns minerais primários resultante de condições físico-química adequadas para a formação do referido mineral de argila (Souza, 1973; Galhego & Espíndola, 1979).

Quanto há ocorrência de formas de ferro observa-se a presença de hematita em todos os difratogramas de raios X, cuja explicação é dada pelo material de origem dos solos oriundos de rochas máficas, ricas em minerais ferromagnesianos. Os óxidos de ferro imprimem aos solos uma coloração vermelha e o incremento de seus teores acarreta uma cor vermelha escura (Nitossolo Vermelho Eutrófico e o Latossolo Vermelho Eutroférico).

Os óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goetita) em solos tropicais, também podem contribuir para a fixação de elementos radiogênicos. A incorporação de metais nas fases de

óxidos de ferro é observada para uma grande variedade de metais de transição (Ford et al., 1997; Martinez & McBride, 1998). Não se acredita que o urânio seja incorporado na estrutura  $\alpha$ -FeOOH (Goethita), (Gerth, 1990). Contudo, há pouca informação a respeito da incorporação estrutural de U em óxidos de Fe, ou sobre a quantidade de U que pode ser retida nas fases hospedeiras dos minerais de óxidos de Fe que ocorrem naturalmente. A retenção de U nos perfis dos solos oriundos de rochas profundamente alteradas, deve-se à estabilidade das fases acessórias contendo U, e ao U adsorvido aos produtos do intemperismo, como argilas e óxidos de Fe e Mn. Portanto, os compostos de U solúvel são fortemente adsorvidos pelos hidróxidos de Fe, Al e Mn.

O Th livre pode ser retido, sobretudo em oxihidróxidos de Fe e Al. No entanto, assim como o U, o Th também pode ser transportado em solução coloidal, adsorvido em argilas e óxidos de Fe (Dickson & Scott, 1997) e colóides orgânicos (Viers et al., 1997). Durante o retrabalhamento das anomalias associadas aos Latossolos, conforme Tieh et al., (1980), a redistribuição de resistatos contendo Th e U, bem como a maior parte dos minerais e fases coloidais contendo Th, podem ser afetadas pelos processos pedogenéticos de eluviação-iluviação.

As Figuras 49 a 52, mostram a constituição mineralógica do Latossolo Vermelho Distrófico, textura mista. Assim como nos difratogramas anteriores, nota-se a presença da montmorilonita, cuja presença neste solo pode ser explicada pelo fato do mesmo ter sua origem no material retrabalhado das formações Serra Geral e Goio-Erê. A grande predominância é de quartzo, sendo que o teor médio de argila é de 25,20 % (Tabela 11).

Como a composição destes solos em sua maioria é arenosa, e derivada da Formação Goio-Erê, os teores de potássio são maiores, comparativamente aos solos argilosos, tanto para as testemunhas (Tabela 13), como na área com atividade antrópica (Tabela 11). É provável que a maior concentração do potássio esteja relacionada à mineralogia destes solos. O microclínio é o feldspato mais estável em ambientes superficiais e sua presença é detectável em arenitos supra-basálticos, como na Formação Caiuá (Bittencourt, 1978). Este fato explica ao menos em parte a baixa relação Na/K nas águas do Caiuá, sejam elas superficiais ou subterrâneas (Bittencourt, 1982).

A distribuição espacial dos teores de ferro para as duas profundidades pode ser vistas nas Figuras 53 e 54. Com o incremento da profundidade, também crescem os teores de ferro, principalmente nas partes mais declivosas (Figura 23). As Figuras 55 (a e b) mostram o comportamento estatístico gráfico do ferro.

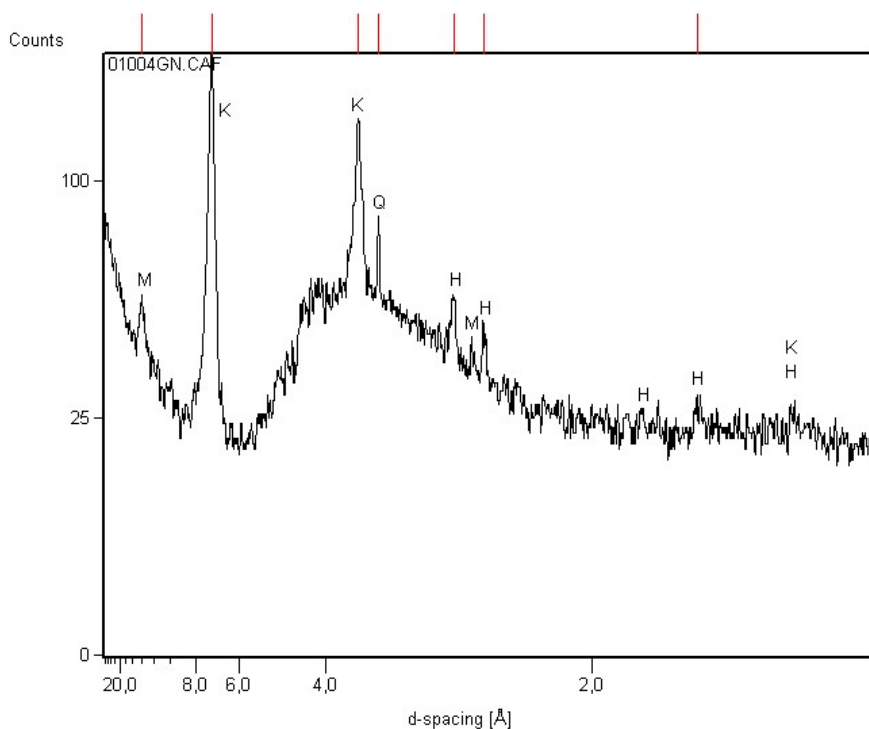


Figura 49. Difratoimetria de raios X da amostra *in natura* (amostra 1 – Latossolo Vermelho Distrófico). M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo

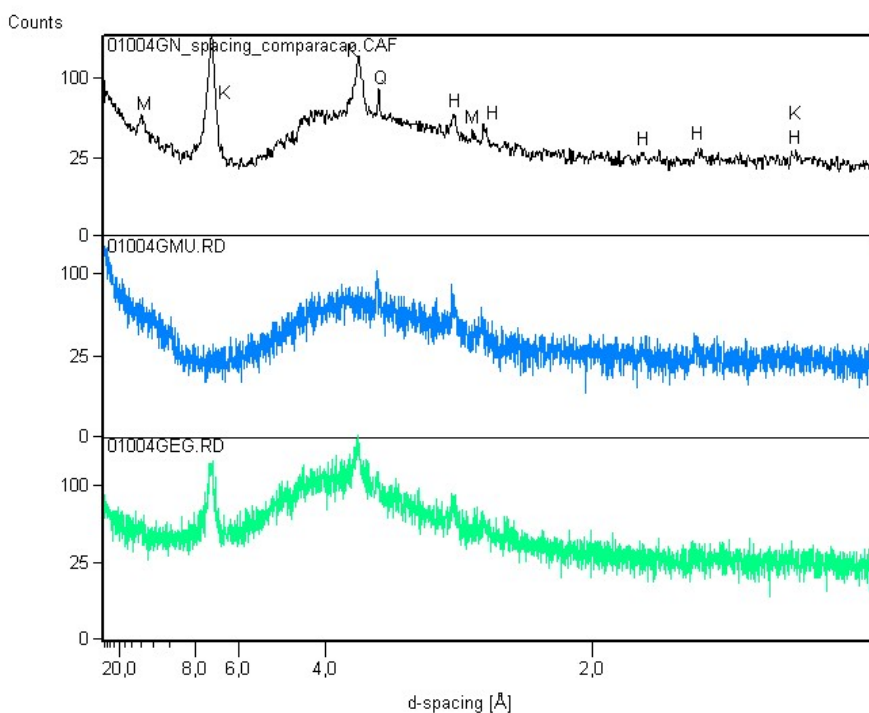


Figura 50. Difratogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra 1- Latossolo Vermelho Distrófico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita e Q = quartzo

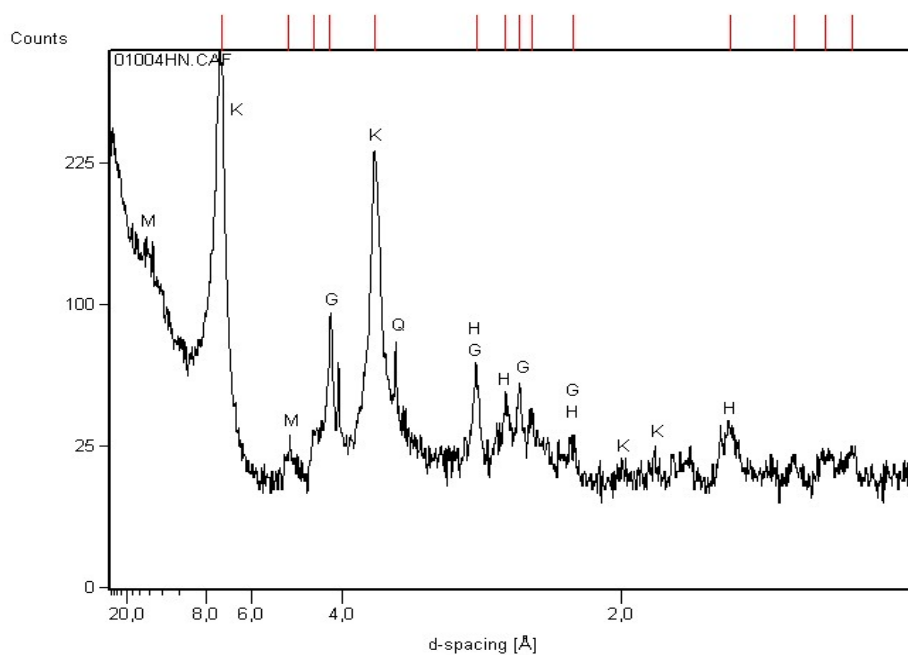


Figura 51. Difratoimetria de raios X da amostra *in natura* (amostra 2 – Latossolo Vermelho. Distrófico. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; G= Goetita; Q = quartzo)

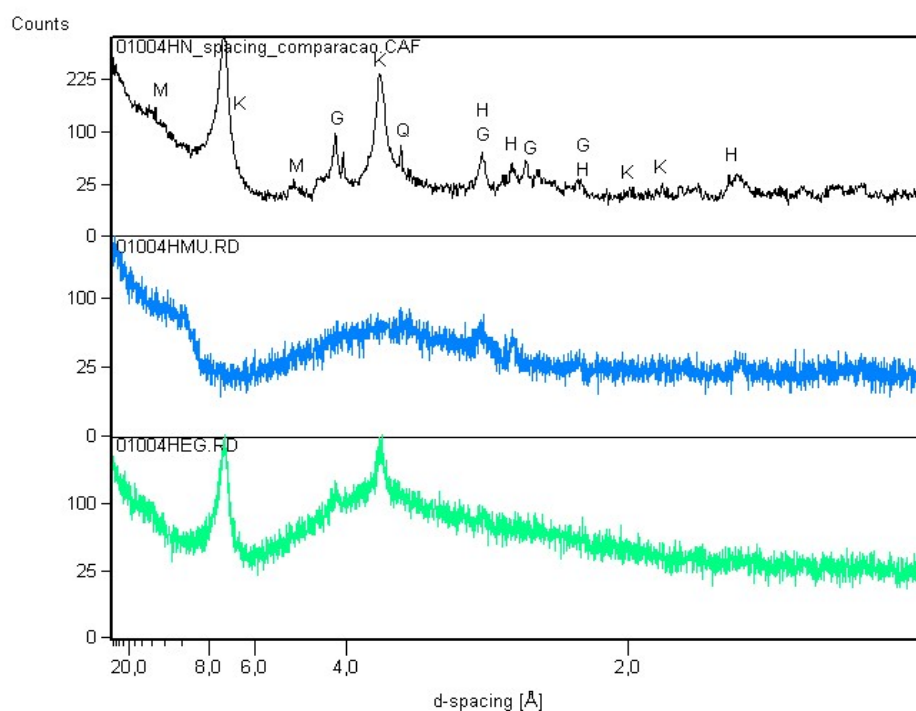


Figura 52. Difratoogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra 2 - Latossolo Vermelho Distrófico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida em mufla a 550 °C e tratada com etilenoglicol. M = montmorilonita; K = caulinita; H = hematita; G= Goetita; Q = quartzo



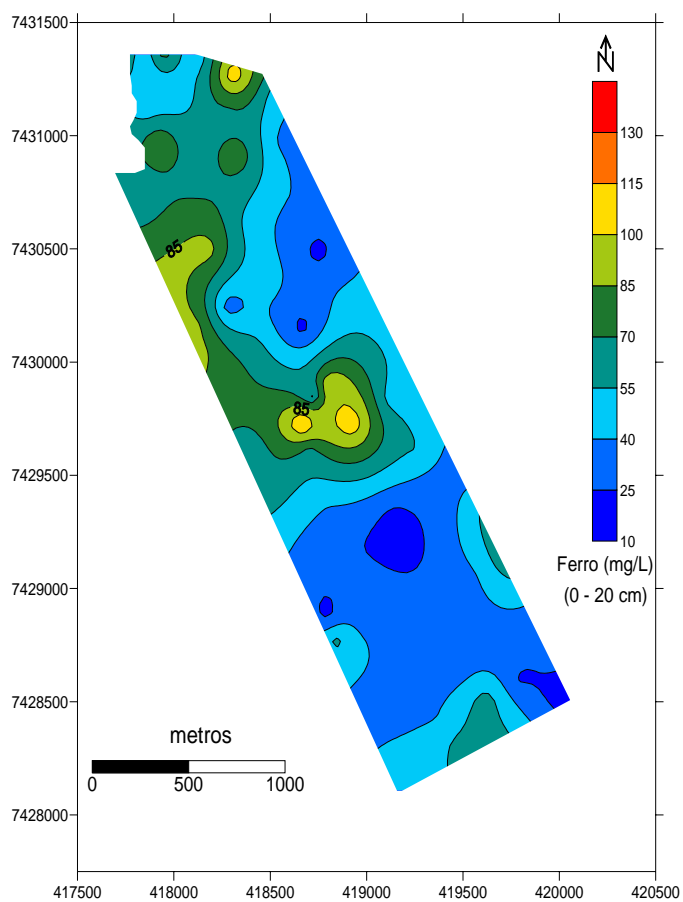


Figura 53. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 0 – 20 cm

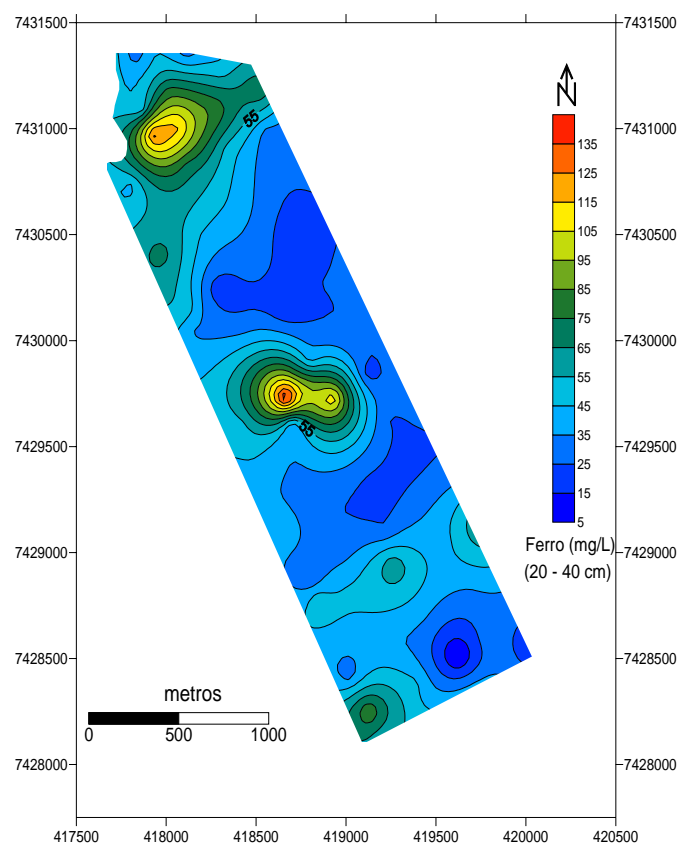
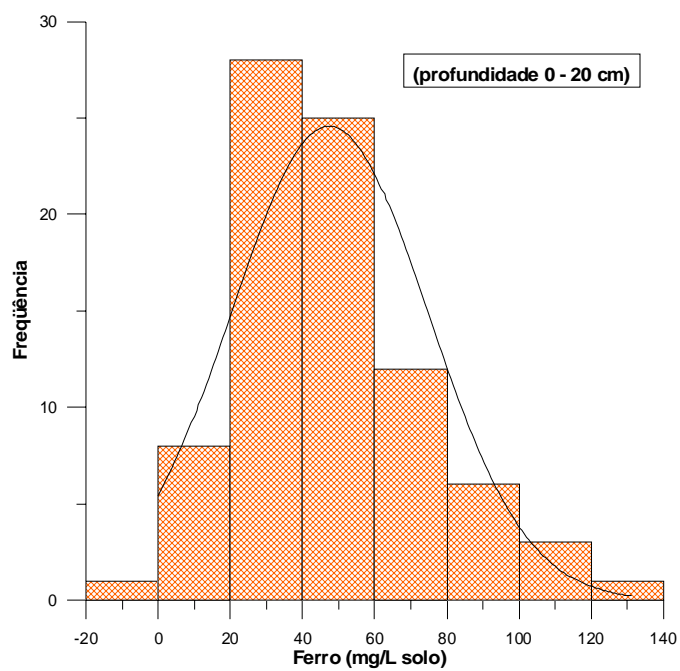
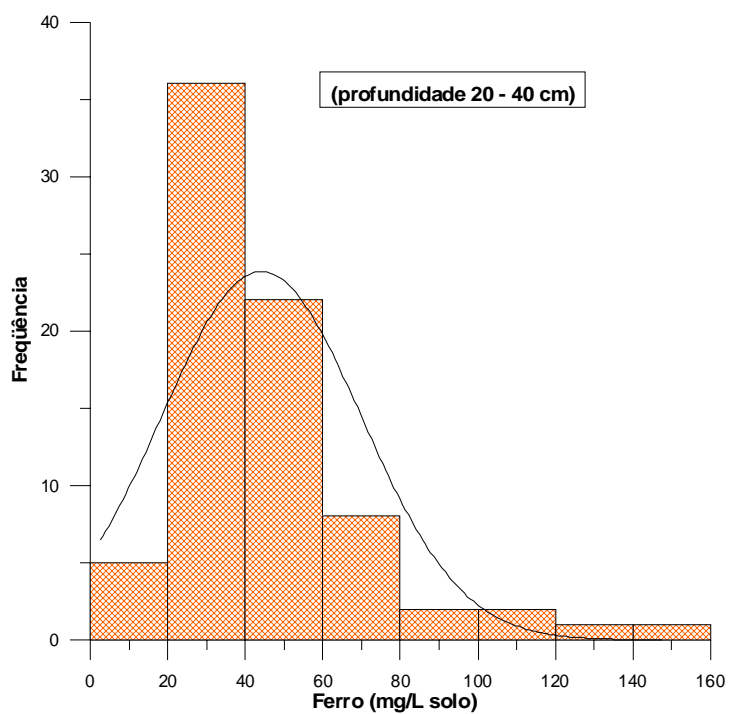


Figura 54. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 20 – 40 cm



(a)



(b)

Figura 55. Histogramas com curvas de distribuições do ferro para as duas profundidades

### 5.1.3 Correlações entre dados geoquímicos e geofísicos

As Tabelas 23 e 24 expressam os teores geoquímicos das 12 variáveis para as duas profundidades nos 77 pontos amostrados.

A argila é uma variável importante na correlação entre dados geofísicos e geoquímicos, principalmente no que se refere à dinâmica dos radionuclídeos nos solos e a resistividade aparente. Observa-se nas Tabelas 25 e 26 uma pequena diferença nos teores de argila entre as profundidades 0-20 e 20-40 cm, cujos valores médios foram de 39,3% e 44,7% respectivamente, evidenciando que a mesma aumenta com a profundidade, como decorrência da litologia, notadamente da Formação Serra Geral. Tais percentagens mudam significativamente, tomando-se por base os solos argilosos com percentual médio de argila com 73,58 % e o de textura mista com 25,20 % (Tabelas 11 e 12).

Como já foi abordado no item 5.1.1.1 e objetivando dar seqüência às discussões, nota-se que o valor médio do urânio nos solos argilosos (14,91 Bq/Kg) é duas vezes maior do que no solo areno/argiloso (7,03 Bq/Kg) (Tabelas 11 e 12). O potássio no solo de textura mista teve como média 57,28 Bq/Kg, ligeiramente maior do que nos solos argilosos com valor médio de 51 Bq/Kg, enquanto o tório, registrou uma média 9,03 Bq/Kg no solo areno/argiloso, maior do que os 4,61 Bq/Kg nos argilosos.

Objetivando visualizar o contexto das variáveis geofísicas e geoquímicas, buscando as possíveis inter-relações entre as 16 variáveis, elaborou-se duas matrizes de correlação (Tabelas 27 e 28). Para efeito das discussões dos resultados, tomou-se os dados das correlações para a profundidade de 20 – 40 cm, por entender que os mesmos são mais significativos.

Tabela 23. Dados geoquímicos para a profundidade de 0 – 20 cm.

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- (mg/L solo)	Zinco ----- (mg/L solo)	Ferro ----- (mg/L solo)	Manganês ----- (mg/L solo)
420057	7428567	1	70	6,1	7,0	358	4,4	0	8,1	2,7	14,4	23,5	12,4	29,1
419766	7428249	2	65	6,2	4,9	308	3,0	0	9,1	1,7	22,2	10,5	61,0	55,7
419462	7428312	3	65	6,0	6,8	300	3,7	0	8,5	1,6	24,3	17,8	58,4	66,5
419213	7428109	4	79	6,2	4,1	268	2,5	0	7,0	1,3	25,9	5,8	44,9	54,1
420012	7428705	5	79	5,9	1,8	230	4,5	0	9,6	2,0	14,9	14,2	35,3	89,9
419795	7428598	6	79	6,1	2,0	326	3,4	0	8,1	1,6	12,1	6,1	23,3	63,0
419620	7428510	7	88	6,2	2,7	345	2,7	0	7,9	1,7	16,0	5,8	61,3	53,4
419396	7428394	8	70	6,2	2,8	206	3,4	0	8,7	1,7	25,8	15,5	42,2	74,3
419125	7428252	9	70	5,8	80	667	2,8	0,2	6,0	1,7	17,7	9,3	46,9	71,0
419903	7428910	10	64	6,2	10,6	284	2,7	0	3,3	0,7	12,2	3,6	34,9	45,8
419682	7428790	11	79	6,1	7,7	264	2,9	0	4,7	1,3	9,8	8,1	34,5	83,7
419456	7428667	12	70	6,2	2,0	173	2,8	0	5,2	1,0	9,4	4,6	28,1	67,3
419286	7428582	13	64	6,3	4,5	132	2,4	0	3,9	0,8	8,9	1,6	33,8	47,8
419016	7428421	14	83	6,4	18,2	268	2,3	0	6,2	1,7	12,4	4,1	27,6	54,8
419766	7429136	15	50	6,2	22	271	2,2	0	4,4	1,1	15,3	6,1	70,6	54,6
419530	7429043	16	53	5,9	2,3	54	2,1	0,2	2,6	0,8	6,8	2,2	34,3	50,4
419259	7428940	17	62	6,1	9,0	165	1,6	0,2	2,3	0,7	7,1	2,6	40,2	20,8
418999	7428844	18	79	6,0	4,6	162	2,8	0,2	3,5	1,2	9,7	2,5	34,1	64,7
418841	7428782	19	75	6,0	4,2	208	2,7	0,2	3,2	1,1	12,3	3,0	59,0	55,6

(continua)

Tabela 23. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- (mg/L solo)	Zinco ----- (mg/L solo)	Ferro ----- (mg/L solo)	Manganês ----- (mg/L solo)
419653	7429366	20	19	6,6	27	97	0,7	0,3	0,7	0,2	5,9	1,7	65,3	18,8
419433	7429233	21	32	6,2	5,0	100	1,8	0,3	1,3	0,5	3,7	1,5	35,6	29,5
419216	7429105	22	34	6,2	5,2	36	1,8	0	3,3	0,7	4,3	1,6	21,2	45,6
418984	7428987	23	67	5,9	3,6	200	3,5	0,3	4,6	1,3	9,1	2,8	34,1	68,4
418797	7428876	24	74	6,1	5,9	270	3,8	0	5,8	1,4	9,2	2,4	21,4	52
419571	7429550	25	24	6,2	10,3	63	0,9	0,9	0,2	0,1	5,6	0,7	29	31,7
419351	7429427	26	22	6,3	14,6	72	1,3	0,4	1,4	0,3	1,8	2,2	32,6	37,1
419144	7429318	27	29	6,4	4,1	122	1,4	0	1,9	0,6	3,5	1,1	19,2	35,1
418914	7429201	28	54	6,0	5,9	224	3,6	0	4,9	1,4	8,7	4,1	26,7	68,4
418684	7429082	29	64	6,0	4,1	207	2,9	0,2	4,3	1,2	11,7	2,2	32,5	42,6
419465	7429744	30	22	6,2	39,0	60	1,2	0,6	0,7	0,3	4,1	1,5	40	22,4
419246	7429625	31	26	6,3	24,0	117	1,5	0,3	2	0,5	2,2	1,8	56	22,6
419005	7429491	32	48	5,7	16,6	165	2,2	0,6	2,2	0,6	7,1	2,2	55,2	53,1
418800	7429356	33	62	5,8	6,3	267	3,2	0,5	3,5	1,2	11,4	3,6	39,4	74,5
418577	7429272	34	59	6,1	8,4	373	4,0	0	5	1,7	10,8	4,6	46,6	56,2
419352	7429969	35	22	6,1	53	113	1,6	0,7	0,6	0,2	2,9	5,1	51	13,6
419122	7429842	36	22	6,7	5,3	85	1,6	0	2,5	0,5	2,5	1,5	47,5	17,2
418927	7429726	37	28	5,9	8,8	236	2,2	0,3	2,7	0,6	8,9	8,1	111	76,0
418703	7429603	38	50	5,8	4,6	270	4,6	0	7,2	1,6	21,6	12,7	61,9	105,9

(continua)

Tabela 23. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- (mg/L solo)	Zinco ----- (mg/L solo)	Ferro ----- (mg/L solo)	Manganês ----- (mg/L solo)
418475	7429460	39	50	6,0	31	500	4,3	0	6	1,6	18	11,9	67,9	88,6
419258	7430183	40	20	6,2	73	91	1,5	0,4	0,8	0,6	0,8	2,5	44,6	28,6
419022	7430033	41	24	6,4	28	82	1,8	0,4	1,4	0,4	2,6	4,7	60,0	35,3
418799	7429903	42	34	6,1	11,1	154	3,2	0	4,9	0,9	13,6	7,4	99,4	65,2
418721	7429851	43	62	6,3	4	200	2,3	0	5,8	1,1	18,7	4,7	52,0	41,0
418663	7429730	44	36	6,0	6,1	204	3,4	0	7,7	1,8	18,2	13,6	118,6	53,9
418409	7429605	45	65	6,0	5,3	266	3,9	0	7,3	1,9	20,5	9,5	59,6	106,6
419113	7430392	46	21	6,7	36	74	1,7	0	1,4	0,6	1,7	2,1	42,5	11,1
418870	7430270	47	21	6,2	12,8	76	1,7	0,5	1,1	0,3	1,7	2,7	45,5	25,5
418667	7430147	48	26	6,3	6,5	80	1,8	0,5	1,4	0,3	3,5	2,9	20,8	55,9
418407	7430072	49	24	6,1	8,1	169	2,1	0,4	1,4	0,2	5,7	4,3	62,6	59,6
418155	7430038	50	30	6,1	4,7	86	2,0	0,5	1,6	0,5	9	2,7	88,5	65
419002	7430621	51	24	6,4	80	145	1,7	0,3	1,6	0,5	1,6	6,4	44,4	28,1
418752	7430494	52	21	6,4	18	95	1,6	0,3	1,1	0,4	0,9	1,8	21,1	25,9
418503	7430363	53	26	6,2	28	46	1,2	1	0,4	0,1	2,2	1,4	48,6	28,3
418279	7430247	54	21	6,2	13,4	59	1,7	0,8	0,4	0,2	1,9	2,1	32,6	54,5
418112	7430157	55	26	6,5	33	165	0,9	0,2	1,6	0,3	5,3	3,7	90,9	71,4
418883	7430854	56	17	7,0	18,5	80	0,9	0	1,7	0,5	1,2	1,7	35,8	17,6
418626	7430735	57	16	6,5	22,2	67	1,7	0	2,2	0,5	2,9	10,1	39,0	50,1

(continua)

Tabela 23. Conclusão

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cobre ----- (mg/L solo)	Zinco ----- (mg/L solo)	Ferro ----- (mg/L solo)	Manganês ----- (mg/L solo)
418401	7430621	58	18	6,6	7,6	82	0,8	0,4	0,7	0,1	1,3	0,8	46,5	31,8
418180	7430497	59	18	6,8	10,3	110	1,3	0	2,2	0,5	1,5	3,1	91,9	25,6
417975	7430407	60	26	6,2	11,4	73	1,2	0,6	1,1	0,2	1,1	1,7	89,1	41,2
418776	7431070	61	16	7,2	62,4	91	0,8	0	2,2	0,8	1,7	4,2	38	73
418555	7430981	62	14	6,7	24,9	62	1	0	1,6	0,3	1	4,3	36,5	33,6
418338	7430910	63	18	6,7	40,2	56	1,2	0	1,7	0,4	1,4	3,1	79,3	33,4
418114	7430829	64	15	6,4	24,7	52	1	0,5	0,7	0,2	1,1	1,6	62,2	31,4
417808	7430726	65	16	6,4	27	96	1,2	0,3	1,2	0,3	1,9	1,9	55,7	41,3
418529	7431181	66	16	6,5	8,7	50	0,6	0,5	0,7	0,1	1,6	1,1	45,3	22,9
418282	7431091	67	18	6,8	25,7	37	1,1	0	1,8	0,5	1,1	7,0	64,2	20,8
418062	7431012	68	16	6,8	52,8	43	1	0	1,7	0,3	1,2	2,0	61,6	24,7
417926	7430973	69	17	6,4	15	46	1	0,4	0,9	0,1	1,5	3,2	84,3	28,6
418307	7431269	70	24	6,5	12,4	53	1,2	0,2	1,9	0,3	2,5	2,9	112	45,6
418008	7431187	71	15	6,8	21,7	47	0,9	0	1,3	0,3	1,0	3,6	43	30,8
417857	7431094	72	17	6,6	33,8	64	1,3	0	2	0,5	1,2	3,2	50,6	27,9
418113	7431357	73	18	6,6	37	40	0,8	0,2	1	0,2	1,2	1,7	39,9	35,1
417949	7431351	74	19	6,6	38,4	36	0,6	0,5	1	0,1	1,4	0,5	76,1	19,4
417827	7431348	75	19	6,3	35,2	83	1,4	0,6	0,8	0,2	0,8	2,4	37,9	53,6
417708	7431223	76	17	6,5	34,4	79	1,3	0,7	0,8	0,2	0,8	18,3	55,3	30,0
417672	7431349	77	20	6,5	61,4	61	1,6	0,3	2,4	0,4	1,3	2,1	131,2	60,8

Tabela 24. Dados geoquímicos para a profundidade de 20 – 40 cm.

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cobre ----- (mg/L solo)	Zinco ----- (mg/L solo)	Ferro ----- (mg/L solo)	Manganês ----- (mg/L solo)
420057	7428567	1	72	6,3	9	292	4,3	0	8,0	2,7	14,4	21,3	11,7	43,6
419766	7428249	2	70	6,2	4,2	300	2,9	0	3,7	1,7	25,9	9,8	65,3	6,7
419462	7428312	3	72	6,2	4,2	242	3,1	0	8,1	1,6	27,4	14	40	69,4
419213	7428109	4	83	6,3	3,7	214	2,0	0	6	1,2	26,9	4,6	52,7	41,9
420012	7428705	5	83	6,1	1,6	187	3,7	0	9,8	1,9	14,8	10,2	26,3	76,6
419795	7428598	6	92	6,3	1,0	248	2,3	0	7,1	1,4	14,9	3,4	32	40,7
419620	7428510	7	88	6,3	1,5	215	3,2	0	10,1	1,8	13,1	8,7	2,5	41,3
419396	7428394	8	88	6,3	2,4	214	2,2	0	8,6	1,7	28,8	12	45,5	75,1
419125	7428252	9	75	6,3	12,6	286	2,5	0	6,5	1,4	20,6	6	85,3	51,8
419903	7428910	10	64	6,4	3,9	223	2,2	0	3,5	0,6	11,1	2,4	40,1	34,7
419682	7428790	11	88	6,1	2,7	206	2,7	0	4,2	1,3	12,1	11,6	31,7	56,1
419456	7428667	12	79	6,3	1,0	117	2,6	0	4,9	0,8	11,1	3	33,1	44,9
419286	7428582	13	72	6,4	2,4	79	2,0	0	3,7	0,7	10	0,9	35,1	25,5
419016	7428421	14	88	6,4	2,6	118	2,2	0	5,7	1,3	15,2	1,9	29,9	49,1
419766	7429136	15	46	6,3	19,6	180	2,0	0	3,5	1	14,5	6,7	69,3	44,8
419530	7429043	16	62	6,2	1,3	36	1,9	0,2	2,3	0,8	8,3	0,7	40,8	41,3
419259	7428940	17	65	6,3	1,0	93	1,4	0,2	2,6	0,7	7,8	0,6	63,1	10,1
418999	7428844	18	88	6,4	1,2	94	1,5	0	3,2	1,3	10,1	0,7	44,9	23,4
418841	7428782	19	88	6,2	1,2	107	1,8	0,2	2,1	1,1	12,3	1	51,1	28,3

(Continua)



Tabela 24. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo)	Zinco ----- mg/L solo)	Ferro ----- mg/L solo)	Manganês ----- mg/L solo)
419653	7429366	20	25	6,8	6,2	77	0,5	0	1,8	0,3	5,3	1,3	33	5,4
419433	7429233	21	34	6,1	2,1	60	1,5	0,5	1	0,5	4,7	0,6	32,2	18,7
419216	7429105	22	46	6,6	2,5	25	1,4	0	3,4	0,8	5,6	0,9	26,3	29,7
418984	7428987	23	79	6,0	2,2	125	2,7	0,3	3,4	1,1	11,3	1,0	32,1	40,7
418797	7428876	24	79	6,2	3,9	230	3,3	0	5,6	1,3	12,2	1,6	24,8	38,2
419571	7429550	25	26	6,1	2,8	55	0,9	0,7	0,6	0,1	3,8	0,9	24,6	18,8
419351	7429427	26	27	6,1	4,1	39	1,3	0,2	1,4	0,1	3,4	1,1	22,3	28,1
419144	7429318	27	38	6,5	2,0	78	1,2	0	1,7	0,5	4,7	0,5	21,5	18,5
418914	7429201	28	62	5,8	3,9	131	4,0	0,4	4,0	1,2	9,2	3,0	25,6	99,7
418684	7429082	29	86	6,1	2,3	149	2,8	0,3	3,2	1,0	12,2	0,9	40,4	35,9
419465	7429744	30	24	6,4	14,1	50	1,1	0,6	0,6	0,2	3,2	1,0	35,9	16,2
419246	7429625	31	34	6,4	5,4	100	1,4	0,2	1,9	0,7	3,0	0,6	24,5	7,6
419005	7429491	32	57	5,7	2,6	82	2,0	0,7	2,0	0,6	8,5	0,8	45,3	24,4
418800	7429356	33	67	5,9	4,4	192	3,0	0,5	2,4	1,0	12,3	1,8	33,4	62,7
418577	7429272	34	79	6,3	4,4	300	3,9	0	4,4	1,7	13,0	1,9	35,9	56,6
419352	7429969	35	24	6,1	10,1	53	1,5	1	0,3	0,1	2,0	1,7	45,2	26,9
419122	7429842	36	31	6,8	3,2	58	1,5	0	2,8	0,8	3,2	0,7	20,6	7,3
418927	7429726	37	24	6,0	3,0	107	1,8	0,2	2,5	0,6	10,1	5,0	114	74,8
418703	7429603	38	62	6,2	4,6	191	3,6	0	6,8	1,5	23,7	7,3	34,8	88,7

(continua)

Tabela 24. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio -----	Cálcio cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio -----	Cobre -----	Zinco (mg/L solo)	Ferro -----	Manganês -----
418475	7429460	39	72	6,3	7,2	364	3	0	5,5	1,5	18,2	5,3	46,5	74,5
419258	7430183	40	26	6,3	5,4	60	1,3	0,5	1,1	0,4	1,4	1,7	27,9	34,1
419022	7430033	41	24	6,4	3,1	69	1,3	0,5	1,4	0,4	2,5	2,8	25,7	21,1
418799	7429903	42	47	6,5	1	73	1,8	0	4,2	0,9	14,2	1,6	43,1	38
418721	7429851	43	51	6,5	2,1	136	2,4	0	4,7	1	15,4	4,9	78,1	29,3
418663	7429730	44	54	6,2	5,8	138	3	0	8,2	1,7	18,7	10,2	147,7	41,5
418409	7429605	45	70	6,4	4,1	116	2,5	0	6,3	1,7	19,6	3,6	51,1	61,7
419113	7430392	46	24	6,5	7,1	48	1	0,5	0,6	0,3	2,1	0,9	35,9	8,9
418870	7430270	47	29	6,2	4	55	1,4	0,6	1,1	0,2	1,7	1,3	25,5	12,5
418667	7430147	48	34	6,4	2,8	32	1,6	0,3	1,9	0,5	4,3	2	16,3	48,2
418407	7430072	49	30	6,4	4	124	1,6	0,2	2	0,5	6,8	2,3	29,1	51,3
418155	7430038	50	44	6,3	4	37	1,5	0,4	1,9	0,6	8,3	1,3	34,2	50,4
419002	7430621	51	26	6,3	60	139	2,1	0	2,4	0,9	0,7	8,1	24,6	27,1
418752	7430494	52	24	6,6	5,6	59	1,4	0,3	1,1	0,4	1,4	1,8	15,4	17,6
418503	7430363	53	23	6,2	7	39	1,1	1,1	0,4	0,1	2,2	1,3	31	21,1
418279	7430247	54	22	6,6	3,5	38	1	0,4	0,7	0,1	2,2	1,6	19	28,8
418112	7430157	55	26	6,6	12,6	191	1	0,2	1,8	0,4	6,1	2,2	51,9	55,2
418883	7430854	56	20	6,9	7,1	53	0,7	0	1,3	0,5	1,3	1,2	33,9	13,7
418626	7430735	57	20	6,5	8,7	39	1,4	0	2,3	0,4	1,4	3,5	27,2	47,8
418401	7430621	58	21	6,5	6,9	52	0,7	0,4	0,7	0,2	1,4	0,9	41,2	18,8

(continua)

Tabela 24. Conclusão

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo)	Zinco ----- mg/L solo)	Ferro ----- mg/L solo)	Manganês ----- mg/L solo)
418180	7430497	59	20	6,6	5,7	51	0,9	0,3	1,1	0,3	1,8	1,1	45,5	19,2
417975	7430407	60	24	6,2	9,7	69	1,2	0,5	1,0	0,3	1,1	1,7	69,3	24,6
418776	7431070	61	23	7,3	17,7	56	0,5	0	1,9	0,8	1,5	1,4	25,5	2,3
418555	7430981	62	18	6,7	8,2	31	0,8	0,3	0,8	0,2	1,4	2	31,3	34,5
418338	7430910	63	20	6,5	5,8	33	0,9	0,4	0,9	0,3	1,4	1	51,9	25,1
418114	7430829	64	14	6,3	11,6	40	0,9	0,6	0,8	0,1	1,4	0,8	72,3	18,1
417808	7430726	65	24	6,3	34,0	39	0,7	0,8	0,6	0,1	2,3	0,6	42,6	19,6
418529	7431181	66	22	6,7	5,8	46	0,5	0,6	0,6	0,1	1,6	0,9	73,5	16,1
418282	7431091	67	24	6,6	7,8	36	0,9	0	1,3	0,6	1,4	1,5	81,8	13,5
418062	7431012	68	18	6,5	8,0	26	0,8	0,4	0,7	0,3	1,4	0,7	117,2	16,6
417926	7430973	69	24	6,4	7,6	41	0,7	0,6	0,6	0,1	1,5	1,5	128,7	17
418307	7431269	70	22	6,6	6,3	40	0,8	0,3	1,0	0,2	2	1,8	49,7	28,2
418008	7431187	71	16	6,7	11,1	34	0,9	0,2	1,1	0,4	1,4	1,6	76,6	22,8
417857	7431094	72	15	6,7	4,0	24	0,8	0	1,3	0,6	1,4	0,7	46,1	10,9
418113	7431357	73	19	6,7	7,2	32	0,6	0,2	0,8	0,2	1,5	0,8	29,9	24,5
417949	7431351	74	20	6,4	23,0	30	0,5	0,5	0,8	0,1	1,8	0,9	46,2	14,6
417827	7431348	75	19	6,4	12,5	66	1,2	0,6	0,9	0,3	0,9	1,5	29,2	35,9
417708	7431223	76	20	6,2	7,3	34	1,2	1	0,4	0,1	0,9	0,8	49,1	25,2
417672	7431349	77	24	6,7	21,6	70	1,3	0,3	1,7	0,3	1,2	1,4	56	34,4

Tabela 25. Estatística descritiva dos parâmetros geoquímicos para a profundidade de 0 – 20 cm.

	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio -----	Cálcio cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio -----	Cobre -----	Zinco (mg/L solo)	Ferro -----	Manganês -----
Mínimo	14	5,7	1,8	36	0,6	0	0,2	0,1	0,8	0,5	29	30
Máximo	88	7,2	80	667	4,6	1	9,6	2,7	25,9	23,5	112	76
<b>Média</b>	<b>39,3</b>	<b>6,3</b>	<b>19,1</b>	<b>155,4</b>	<b>2,1</b>	<b>0,02</b>	<b>3,2</b>	<b>0,78</b>	<b>7,4</b>	<b>4,8</b>	<b>57,8</b>	<b>58,9</b>
Desvio padrão	23,4	0,33	18,8	117,2	1,06	0,16	2,6	0,6	7,0	4,5	25,78	16,5
Coeficiente de variação (%)	59,6	5,2	98,4	75	51,3	616	81,3	77	94,6	94	44,6	27,94
Assimetria	0,60	0,57	1,6	1,65	0,71	6,16	0,97	0,89	1,05	2,0	1,51	-0,86
Curtose	1,26	0,24	2,3	4	-0,48	38	-0,24	-0,02	0,14	4,14	1,62	-0,46

Tabela 26. Estatística descritiva dos parâmetros geoquímicos para a profundidade de 20 – 40 cm.

	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio -----	Cálcio cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio -----	Cobre -----	Zinco (mg/L solo)	Ferro -----	Manganês -----
Mínimo	14	5,7	1	24	0,5	0	0,3	0,1	0,7	0,5	2,5	2,3
Máximo	92	7,3	60	364	4,3	1,1	10,1	2,7	28,8	21,3	147,7	99,7
<b>Média</b>	<b>44,7</b>	<b>6,4</b>	<b>6,9</b>	<b>106,7</b>	<b>1,74</b>	<b>0,25</b>	<b>2,9</b>	<b>0,74</b>	<b>7,9</b>	<b>3,0</b>	<b>44,16</b>	<b>33,88</b>
Desvio padrão	25,8	0,25	8,3	82,5	0,94	0,28	2,46	0,57	7,44	3,73	25,93	20,66
Coeficiente de variação (%)	57,7	3,9	119,1	77,4	54,3	113	84,8	77	94,1	123	58,7	60,9
Assimetria	0,53	0,45	4,14	1,19	0,83	1,0	1,27	0,93	1,1	2,57	1,88	0,97
Curtose	-1,35	1,85	22,4	0,55	-0,08	0,46	0,76	0,44	0,48	7,73	4,33	0,74

Tabela 27. Matriz de correlação entre dados geofísicos e geoquímicos para a profundidade de 0 – 20 cm.

	<i>K</i>	<i>eU</i>	<i>eTh</i>	<i>Resistividade aparente</i>	<i>Argila</i>	<i>pH</i>	<i>Fósforo</i>	<i>Potássio</i>	<i>Matéria orgânica</i>	<i>Al</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>
<i>K</i>	1,00															
<i>eU</i>	0,10	1,00														
<i>eTh</i>	<b>0,26</b>	<b>0,76</b>	1,00													
<i>Resistividade aparente</i>	0,18	<b>-0,38</b>	0,01	1,00												
<i>Argila</i>	-0,04	<b>0,59</b>	0,09	<b>-0,72</b>	1,00											
<i>pH</i>	0,01	-0,14	0,17	<b>0,34</b>	<b>-0,29</b>	1,00										
<i>Fósforo</i>	0,00	-0,04	0,06	0,05	-0,11	-0,05	1,00									
<i>Potássio</i>	<b>-0,25</b>	<b>0,24</b>	-0,18	<b>-0,67</b>	<b>0,70</b>	<b>-0,30</b>	-0,15	1,00								
<i>Matéria orgânica</i>	0,02	-0,07	-0,06	0,08	-0,04	-0,07	-0,07	-0,05	1,00							
<i>Al</i>	-0,01	-0,07	0,13	<b>0,34</b>	<b>-0,29</b>	0,13	-0,08	<b>-0,30</b>	0,08	1,00						
<i>Ca</i>	0,08	-0,11	0,05	0,06	-0,20	0,02	0,11	<b>-0,32</b>	0,01	0,09	1,00					
<i>Mg</i>	-0,04	-0,20	0,07	0,20	<b>-0,39</b>	-0,04	0,17	-0,20	0,04	0,22	0,11	1,00				
<i>Cu</i>	-0,12	-0,17	0,00	<b>0,32</b>	<b>-0,32</b>	0,09	0,00	<b>-0,33</b>	<b>0,29</b>	0,24	0,12	0,14	1,00			
<i>Zn</i>	-0,13	-0,16	-0,05	0,14	<b>-0,28</b>	0,16	-0,10	-0,14	0,20	0,15	-0,03	0,11	0,07	1,00		
<i>Fe</i>	-0,19	-0,14	0,05	0,16	<b>-0,25</b>	0,01	0,19	-0,16	-0,09	0,10	0,05	0,11	0,23	0,12	1,00	
<i>Mn</i>	0,05	<b>-0,29</b>	-0,04	<b>0,35</b>	<b>-0,49</b>	0,05	<b>0,36</b>	<b>-0,35</b>	0,13	0,07	-0,04	0,21	0,11	0,06	<b>0,31</b>	1,00

Os valores em azul são significativos a 5%.

Tabela 28. Matriz de correlação entre dados geofísicos e geoquímicos para a profundidade de 20-40 cm.

	<i>K</i>	<i>eU</i>	<i>eTh</i>	<i>Resistividade aparente</i>	<i>Argila</i>	<i>pH</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Matéria orgânica</i>	<i>Al</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>
<b>K</b>	1,00															
<b>eU</b>	0,10	1,00														
<b>eTh</b>	0,26	<b>0,76</b>	1,00													
<b>Resistividade Aparente</b>	0,18	-0,38	0,01	1,00												
<b>Argila</b>	-0,08	<b>0,55</b>	0,04	<b>-0,74</b>	1,00											
<b>pH</b>	0,23	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	-0,11	0,23	1,00										
<b>P</b>	0,13	<b>0,62</b>	<b>0,79</b>	0,06	-0,02	<b>0,79</b>	1,00									
<b>K</b>	-0,26	0,30	-0,14	<b>-0,65</b>	<b>0,71</b>	-0,02	-0,05	1,00								
<b>Matéria orgânica</b>	0,20	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>	-0,18	0,30	1,00	<b>0,78</b>	0,06	1,00							
<b>Al</b>	0,18	-0,10	0,16	<b>0,50</b>	-0,44	0,10	0,10	<b>-0,51</b>	0,06	1,00						
<b>Ca</b>	0,15	<b>0,95</b>	<b>0,87</b>	-0,29	0,41	<b>0,97</b>	<b>0,74</b>	0,17	<b>0,98</b>	-0,05	1,00					
<b>Mg</b>	0,21	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	-0,16	0,28	1,00	<b>0,78</b>	0,03	1,00	0,07	<b>0,98</b>	1,00				
<b>Cu</b>	0,07	-0,18	0,04	0,17	-0,30	-0,06	0,06	-0,24	-0,09	0,21	-0,11	-0,08	1,00			
<b>Zn</b>	0,02	-0,09	0,06	0,12	-0,24	0,01	0,09	-0,12	-0,01	-0,10	-0,04	0,00	0,04	1,00		
<b>Fe</b>	0,18	0,21	0,30	-0,05	-0,05	0,24	0,22	-0,03	0,23	0,07	0,22	0,24	0,09	-0,03	1,00	
<b>Mn</b>	0,07	-0,35	0,03	0,47	<b>-0,64</b>	-0,14	0,02	<b>-0,52</b>	-0,19	0,31	-0,26	-0,17	0,24	0,19	0,17	1,00

Os valores em azul são significativos a 5%.

O eU e o eTh apresentaram correlações positivas com a argila, o pH, o cálcio e o magnésio (Figuras 56 a 63). O pH do solo é influenciado por vários fatores, incluindo o material de origem, a precipitação, a decomposição da matéria orgânica e a adubação nitrogenada. Um solo originado de rocha básica, geralmente terá valores de pH mais altos do que aqueles formados por rochas ácidas. As reações de hidrólise de silicatos como é o caso dos feldspatos, abundantes nas rochas básicas é importante controlador do pH. Neste processo as bases são liberadas para a lixiviação enquanto minerais de argila são formados. A água da chuva, passando pelo solo, lixivia os nutrientes básicos, como o cálcio e o magnésio. Eles são substituídos por elementos acidificantes como o hidrogênio, o manganês e o alumínio. A matéria orgânica está sendo continuamente decomposta pelos microrganismos em ácidos orgânicos, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água, formando ácido carbônico. O ácido carbônico, por sua vez, reage com os carbonatos de cálcio e magnésio no solo para formar bicarbonatos solúveis que são lixiviados, deixando o solo ácido.

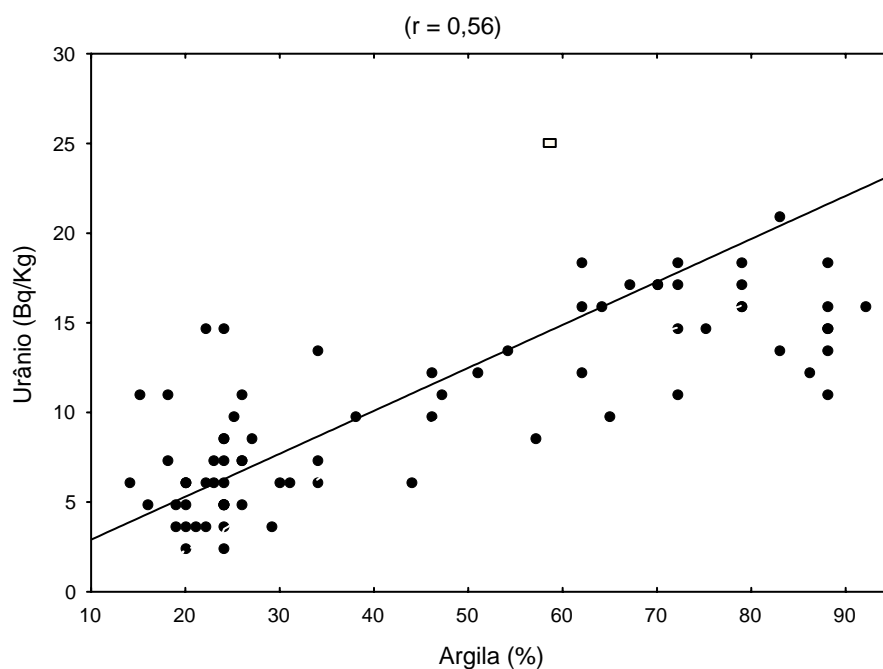


Figura 56. Correlação entre urânio e argila

Na presente área cultiva-se soja e trigo, culturas cujo pH deve estar na faixa de 6,0 a 6,5. Como as precipitações na região estão em torno de 1.492 mm/ano (Rufino et al., 1993), muitos nutrientes são perdidos por lixiviação. Outro fator que contribui para a diminuição de elementos como cálcio, magnésio, fósforo e potássio, é que parte dos mesmos é removida junto com a colheita de grãos. Tais fatores provocam a redução do pH dos solos para níveis mais ácidos, cujo

procedimento a ser adotado é o aporte de calcário dolomítico, que contém em sua composição cálcio e magnésio.

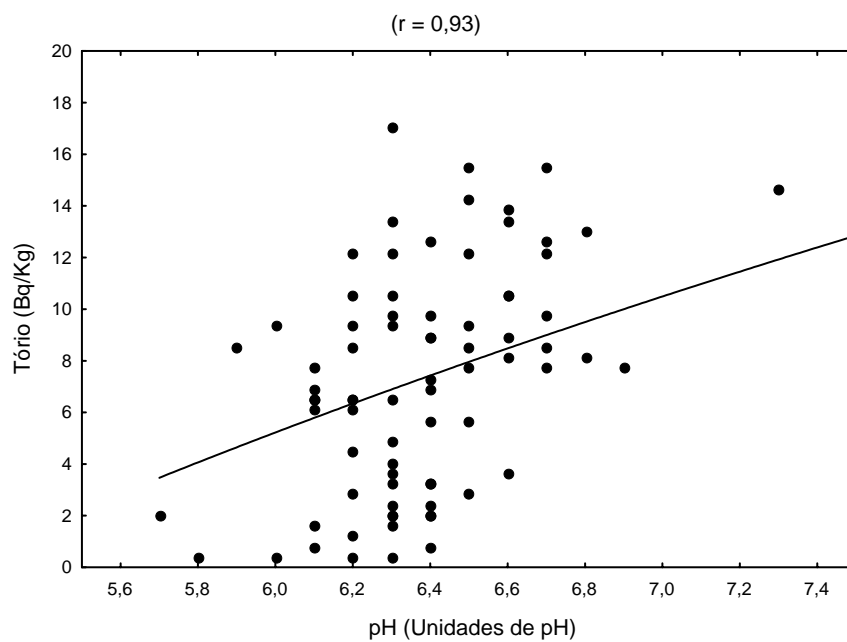


Figura 57. Correlação entre pH e tório

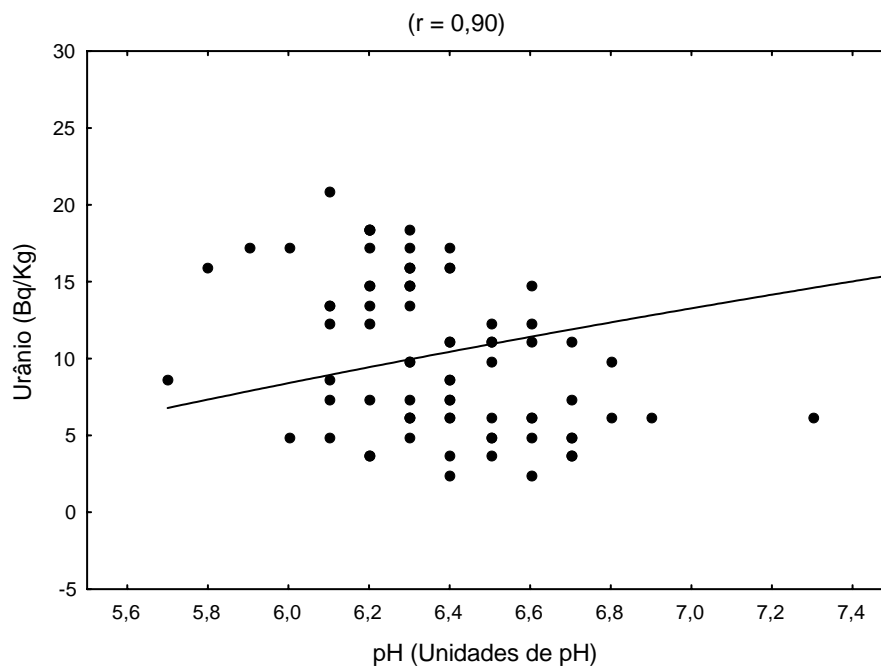


Figura 58. Correlação entre pH e urânio



O urânio é um dos elementos radioativos cuja mobilidade nos solos pode variar muito, dependendo do tipo de solo e de suas propriedades físico-químicas. Um dos fatores que mais afeta o comportamento do U nos solos agrícolas é a sua composição e o pH (Giblin et al., 1981). A adsorção de U pelas partículas do solo é mais elevada para valores mais baixos de pH e esta se reduz drasticamente com o aumento deste parâmetro (Morrison et al., 1995). A extensão desta relação é válida em solos cuja variação de pH esteja entre 4 e 9 (McKinley, 1995; Arnold et al., 1998; Kilislioglu, 2003).

Os carbonatos na solução do solo, competem com o urânio sob a forma de uranila pelos sítios de troca na superfície dos argilo minerais, formando complexos de carbonatos que são carregados negativamente como  $UO_2(CO_3)_2$  e  $UO_2(CO_3)_3$  (Giblin et al., 1981).

As correlações do pH com o eU e o eTh foram respectivamente de 0,90 e 0,93, muito semelhantes àquela obtida por Echevarria (2001), de 0,89 entre o U e o pH, em estudos com 21 tipos de solos da França e do Canadá, com diferentes texturas, pH na faixa de 5,5 a 8,8 e conteúdo de matéria orgânica entre 1,0 e 4,6%. Tais solos foram tratados com nitrato de uranila, objetivando ver o comportamento do  $UO_2$ , forma predominante em solos agrícolas. Pelos resultados obtidos, segundo o autor, solos com valores de pH = 5,5, adsorveram mais urânio do que aqueles com pH acima do referido valor.

É fato que o pH, dita à dinâmica dos íons na solução dos solos. Quando os teores de cálcio e magnésio são elevados, como no presente caso, cujo aporte é suplementado por calcário dolomítico, quantitativamente os níveis de cálcio e magnésio se elevam, portanto competindo com outros íons. O aumento da concentração de um íon na solução do solo pode provocar o deslocamento de outros íons adsorvidos, pelo princípio da ação das massas (Malavolta, 1981). Isto quer dizer que é possível que cátions de menor valência desloquem outros de maior valência, desde que sua concentração na solução do solo seja alta. Assim, por exemplo, adubações com altas doses de potássio podem deslocar cátions, como cálcio, magnésio, U e Th para a solução do solo (McBride, 1994).

Nos solos das regiões tropicais e subtropicais, o alumínio e o ferro estão presentes nos minerais de argila que são estáveis para valores de pH = 5,0. O alumínio é fixado nas estruturas das argilas e somente torna-se tóxico para as plantas quando os óxidos e a caulinita se dissolvem numa faixa de pH menor que 5,3 (Lopes, 1998). Observa-se nas Tabelas 22 e 23, que os valores médio de alumínio (0,02 e 0,25 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> solo) para as duas profundidades, são extremamente baixos, regulados pelos valores de pH 6,3 e 6,4, respectivamente. Em solos com pH acima de 6,0, até aproximadamente 7,0, o alumínio deixa de ser tóxico às plantas e praticamente não compete com

outros íons, pelo fato do mesmo se precipitar na forma de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , tornando-se pouco solúvel (Giongo, 1997; Salet et al., 1999).

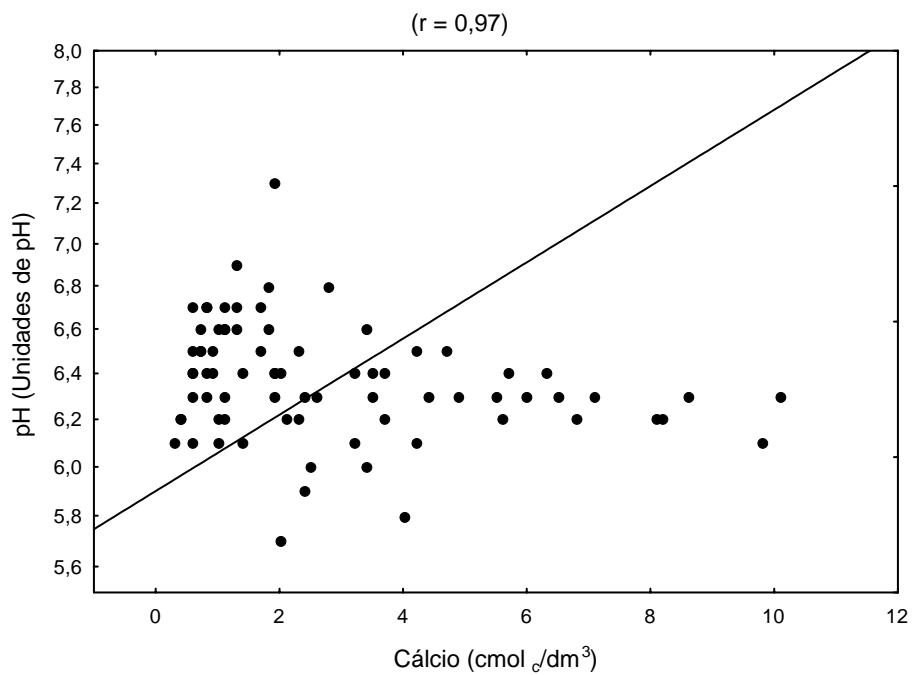


Figura 59. Correlação entre cálcio e pH

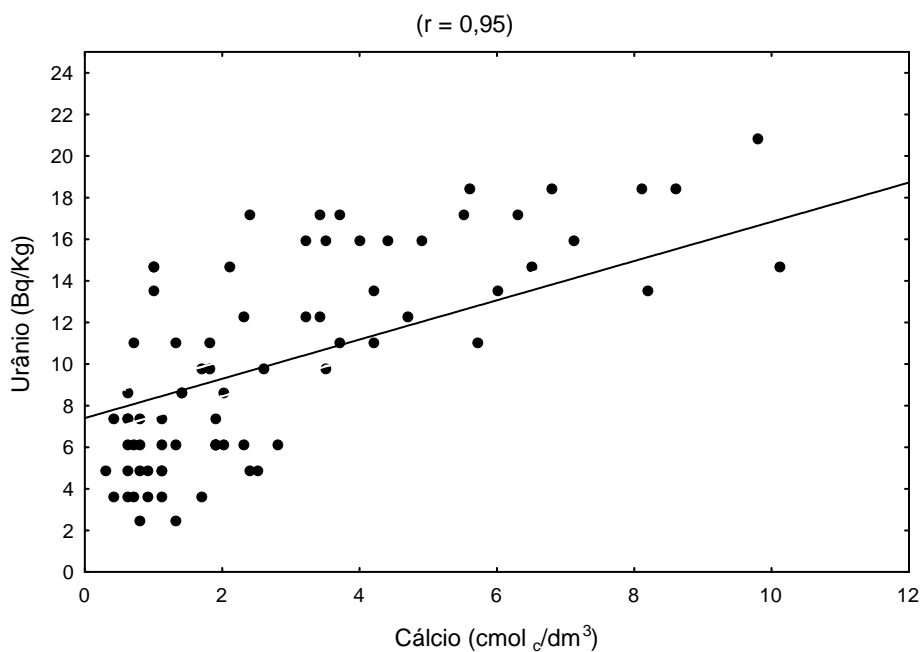


Figura 60. Correlação entre cálcio e urânio

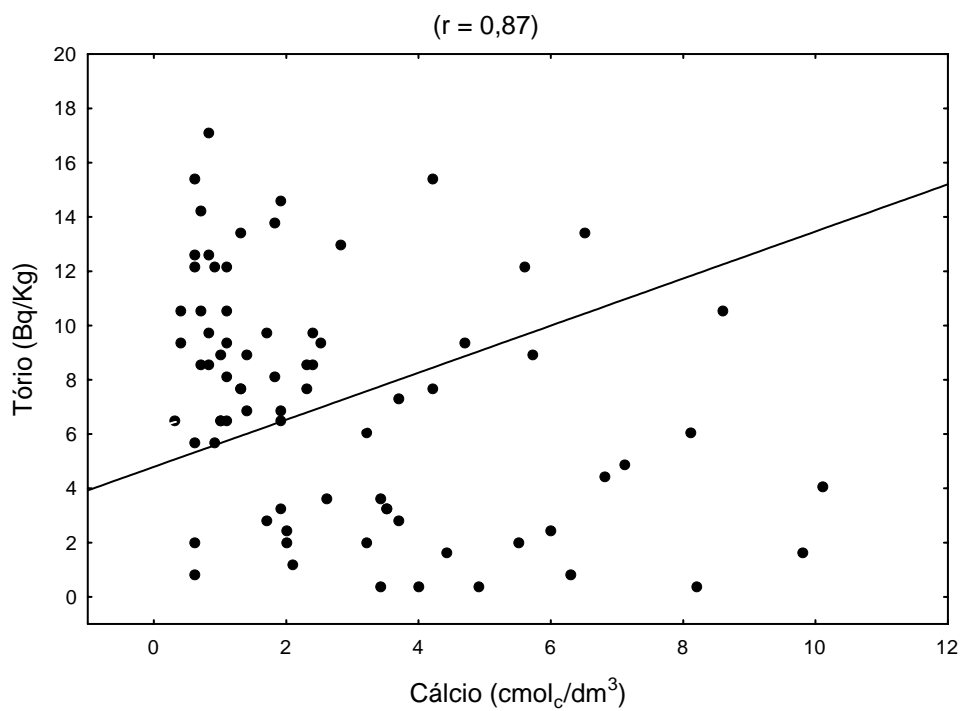


Figura 61. Correlação entre cálcio e tório

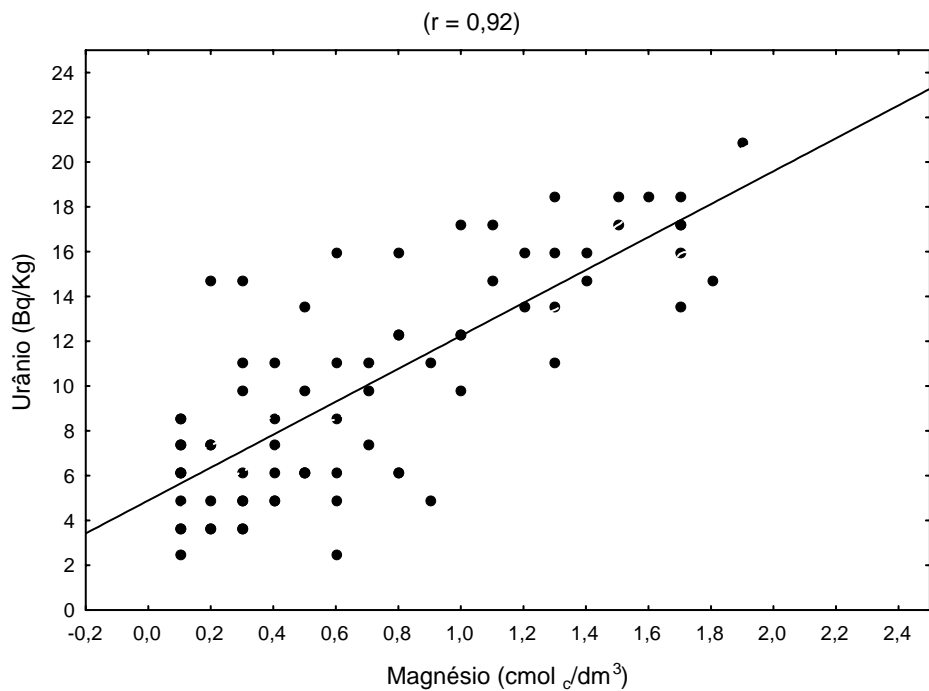


Figura 62. Correlação entre magnésio e urânio

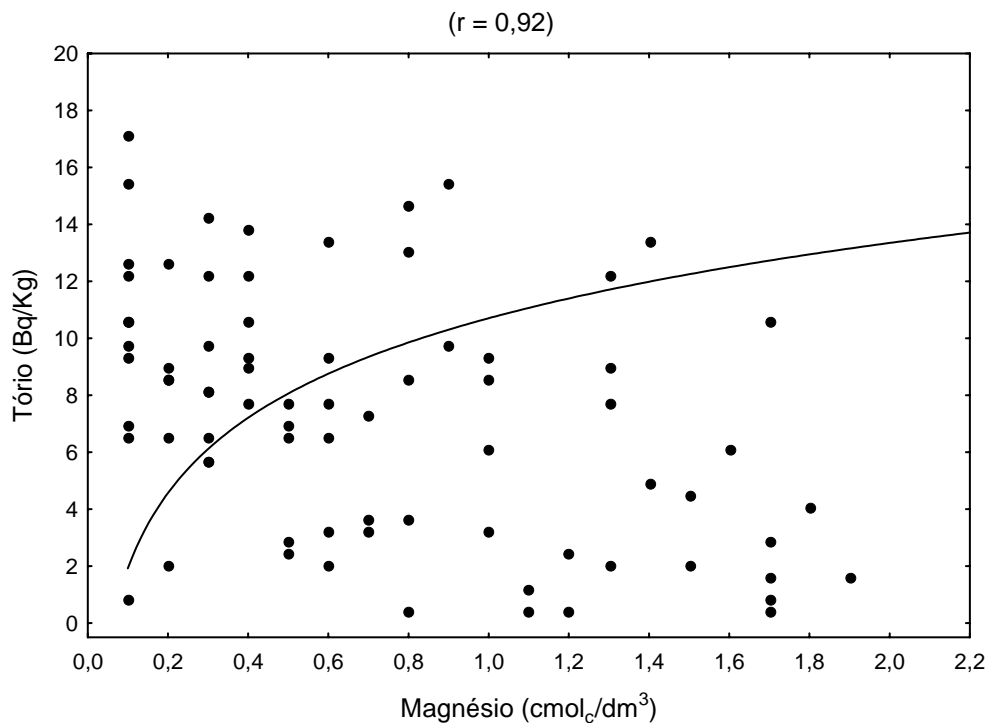


Figura 63. Correlação entre magnésio e tório

A distribuição espacial do pH dos solos pode ser observada nas Figuras 64 e 65. Embora já comentado, as diferenças nos valores para as duas profundidades não diferem significativamente, a julgar pelas respectivas médias (6,3 e 6,4), mas, especialmente, verifica-se que há uma distribuição irregular para ambas as profundidades. Os tratos de valores mais baixos coincidem com os solos argilosos. Enquanto o valor mínimo de pH em SMP (Tabelas 25 e 26) é de 5,7 para as duas profundidades, os valores médios das mesmas, estão acima de 6,0 ocorrendo esporadicamente alguns pontos com valores próximos ao mínimo. Os segmentos com valores mais elevados no solo areno/argiloso, possivelmente se devam a aplicações de calcário com maior frequência. Neste caso, a possível explicação reside no fato de que pode estar havendo maior perda de bases ao longo do perfil deste solo, como decorrência da aplicação frequente de calcário.

Os mapas com a espacialização dos teores de cálcio e magnésio, para as duas profundidades, estão expressos nas Figuras 66 a 69.

O mapa do cálcio para a profundidade de 20-40 cm e os do magnésio para as duas profundidades, denotam boa correlação com a unidade de mapeamento Nitossolo Vermelho Eutrófico. Tal solo originado de rochas eruptivas básicas, ricas em minerais ferromagnesianos e aplicação de calcário, muito contribui para a elevação dos teores dos elementos retromencionados,

na medida em que aumenta a profundidade, havendo, portanto, contribuição da rocha na medida em que a mesma vai se decompondo física e quimicamente.

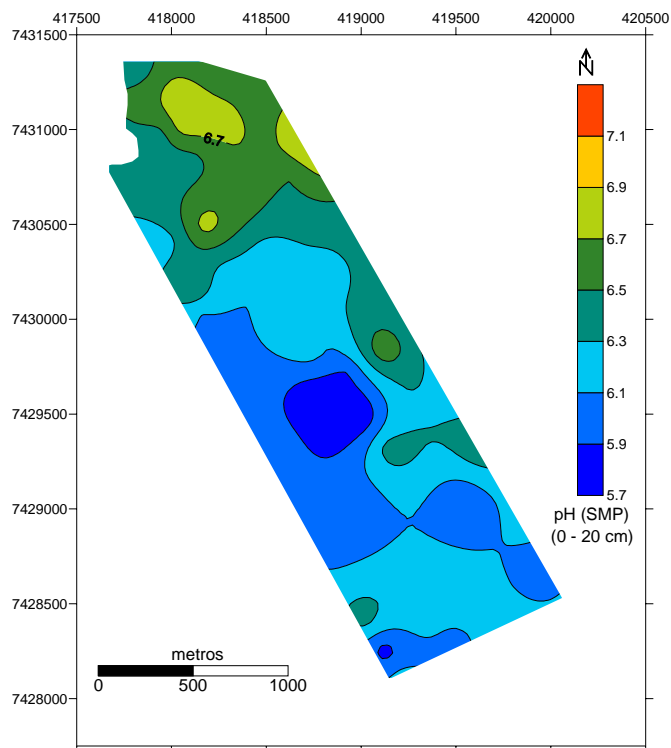


Figura 64. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 0 – 20 cm

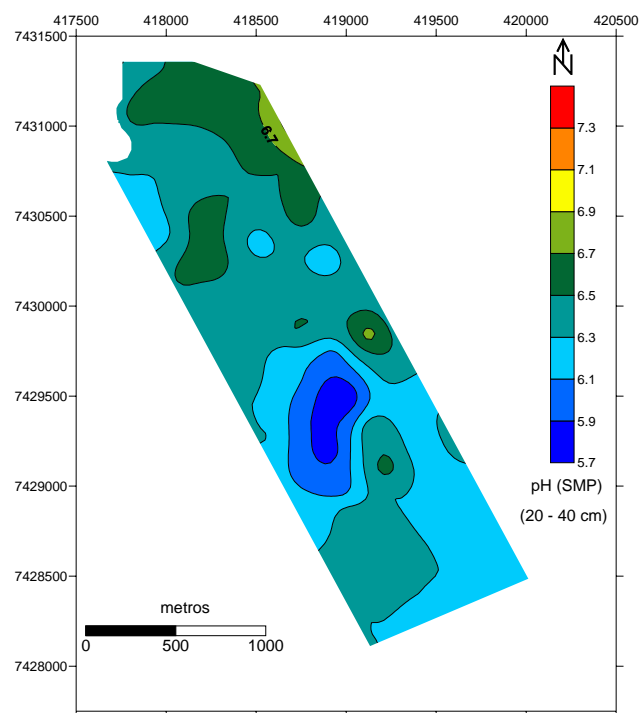


Figura 65. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 20 – 40 cm

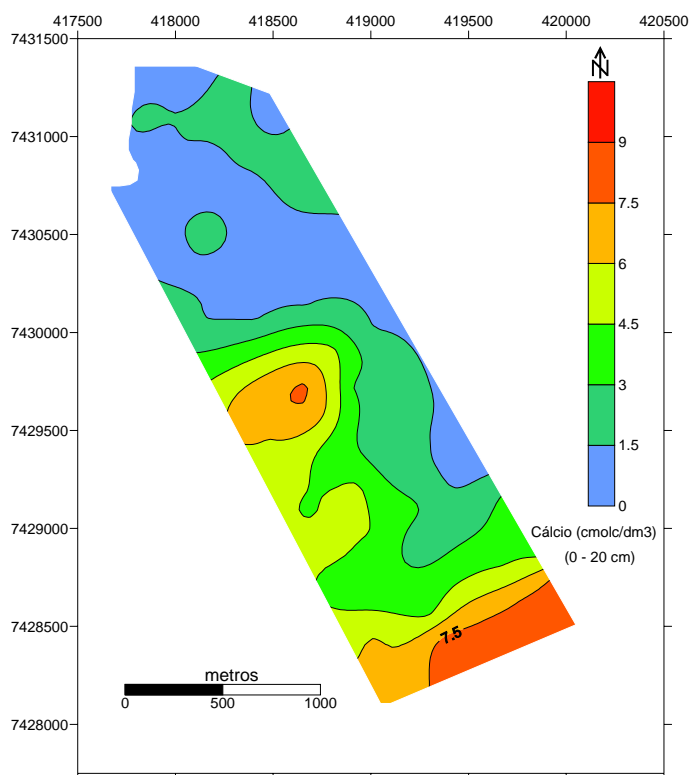


Figura 66. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 0 – 20 cm

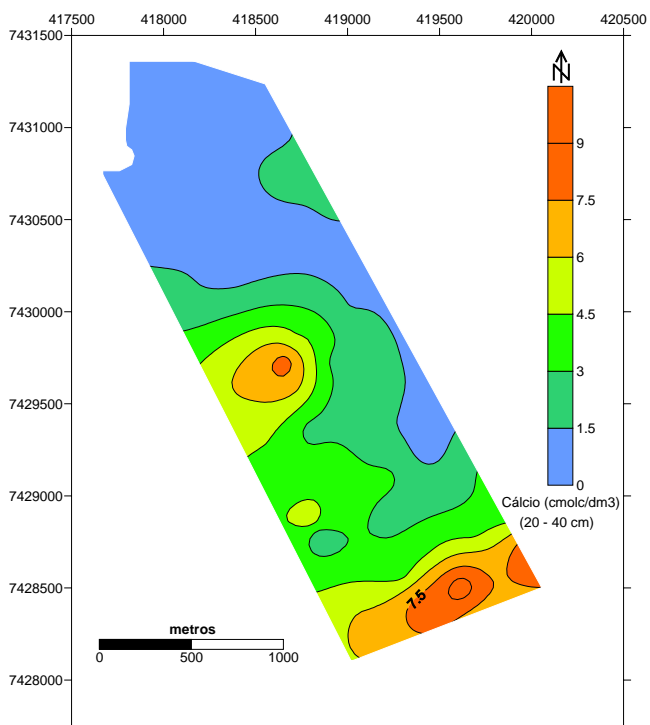


Figura 67. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 20 – 40 cm

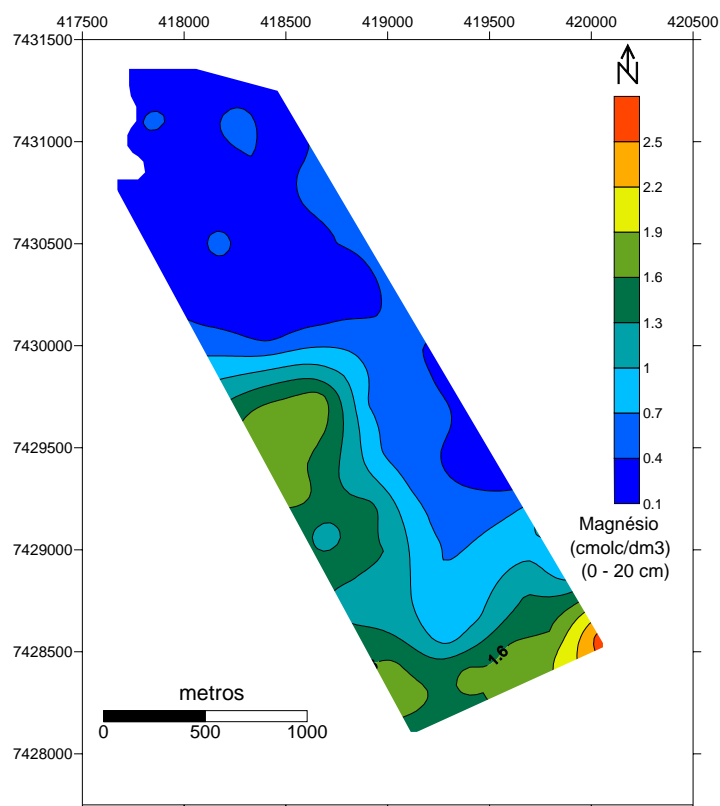


Figura 68. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 0 – 20 cm

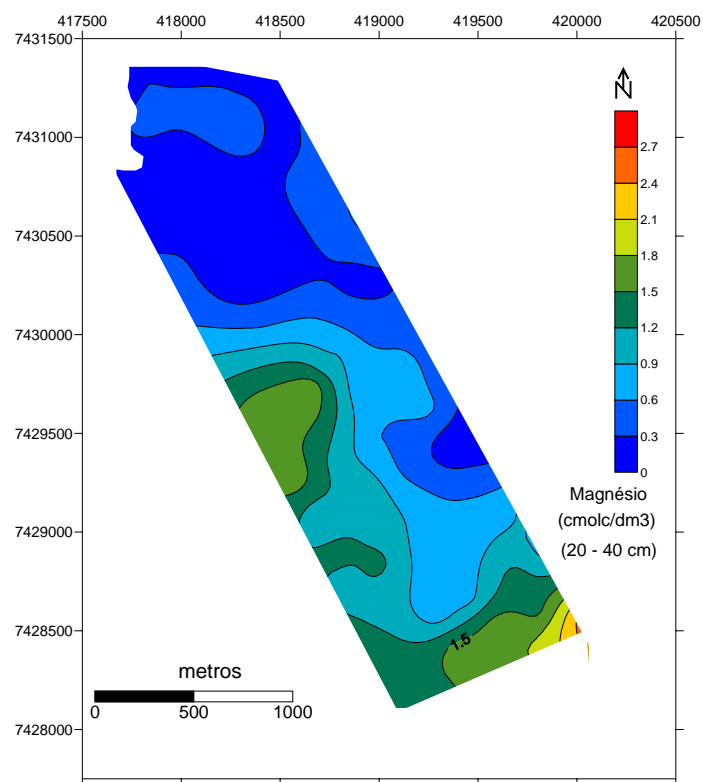
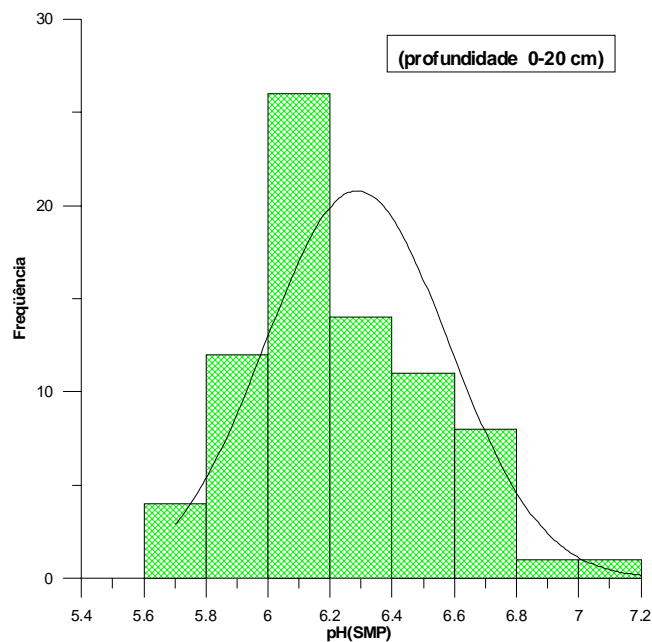
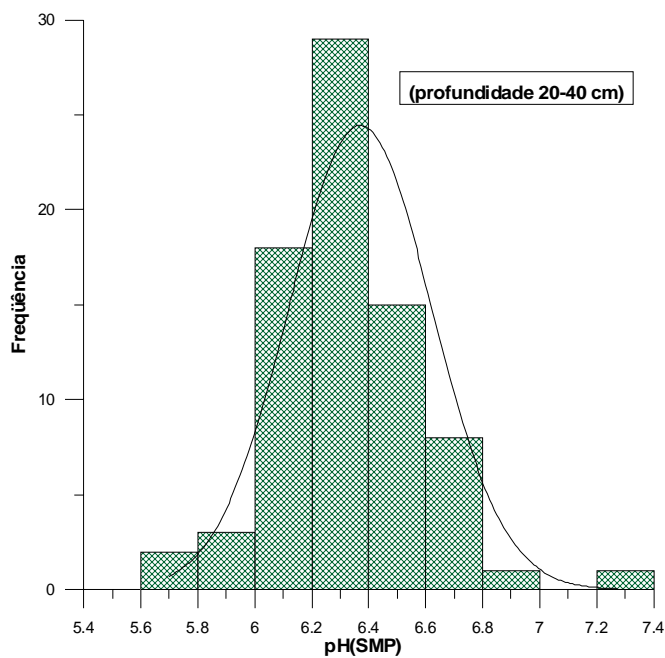


Figura 69. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 20 – 40 cm

O comportamento estatístico da variável pH para as duas profundidades, pode ser observado nas Figuras 70 (a e b). Os histogramas com as respectivas curvas de distribuições, mostram-se muito uniformes quanto aos coeficientes de variabilidade (5,2 e 3,9%) e assimetria (0,57 e 0,45) de acordo com as Tabelas 25 e 26, sendo levemente assimétricos negativos, podendo ser considerados como de distribuição normal.



(a)

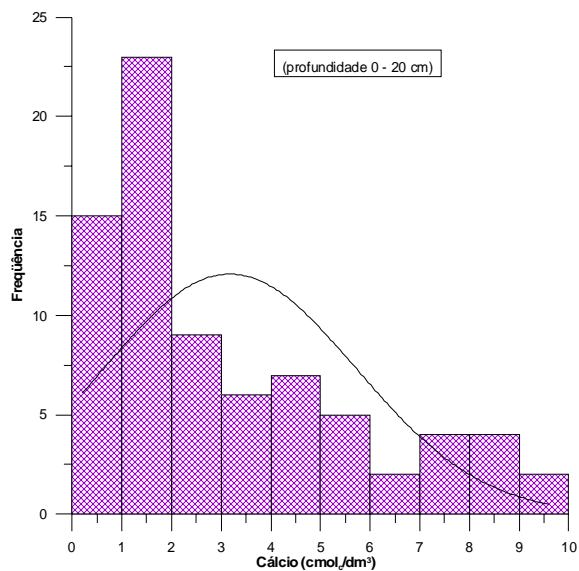


(b)

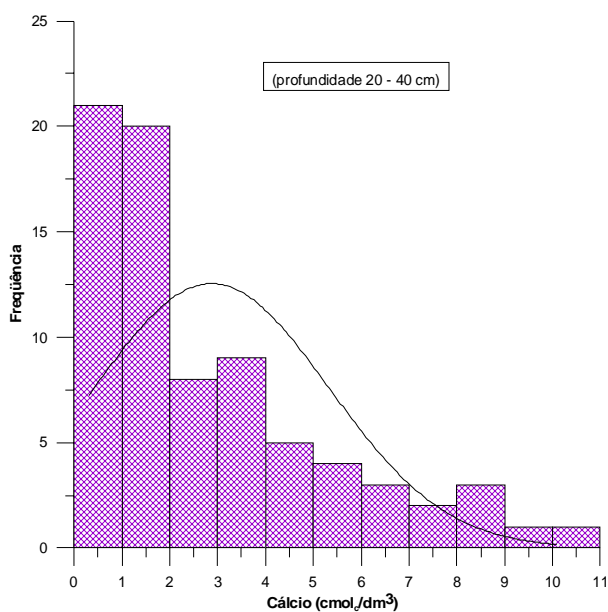
Figura 70. Histogramas e curvas de distribuições do pH para as duas profundidades



Conforme as Figuras 71a e b, das curvas de distribuições e respectivos histogramas da variável cálcio, mostram que ocorre uma distribuição assimétrica negativa (Tabela 25), para as duas profundidades, evidenciando que em algumas partes da área, a distribuição do calcário e, a conseqüente incorporação aos solos, pode estar sendo feita de forma irregular. As Figuras 72 (a e b) representam o comportamento estatístico do magnésio para as duas profundidades analisadas.

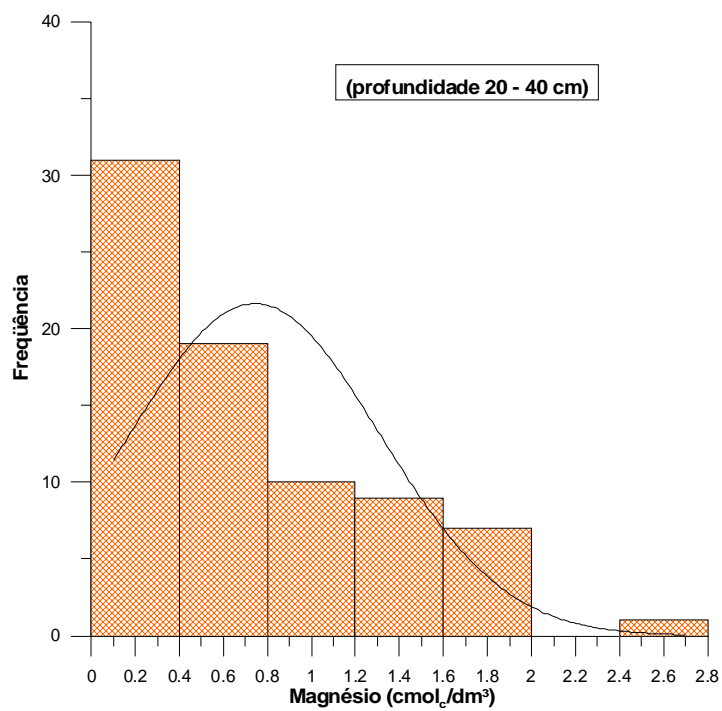


(a)

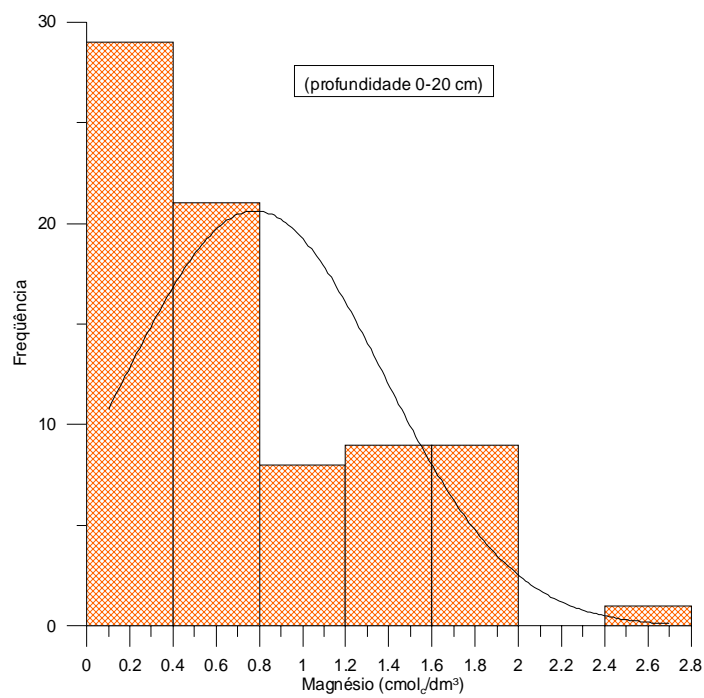


(b)

Figura 71. Histogramas e curvas de distribuições do cálcio para as duas profundidades



(a)



(b)

Figura 72. Histograma e curvas de distribuições do magnésio para as duas profundidades

Os teores de matéria orgânica por tipo de solo, considerando-se a percentagem de argila para as duas profundidades, encontram-se na Tabela 29 e a distribuição espacial para aquelas profundidades pode ser vista nas Figuras 74 e 75. Os solos argilosos apresentam teores mais elevados (3,11 e 2,69 %) em relação ao solo areno/argiloso (1,43 e 1,11%), respectivamente. A matéria orgânica para tais solos, é principalmente oriunda do sistema de manejo utilizado, plantio direto, onde a resteva das culturas da soja e do trigo não são queimadas, permanecendo sobre a superfície dos solos, não sendo incorporadas por processos de aração e gradagem, formando uma “manta” que protege os mesmos de processos erosivos mais intensos. Neste caso, a matéria orgânica vai sendo decomposta paulatinamente pelos processos de decomposição naturais.

Os solos argilosos, por possuírem pequenas quantidades de minerais de argila com grade 2:1 (montmorilonita), contribuem para aumentar a CTC, diferentemente daquele cuja textura areno-argilosa possui CTC menor, onde predominam quartzo e caulinita. Assim sendo, os teores de matéria orgânica passam a ser de fundamental importância para a capacidade de troca catiônica dos referidos solos, cuja contribuição pode elevar a CTC, proporcionada pela montmorilonita (80 – 150  $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$ ), para uma amplitude de 400 a 1400  $\text{cmol}_c \text{Kg}^{-1}$  (Theng et al., 1989), mostrando que a matéria orgânica não possui um valor fixo de CTC como os minerais de argila (Celi et al., 1997), mas também por que a CTC da matéria orgânica aumenta com a elevação do pH em função da ionização de grupos acídicos, principalmente COOH (Velloso et al., 1982).

Tabela 29. Estatísticas dos teores de matéria orgânica por tipo de solo para as duas profundidades.

	Areno/argiloso		Argilosos	
	Profundidades (cm)			
	0 – 20	0 – 20	20 – 40	20 – 40
Mínimo	0,60	1,60	0,50	1,40
Máximo	3,40	4,60	2,10	4,30
<b>Média</b>	<b>1,43a</b>	<b>3,11b</b>	<b>1,11a</b>	<b>2,69c</b>
Desvio padrão	0,57	0,79	0,39	0,74
Coefficiente de variação (%)	39,90	25,48	35,13	27,51
Assimetria	3,14	-0,73	-0,43	-0,38
Curtose	1,39	0,30	0,30	0,37

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem significativamente a 5% pelo teste t.

Os teores de urânio nos solos argilosos foram significativamente maiores do que no solo areno/argiloso (Tabelas 11 e 12). Este contraste está relacionado a diferentes teores de argila, além da contribuição da matéria orgânica, a qual passa a ser de suma importância na retenção de íons, como por exemplo, o urânio nas camadas subsuperficiais, principalmente entre 0 - 20 e 0 - 40 cm (Figura 73). O adubo para culturas anuais como a soja e o trigo é depositado nos cinco primeiros centímetros de profundidades do solo, próximos das sementes.

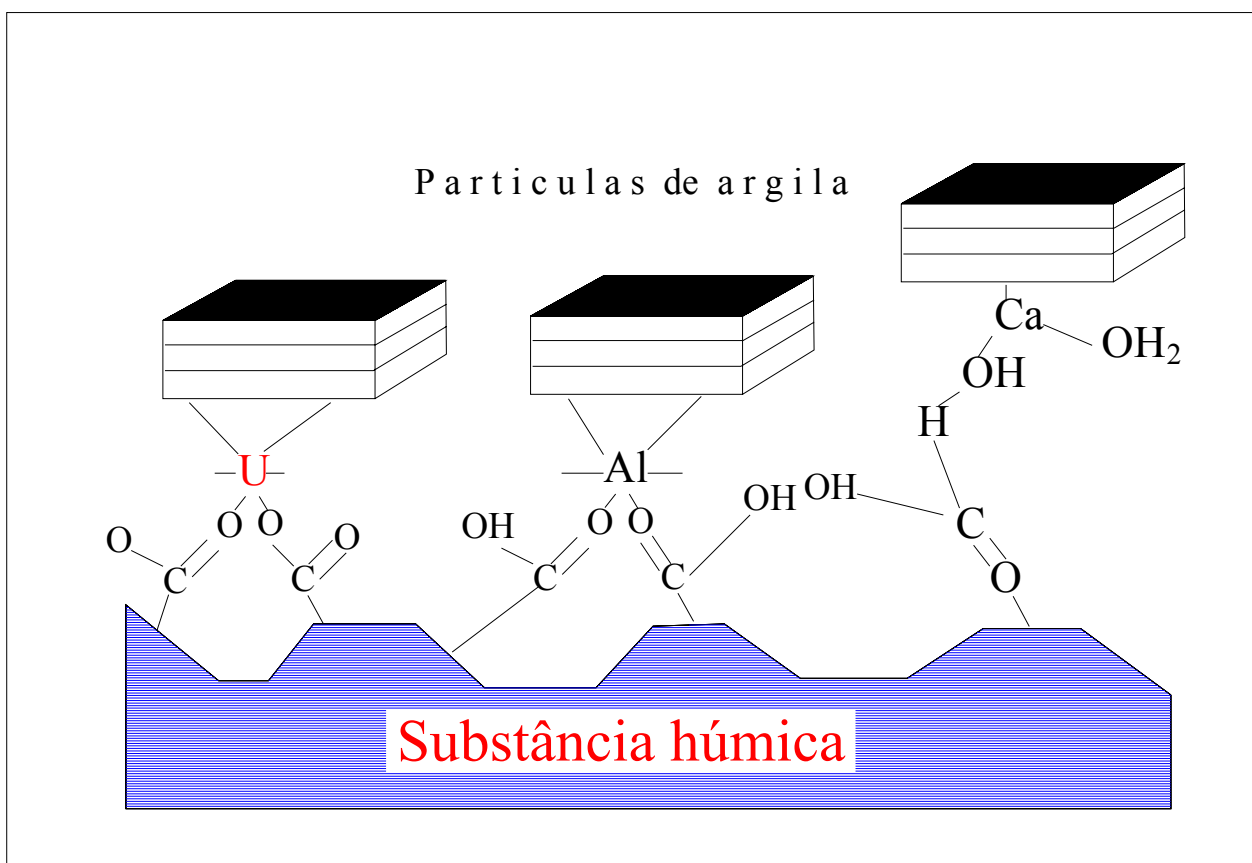


Figura 73. Interação entre partículas de argila e matéria orgânica na capacidade de troca catiônica  
Fonte: Adaptada de Santos & Camargo (1999)

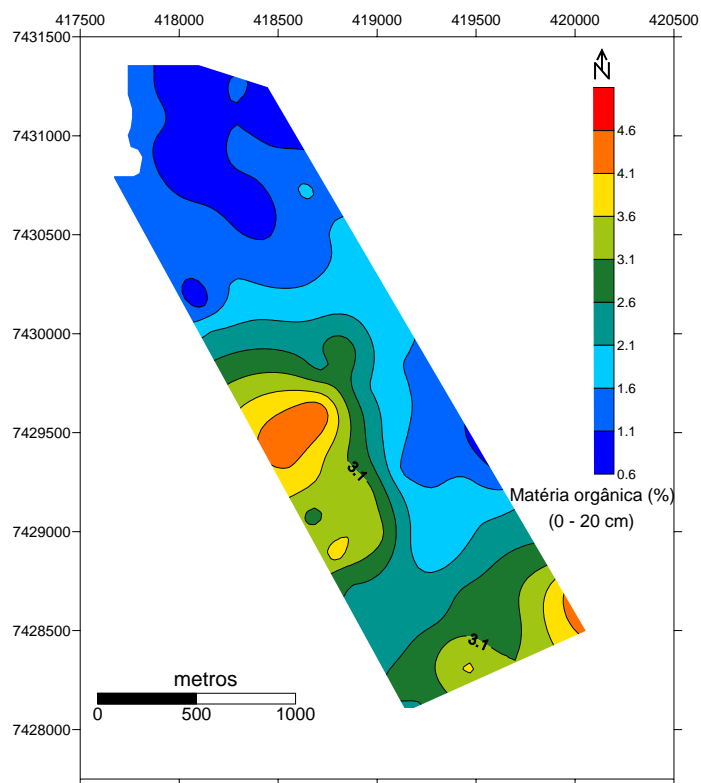


Figura 74. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 0 – 20 cm

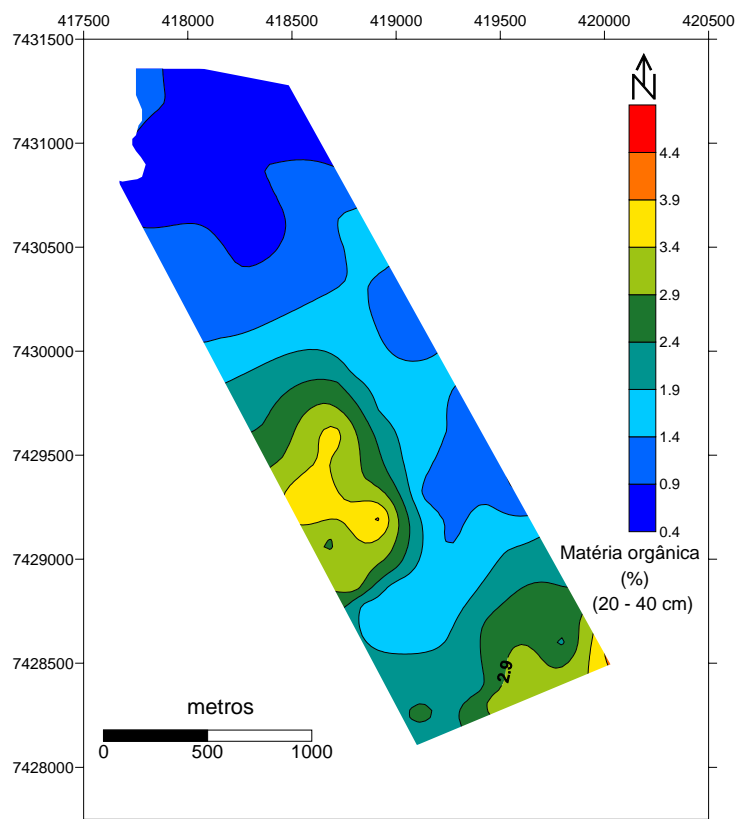


Figura 75. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 20 – 40 cm

Cotejando-se os dados do fósforo, observa-se na Tabela 27 que as correlações do mesmo com o U e o Th foram de 0,62 e 0,79 respectivamente (Figuras 76 e 77).

Diferentemente do que acontece com outros ânions, o fósforo tem tendência a formar diversos compostos de solubilidade muito baixa com o ferro, o alumínio e o cálcio (Raij, 1983).

O fósforo é considerado um elemento de baixa mobilidade nos solos. Entretanto para o pH na faixa de 6 como no presente caso, além de ser benéfico para as plantas, tem efeito neutralizador de elementos tóxicos como alumínio e manganês, aumentando a solubilidade do fósforo, provocando a diminuição na capacidade de retenção deste elemento principalmente em solos argilosos e com altos teores de óxidos – hidróxidos de Fe e Al (Figueiredo 1985). Também reage com o cálcio, formando compostos pouco solúveis (Sharpley et al., 1989; Sanyal & DeDatta, 1991).

Após os adubos fosfatados serem aplicados no solo, o fósforo migra do adubo para o solo, onde iniciam as reações de adsorção e precipitação, entre o fosfato e os constituintes do solo (Sample et al., 1980). Em solos com pH baixo, o fósforo se liga principalmente com o ferro e alumínio, na forma de precipitados amorfos (Lindsay et al., 1962). Diante do exposto, verifica-se que o pH da solução do solo atua como catalisador na dinâmica do fósforo, atuando na dissolução dos grânulos dos adubos fosfatados e, como consequência, ditando a mobilidade do urânio na solução do solo.

No processo de dissolução dos grânulos dos adubos acidulados, a dinâmica do íon urânio é regida por vários mecanismos, podendo formar complexos solúveis com os carbonatos, oxalatos e hidróxidos (Grenthe et al., 1992). Na ausência de altos níveis de complexos de ligação, o U dissolvido se liga aos minerais de óxidos e hidróxidos de ferro como a hematita, a goetita, além de alumínio e matéria orgânica em diversas faixas de pH (Waite et al., 1994; Moyes et al., 2000).

Existe uma relação clara entre abundância dos elementos e seus coeficientes de migração. Assim como o conceito de abundância, o de migração, ou mobilidade de elementos, pode ser discutido em termos absolutos e relativos. Nos estudos de campo, como no presente caso, deve-se levar em consideração a mobilidade dos radionuclídeos sob esses dois aspectos, uma vez que existem diferentes taxas de migração quando um mesmo elemento ocorre em diferentes espécies químicas. Fatores como a dinâmica da água (precipitação), o relevo, os tipos de solos e os regimes hídricos, juntamente com as características físico-químicas do solo, ditam a dinâmica dos elementos geoquímicos no perfil do solo.

As Figuras 78 (a e b) mostram o comportamento estatístico do fósforo e as Figuras 79 e 80 a sua distribuição espacial para as duas profundidades investigadas, respectivamente.

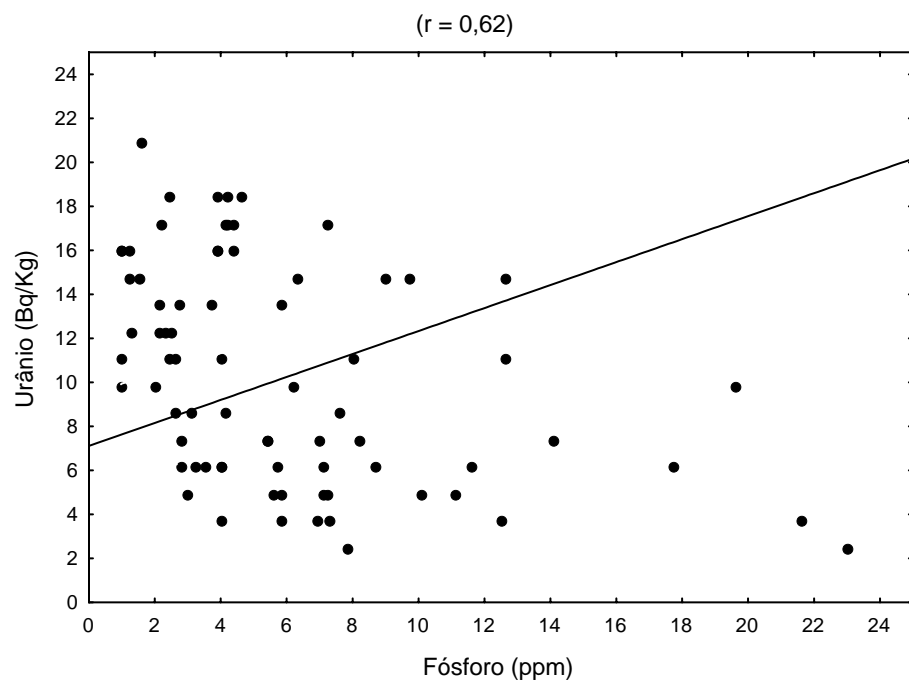


Figura 76. Correlação entre urânio e fósforo

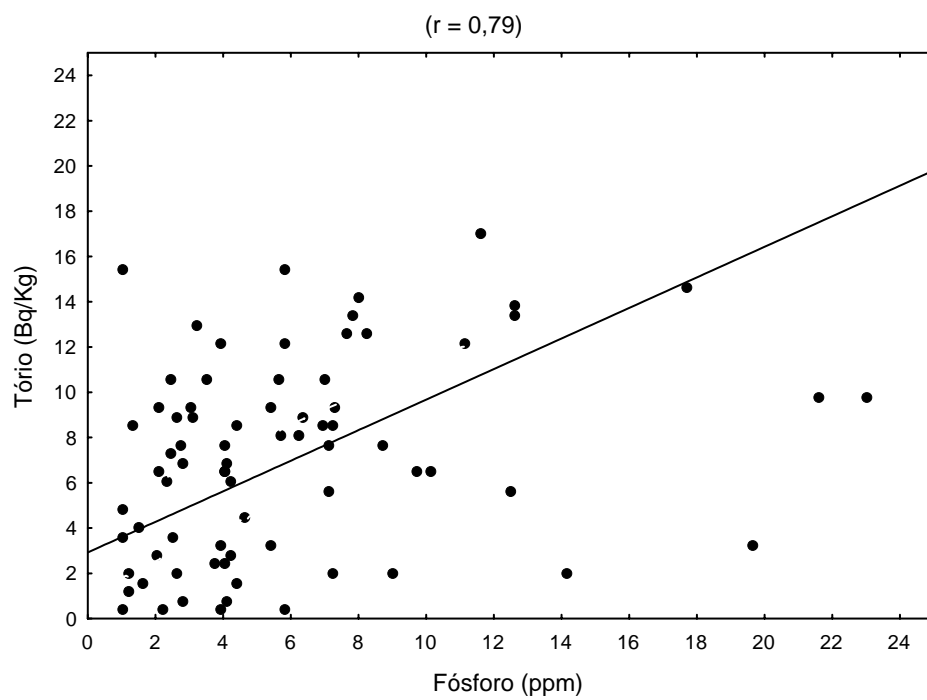


Figura 77. Correlação entre tório e fósforo

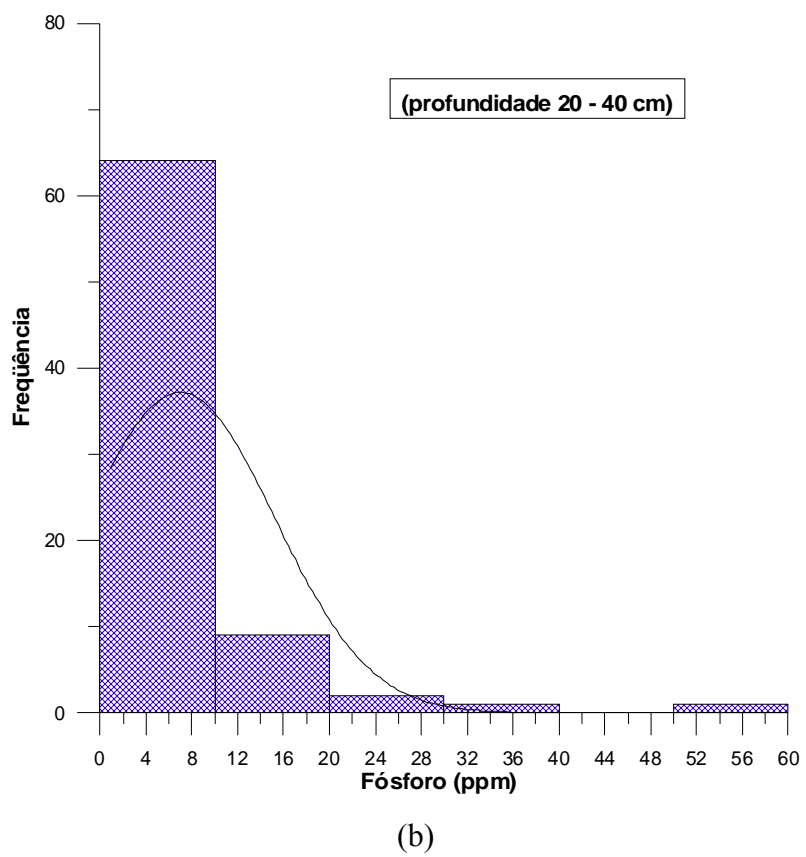
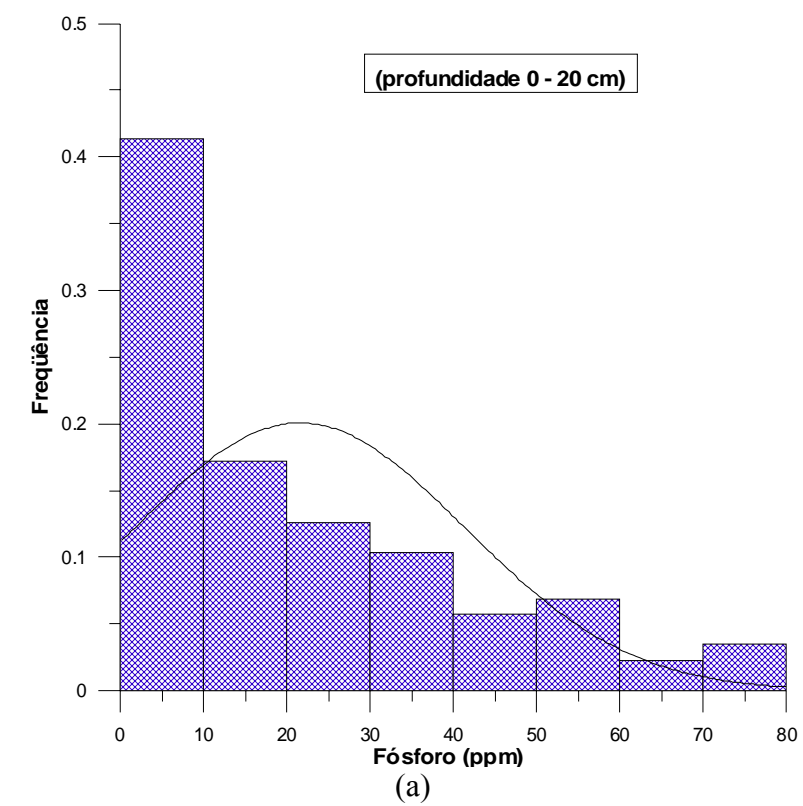


Figura 78. Histogramas e curvas de distribuições do fósforo para as duas profundidades



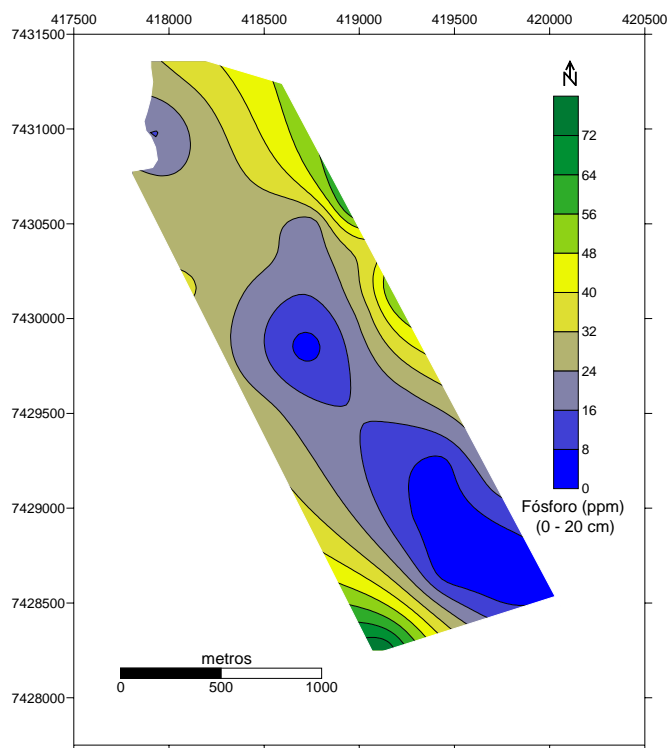


Figura 79. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 0 – 20 cm

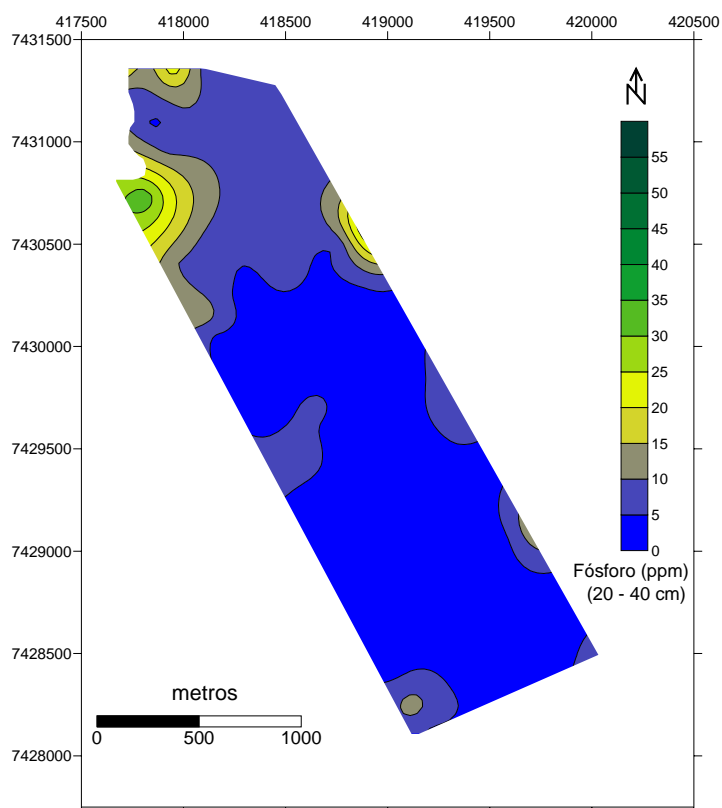
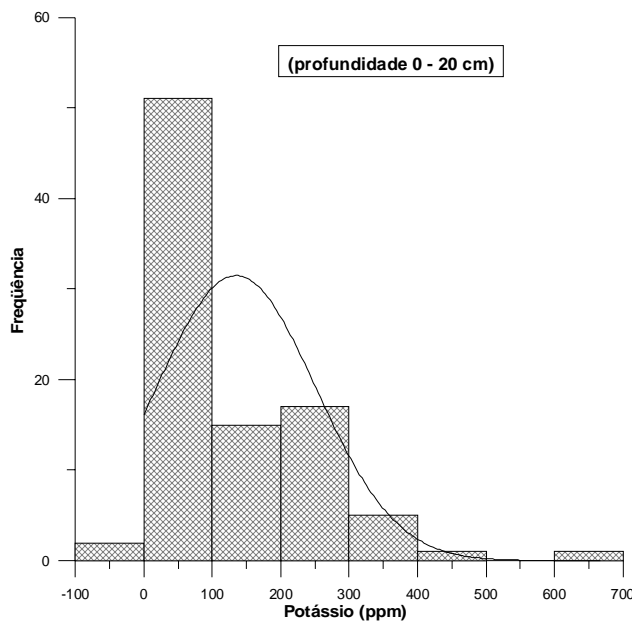
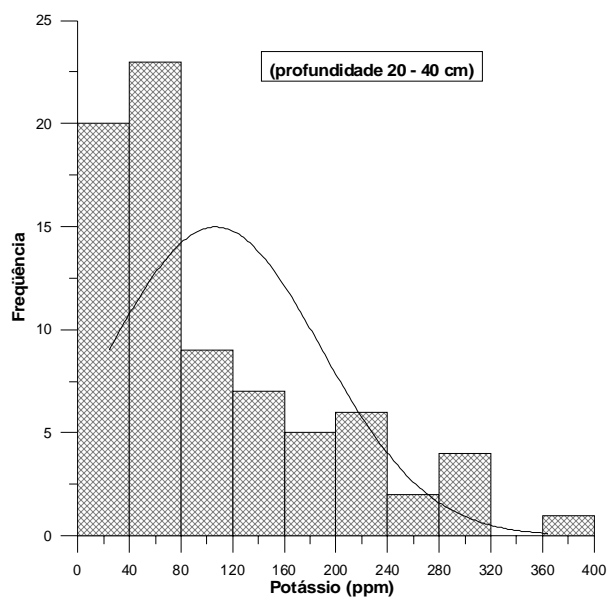


Figura 80. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 20 – 40 cm

Na matriz de correlação o potássio se correlaciona negativamente (-0,65 Tabela 28) com a resistividade elétrica. As Figuras 81 (a e b) evidenciam o comportamento estatístico do potássio. As maiores concentrações do potássio encontram-se nos solos mais argilosos (Figuras 82 e 83), cuja explicação é dada pela maior facilidade com este íon se fixa nas estruturas dos argilominerais, bem como pelo maior teor de matéria orgânica destes em relação ao solo areno-argiloso.



(a)



(b)

Figura 81. Histogramas e curvas de distribuições do potássio para as duas profundidades

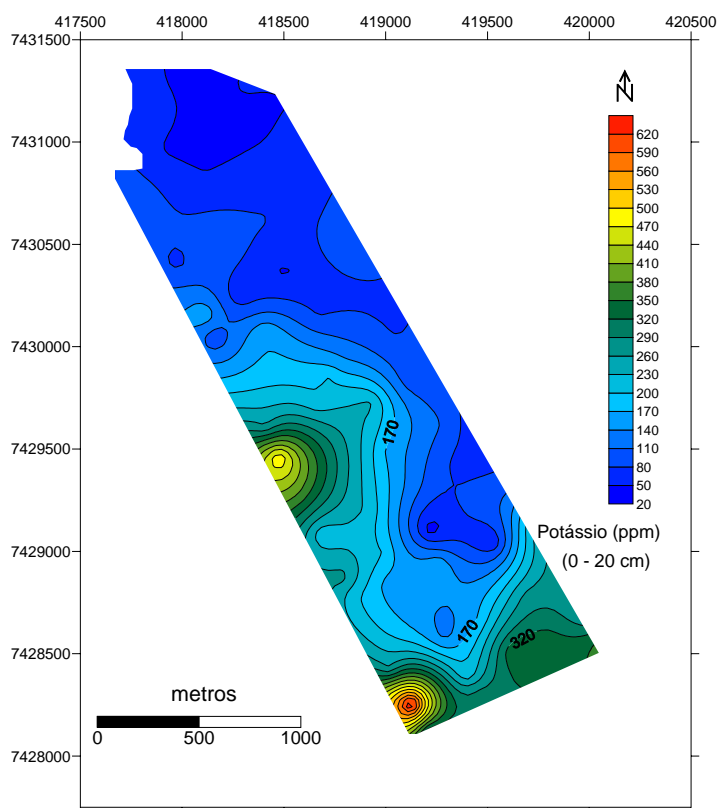


Figura 82. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 0 – 20 cm

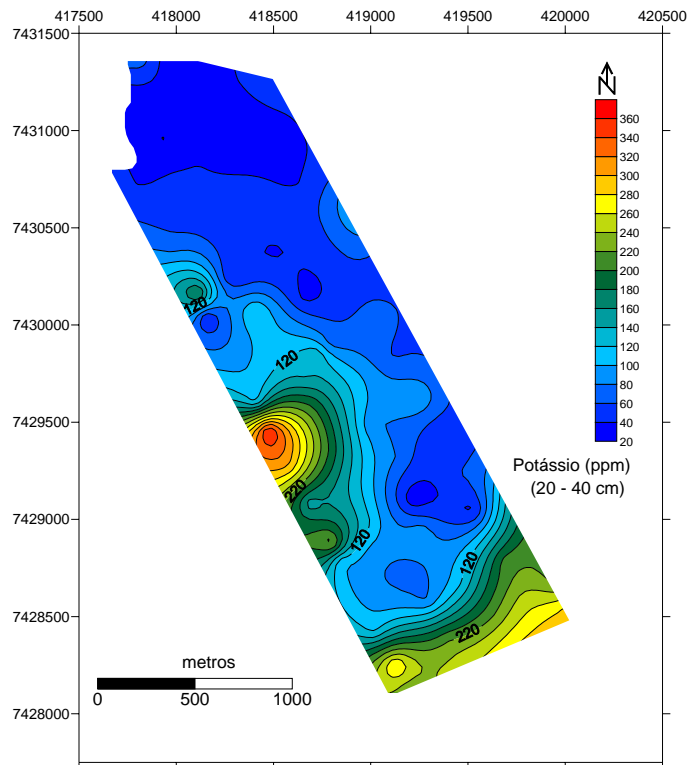


Figura 83. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 20 – 40 cm

Objetivando complementar as discussões dos resultados sobre as associações entre o grupo de 16 variáveis, efetuou-se a análise de agrupamentos. Agrupar é uma técnica no sentido de que nenhuma suposição é feita quanto ao número de grupos ou estrutura do agrupamento. O agrupamento é feito por similaridade ou distância.

Segundo Johnson & Wichern (1990), o agrupamento utiliza métodos de ligação, como a distância média entre elas, onde a distância entre dois grupos reflete a separação média entre pares de observações, sendo um em cada grupo. Este método tende a formar grupos com a mesma variância.

De acordo com Romesburg (1984), a interpretação dos dendrogramas (corte), está na dependência de uma série de fatores. Como regra, é desejável que os grupos sejam poucos e que atendam as necessidades do trabalho. No entanto, é necessário que se conheça o comportamento das variáveis e como elas possam estar relacionadas.

Conforme a Figura 84, houve a formação de dois grupos principais para a profundidade de 0-20 cm: o primeiro que reúne as variáveis geoquímicas e o segundo as variáveis gamaespectrométricas, cuja árvore envolve também a argila, evidenciando a correlação da mesma com as variáveis gamaespectrométricas, e com a maior distância Euclidiana. Fechando todos os grupos, encontra-se a resistividade aparente.

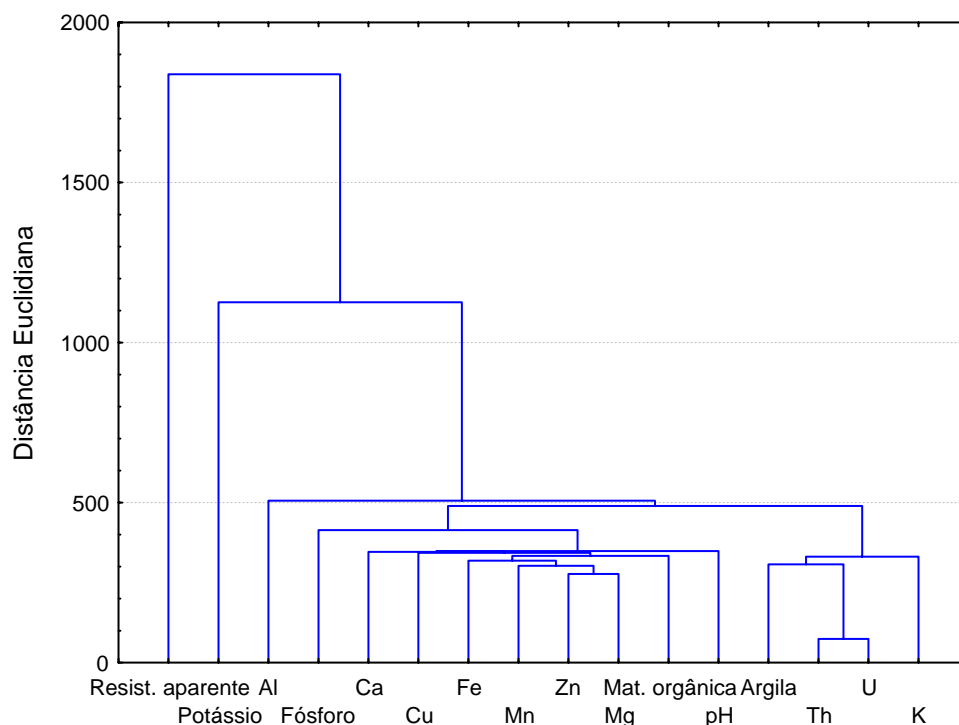


Figura 84. Dendrograma das 16 variáveis da matriz de dados para a de profundidade de 0-20 cm

De acordo com a Figura 85, para a profundidade de 20-40 cm, o grupo mais representativo é formado pelo U e pelo Th juntamente com a argila e a matéria orgânica (El-Arabi & Khalifa, 2002) e outras variáveis. Tais comportamentos são corroborados pelas correlações discutidas anteriormente, evidenciado forte associação entre estas variáveis.

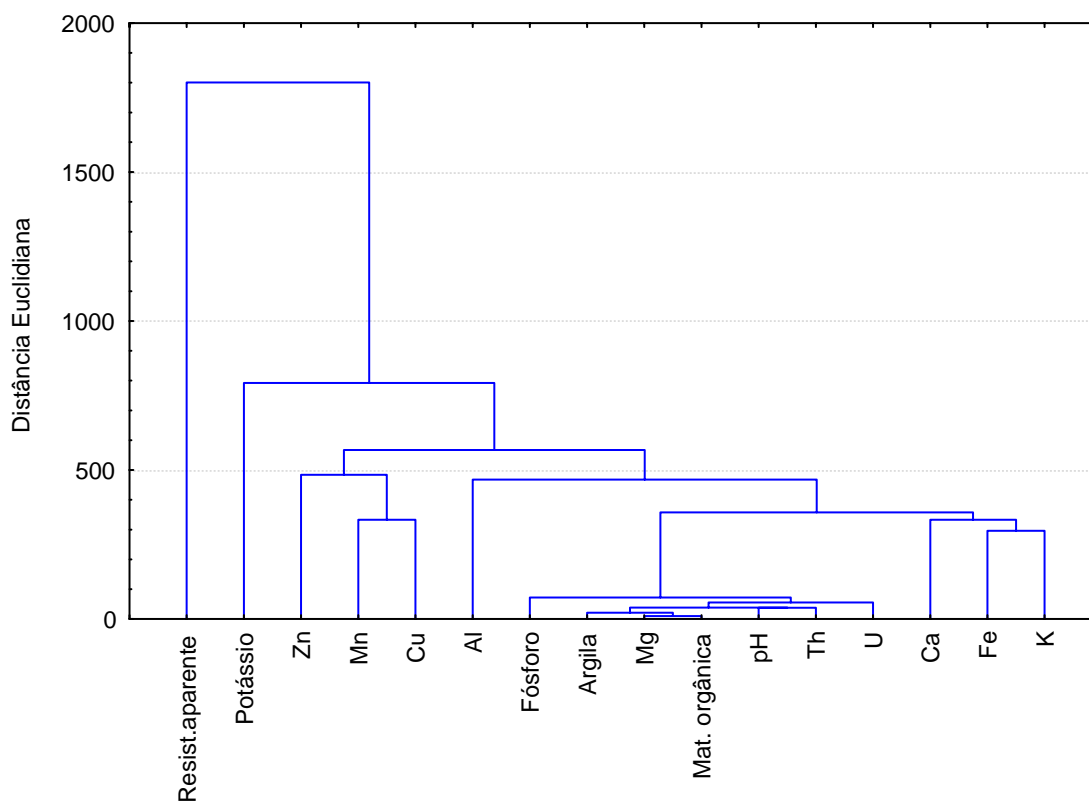


Figura 85. Dendrograma das 16 variáveis da matriz de dados para a de profundidade de 20-40 cm

## 5.2 Área 2

A metodologia aqui utilizada é semelhante a Área1 exceto pelo fato de que nesta não foram efetuadas medidas de resistividade elétrica, decorrente da uniformidade dos solos quanto ao teor de argila, bem como pela existência de um mapa de solos concebido na nova classificação que entrou em vigor a partir de 1999 (Prado, 2001).

A Tabela 30 mostra o número de aquisições de dados geofísicos e análises geoquímicas e mineralógicas, cujas variáveis estão expressas e quantificadas em suas respectivas tabelas, que serão apresentadas ao longo deste item. As discussões se darão por partes, ou seja, primeiramente serão discutidos os dados geofísicos, e, posteriormente, far-se-á a integração dos dados geoquímicos, mineralógicos e geofísicos, objetivando estabelecer as possíveis relações entre as variáveis.

Tabela 30. Número de aquisições de dados geofísicos, análises geoquímicas e mineralógicas.

<b>Atributos</b>	<b>Gamaespectrometria</b>	<b>Geoquímica</b>
Solos agrícolas	79	1.936
Solo (testemunha)	20	-
Adubo fórmula (N-P-K) (5-25-25)	20	-
Adubo fórmula (N-P-K) (18-07-28)	20	-
Adubo fórmula (N-P-K) (5-18-20)	20	-
Gesso agrícola (CaSO <sub>4</sub> )	20	-
Análises mineralógicas	-	04
<b>Total</b>	<b>179</b>	<b>1940</b>

Foram elaboradas duas matrizes de dados relativas à área onde há atividade antrópica, com as seguintes variáveis: Matriz1 - profundidade (0 - 20 cm): K, U, Th, pH, argila, matéria orgânica, pH, fósforo, potássio, matéria orgânica, alumínio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, ferro e manganês; e Matriz 2 (profundidade 20-40 cm) com as mesmas variáveis geofísicas e geoquímicas. As discussões se darão com os dados de ambas as matrizes, acrescidos dos obtidos na área testemunha, dos valores dos radionuclídeos das diferentes formulações de adubos e no gesso agrícola.

A área é constituída por três tipos de solos (Figura 87): Neossolo Quartzarênico Distrófico, textura muito arenosa (antiga Areia quartzosa); Latossolo Vermelho-Amarelo Epiálico, textura muito arenosa (antigo Latossolo Vermelho-Amarelo) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, textura muito arenosa (antigo Latossolo Vermelho-Amarelo), oriundos da Formação Goio-Erê (Fernandes, 2000).

A ocupação atual destes solos é pela cultura da cana-de-acúcar, porém anteriormente era utilizada com pastagens. Os solos são profundos, excessivamente drenados, com aspectos de erosão laminar de forma geral, porém em determinadas partes com declividade de 3 a 8%, observa-se o início da formação de sulcos. Embora haja terraços (Figura 86) objetivando minimizar a velocidade de escoamento das águas superficiais, é notória a fragilidade e susceptibilidade de tais solos à erosão.



Figura 86. Ocupação e formas de relevo (detalhe a esquerda – terraço para minimizar a velocidade de escoamento das águas pluviais)

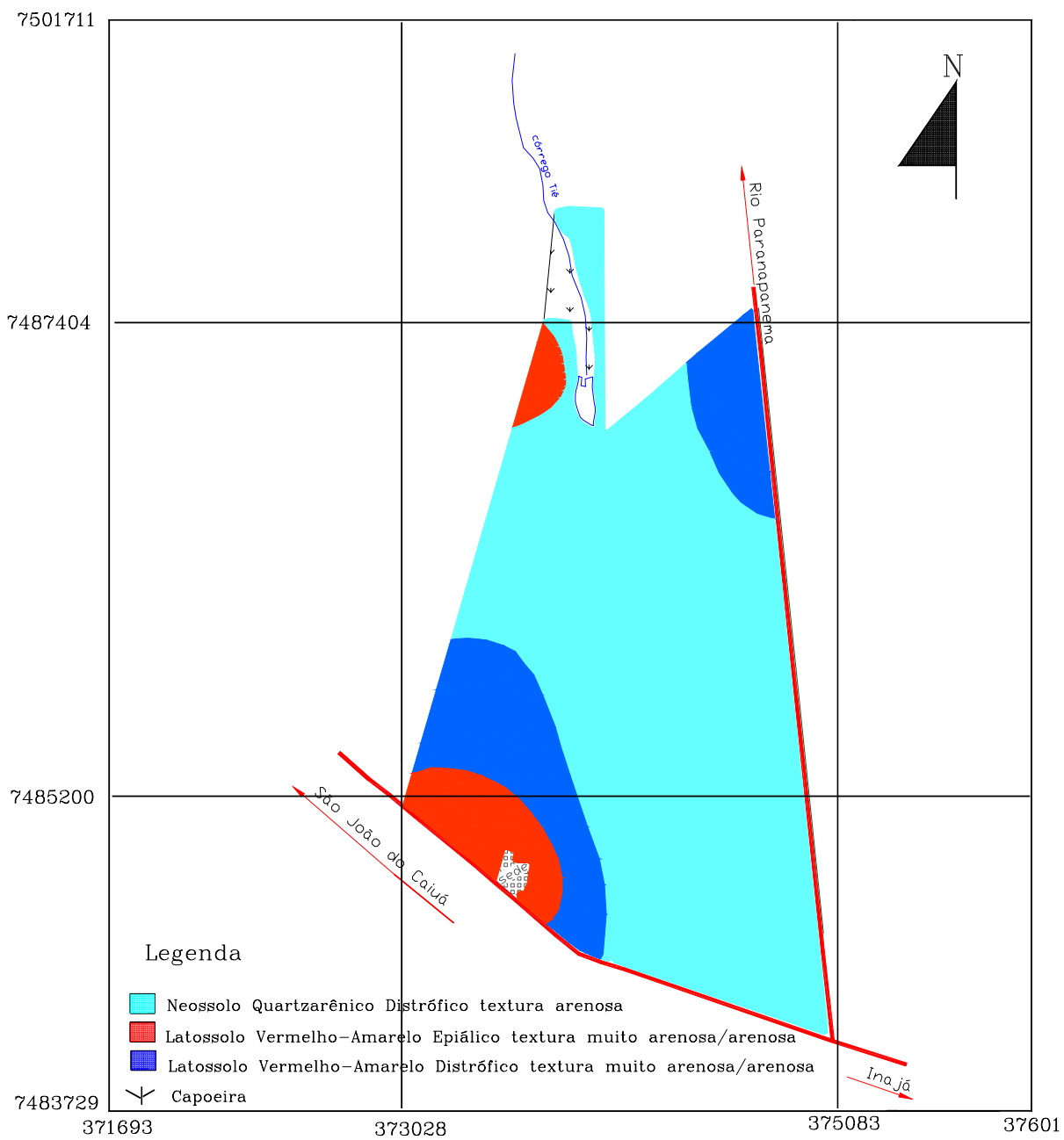


Figura 87. Mapa de solos da Área 2

Fonte: Fazenda SantaTerezinha (2002) inédito



## 5.2.1 Dados Geofísicos

### 5.2.1.1 Correlações entre radiação gama dos solos, adubos e gesso

Os teores dos radionuclídeos obtidos por espectrometria de raios gama da área com atividade antrópica, podem ser vistos na Tabela 31. Os valores médios para os 79 pontos foram de: 71,02 Bq/Kh de K; 5,96 Bq/Kg de eU e 11,37 Bq/Kg de eTh. Medições dos teores de elementos radiogênicos em amostras de solos de diversos países como aqueles efetuados por McAulay & Moran (1983), Lin et al., (1987), Yu et al., (1992), Shenber (1997) e Selvasekarapandian et al., (2000), podem ser vistos na Tabela 29. Os teores de K e eU desta área ficaram abaixo dos obtidos pelos trabalhos citados.

Tabela 31. Dados gamaespectrométricos e resumo estatístico

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Potássio Urânio Tório			Suscetibilidade magnética (x10 <sup>-3</sup> SI)	
			-----Bq/Kg-----			0 - 20	20 - 40
						-----cm-----	
375049	7484132	1	62	6,5	3,66	0,89	0,86
375020	7484404	2	62	4,92	6,2	0,54	0,52
374973	7484721	3	62	3,69	13,02	0,43	0,46
374939	7485116	4	31	4,92	10,58	0,64	0,61
374904	7485401	5	62	6,5	10,99	0,49	0,50
374878	7485742	6	93	0	10,06	0,35	0,37
374844	7486035	7	62	7,38	10,58	0,43	0,44
374816	7486400	8	93	2,48	13,84	0,36	0,38
374760	7486759	9	93	6,5	11,8	0,52	0,51
374728	7487045	10	93	4,92	6,5	0,6	0,58
374709	7487335	11	62	0	13,84	0,48	0,46
374701	7487424	12	62	4,92	12,62	0,38	0,41
374815	7484218	13	31	9,84	8,14	0,61	0,63
374483	7484330	14	93	6,5	10,58	0,42	0,40
374182	7484411	15	62	7,38	13,84	0,55	0,57
373910	7484529	16	62	9,84	9,36	0,63	0,61
373645	7484711	17	93	9,84	8,95	0,35	0,40
373355	7484967	18	93	8,61	13,84	0,37	0,38
373110	7485163	19	62	3,69	9,77	0,6	0,59
373184	7485420	20	93	4,92	4,48	0,51	0,53
373277	7485675	21	93	1,23	15,47	0,52	0,50
373354	7485958	22	93	11,07	11,8	0,42	0,43
373437	7486253	23	62	12,3	14,65	0,5	0,52
373528	7486561	24	93	2,48	12,21	0,37	0,39

(continua)

Tabela 31. Continuação

X(E-W) (UTM)	Y(S-N) (UTM)	Pontos	Potássio	Urânio	Tório	Suscetibilidade magnética (x10 <sup>-3</sup> SI)	
						0 – 20	20 – 40
						-----cm-----	
373611	7486915	25	62	0	14,25	0,75	0,74
373698	7487212	26	93	12,3	13,84	0,61	0,63
373795	7487418	27	62	11,07	10,18	0,81	0,83
373855	7487406	28	62	12,3	12,21	0,43	0,40
373901	7487118	29	62	3,69	11,4	0,32	0,33
373999	7486891	30	93	3,69	17,1	0,40	0,39
373922	7486564	31	62	8,61	7,73	0,56	0,54
373879	7486323	32	62	7,38	10,58	0,48	0,46
373783	7485921	33	62	11,07	11,8	0,49	0,50
373723	7485647	34	93	3,69	13,43	0,56	0,53
373623	7485286	35	62	3,69	10,18	0,37	0,39
373546	7484959	36	93	6,15	10,99	0,31	0,33
374675	7484535	37	62	7,38	13,84	0,28	0,27
374577	7484957	38	93	2,48	4,88	0,38	0,39
374501	7485260	39	62	0	13,84	0,71	0,70
374383	7485582	40	62	6,15	10,99	0,55	0,57
374297	7485914	41	62	12,3	0	0,79	0,81
374229	7486205	42	31	8,61	1,22	0,64	0,61
374149	7486578	43	62	6,15	13,84	0,32	0,31
374164	7486812	44	62	8,61	5,29	0,6	0,62
374280	7487088	45	62	6,15	17,09	0,62	0,59
374510	7487271	46	93	6,15	10,98	0,63	0,61
374996	7484646	47	93	2,48	4,07	0,45	0,46
374680	7484585	48	62	4,92	17,1	0,4	0,42
374357	7484676	49	62	3,69	6,51	0,61	0,60
374148	7484856	50	62	8,61	13,02	0,59	0,61
373934	7484946	51	93	6,15	15,06	0,45	0,47
373992	7485189	52	93	1,23	12,62	0,46	0,48
374155	7485386	53	62	3,69	14,65	0,44	0,45
374252	7485700	54	62	4,92	12,62	0,58	0,61
373852	7486767	55	62	6,15	14,25	0,82	0,79
373610	7486801	56	93	6,15	15,06	0,7	0,72
373710	7486540	57	62	6,15	9,77	0,56	0,55
374059	7486213	58	62	7,38	10,18	0,65	0,66
374057	7485932	59	62	6,15	12,62	0,58	0,54
373699	7486309	60	62	2,48	14,65	0,8	0,82
374088	7485594	61	62	7,38	13,84	0,47	0,51
373629	7485951	62	62	3,69	15,47	0,53	0,52

continua

Tabela 31. Conclusão

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Potássio	Urânio	Tório	Susceptibilidade magnética (x10 <sup>-3</sup> SI)		
						0 – 20	20 – 40	
						-----cm-----		
373535	7485597	63	62	9,84	9,77	0,38	0,39	
373376	7485387	64	124	3,69	13,02	0,47	0,47	
374332	7485175	65	124	2,48	11,8	0,65	0,66	
374819	7485078	66	93	4,92	13,02	0,46	0,48	
374774	7485428	67	93	1,23	4,07	0,55	0,56	
374665	7485808	68	62	6,15	14,65	0,57	0,55	
374785	7486000	69	62	11,07	13,84	0,45	0,47	
374663	7486512	70	62	6,15	14,25	0,41	0,43	
374596	7486221	71	62	12,3	11,4	0,38	0,39	
374590	7485947	72	62	2,48	13,84	0,55	0,57	
374450	7486181	73	31	2,48	15,87	0,37	0,38	
374436	7486382	74	31	12,3	12,62	0,44	0,45	
374397	7486713	75	62	3,69	14,24	0,44	0,42	
374426	7487048	76	93	4,92	10,99	0,69	0,68	
374659	7486855	77	62	11,07	10,99	0,4	0,42	
374339	7486737	78	62	7,38	10,58	0,47	0,48	
374183	7486824	79	62	0	9,77	0,65	0,67	
			Mínimo	31	0	0	0,28	0,27
			Máximo	124	12,3	17,1	0,89	0,86
			<b>Média</b>	<b>71,02</b>	<b>5,96</b>	<b>11,37</b>	0,51	0,52
			Desvio padrão	19,32	3,38	3,58	0,13	0,13
			Coefficiente de variação (%)	27,2	56,7	31,49	25,5	25
			Assimetria	0,35	0,22	-1,07	0,59	0,62
			Curtose	0,30	-0,62	1,08	-0,04	0,08

Tabela 32. Concentração de radionuclídeos em amostras de solos de alguns países.

Países	<sup>40</sup> K	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	Referências
	----- Bq/Kg -----			
Paraná-Brasil	71,02	5,96	11,37	Este trabalho
Índia	195,2	37,7	75,3	Selvasekarapandian et al., (2000)
Taiwan	431,0	30,0	44,0	Lin et al., (1987)
Hong Kong	352,0	119,0	146,0	Yu et al., (1992)
Líbia	270,0	10,5	9,5	Shenber (1997)
Irlanda	350,0	37,0	26,0	McAulay & Moran (1983)

Em função de não haver fragmentos com mata nativa na área da pesquisa, optou-se por usar dados de uma área preservada localizada a aproximadamente dois quilômetros, com teores de argila semelhantes à área do presente trabalho, caracterizando solos de textura arenosa (Tabela 33).

As concentrações dos radionuclídeos da área testemunha foram de 63,55; 4,22 e 8,67 Bq/Kg de K, eU e eTh, portanto menores do que os obtidos na área pesquisada, ou seja: 71,02, 5,96 e 11,37 Bq/Kg de K, eU e eTh, respectivamente. Estatisticamente há diferença entre os teores dos radionuclídeos da área testemunha e da área agrícola, porém não há entre os teores de argila.

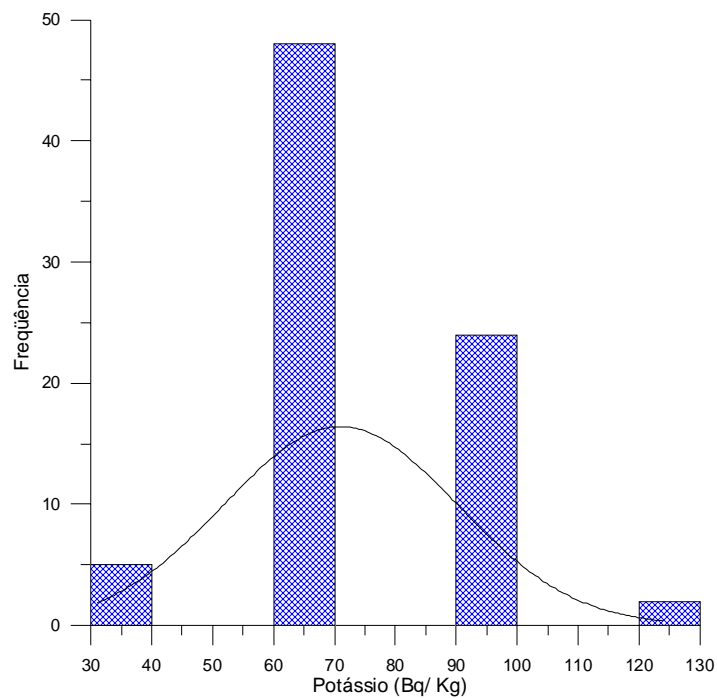
Tabela 33. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos medidos *in loco* nos solos sob floresta nativa (testemunha).

Amostras	K	eU	eTh	Teor de argila (%)	
				profundidades (cm)	
		Bq/Kg		0 - 20	20 - 40
1	31	4,92	10,58	13	19
2	93	2,48	8,79	14	14
3	62	4,92	12,62	15	16
4	62	7,38	7,92	16	14
5	62	3,69	4,07	15	17
6	62	0	6,51	14	14
7	62	3,28	10,18	17	18
8	62	1,23	9,36	13	17
9	62	7,38	10,58	14	14
10	62	9,84	9,36	14	15
11	62	3,69	6,51	13	14
12	93	4,75	11,8	12	15
13	31	9,84	8,14	18	17
14	62	3,69	9,77	14	16
15	62	2,48	9,36	17	19
16	62	0	8,14	15	15
17	62	6,15	9,77	14	17
18	93	4,92	6,51	19	18
19	31	2,48	9,36	13	17
20	93	1,23	4,07	16	16
Mínimo	31	0	4,07	12	14
Máximo	93	9,84	12,62	19	19
<b>Média(*)</b>	<b>63,55a</b>	<b>4,22c</b>	<b>8,67e</b>	<b>14,8g</b>	<b>16,1h</b>
<b>Média (**)</b>	<b>71,02b</b>	<b>5,96d</b>	<b>11,37f</b>	<b>16,07g</b>	<b>16,82h</b>
Desvio padrão	18,75	2,84	2,25	1,85	1,68
Coefficiente de variação (%)	29,5	67,3	25,9	12,16	10,43
Assimetria	-0,012	0,53	-0,56	0,76	0,19
Curtose	0,19	-0,15	0,18	-0,02	-1,08

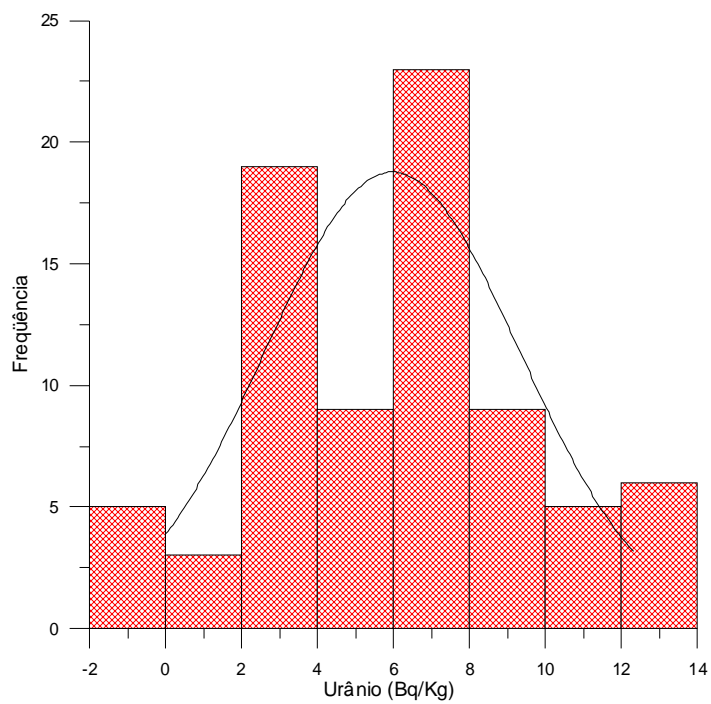
(\*) média da testemunha ; (\*\*) média da área pesquisada

Médias com letras iguais na coluna não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste T.

Os histogramas com as curvas de distribuição dos radionuclídeos podem ser vistos nas Figuras 88 (a, b e c). O K e o eU tendem à distribuição muito próxima da normal, enquanto que o tório tende à uma assimetria negativa, ou seja, a média é menor do que a mediana e a moda.



(a)



(b)

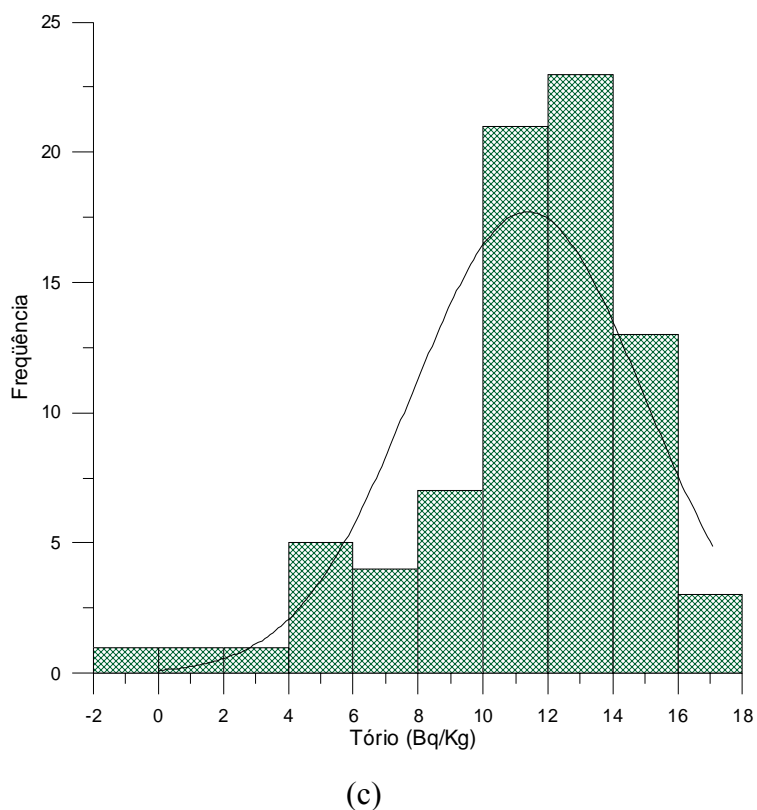


Figura 88. Histogramas e curvas de distribuições dos radionuclídeos

A distribuição espacial dos radioelementos encontra-se nas Figuras 89 a 91. Observando-se os mapas do potássio e do urânio, ressalta-se um trato central, configurando, no caso do K, uma depleção nos seus teores. Já, para o urânio, ao contrário ocorre um incremento nos teores. Ressalta-se que, embora não se disponha do modelo digital do terreno, é possível visualizar, pela análise do mapa de solos (Figura 87), a existência de uma drenagem ao norte da respectiva figura, evidenciando que o coletor principal de água da área localiza-se próximo ao centro, recebendo sedimentos dos bordos.

A área é dividida em talhões, cujo manejo da cultura de cana-de-açúcar é dado de forma diferenciada, ou seja, há momentos que em partes da área esteja ocorrendo a colheita, em outras está se fazendo adubação de manutenção e em outras efetuando o plantio. Isto leva à diferentes formas de se adubar a cultura, tanto na quantidade como na formulação dos adubos utilizados, cujas concentrações de N-P-K, podem ser vistos na Tabela 34.

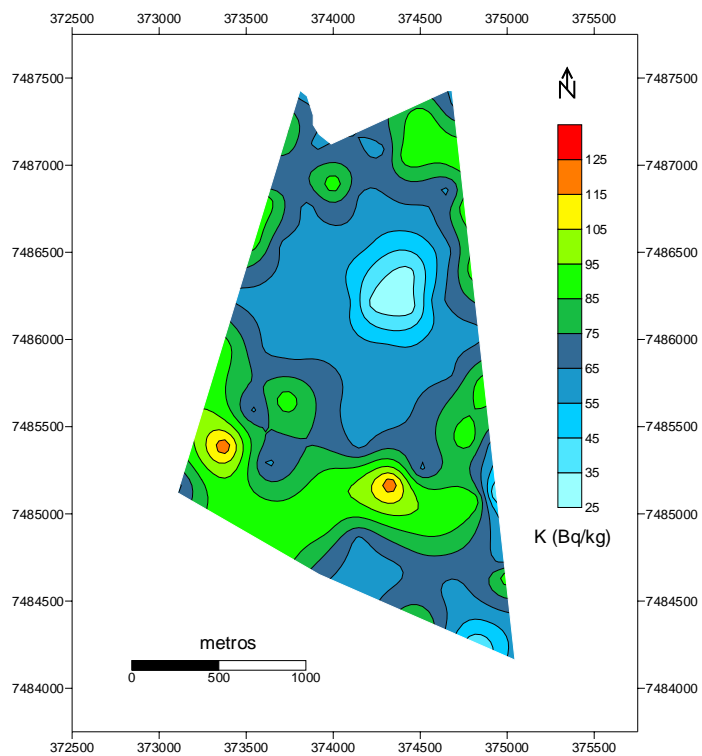


Figura 89. Distribuição espacial do potássio

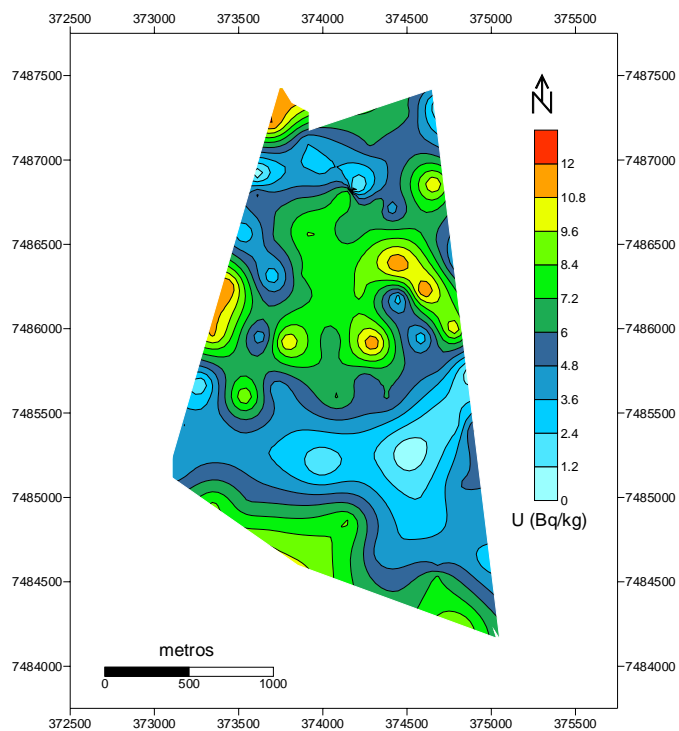


Figura 90. Distribuição espacial do urânio

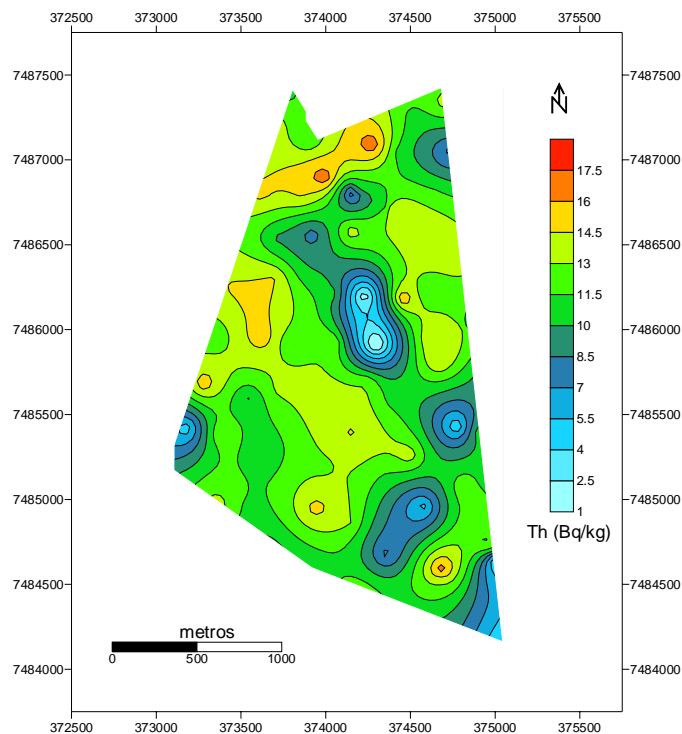


Figura 91. Distribuição espacial do tório

Os coeficientes de variação para o K, o eU e o eTh foram respectivamente de 27,2; 56,7 e 31,49 % (Tabela 31), indicando uma maior variabilidade e dispersão do urânio (Kannan et al., 2002; Tzortis et al., 2004). As concentrações dos radionuclídeos obtidos na amostragem das diferentes fórmulas de adubos e gesso, totalizando 20 amostras para cada formulação e nas pilhas de gesso (Tabela 34), evidenciam uma variabilidade nos teores dos radioelementos, cuja amplitude nos adubos vai de 217 a 9579; 19,68 a 926,19 e 49,25 a 1061,86 Bq/Kg de K, U e Th respectivamente. Os valores médios dos elementos radioativos oriundos dos adubos foram maiores do que aqueles obtidos por Alan et al., (1997), Ibrahim, (1998) e Khan et al., (1998).

Na Tabela 35 estão sumarizadas as estimativas das taxas de radiação dos radionuclídeos das variáveis mensuradas. As maiores radiações são emanadas pelos adubos, seguidas do gesso, da área agricultável e da área testemunha, respectivamente. Nota-se que as doses emanadas pelos adubos e pelo gesso dessa Área, são maiores do que os da Área 1 (Tabela 20). No entanto, os teores de urânio da Área 1 como um todo, ou considerando-se apenas os solos de textura argilosa, são maiores do que desta Área. A explicação mais possível para tal fato, decorre da diferença de textura entre as áreas, sendo a Área 1 mais argilosa e com maior teor de matéria orgânica, o que acarretaria maior



retenção dos radionuclídeos nos solos. Salienta-se que pelo fato da presente Área ser de textura arenosa, contribui sobre maneira para a lixiviação dos radionuclídeos nos perfis dos solos, além do baixo teor de matéria orgânica, que será abordado no item 5.2.2.2.

Tabela 34. Concentrações e estatísticas dos radionuclídeos em amostras de adubos e gesso.

Amostras	Adubos/formulações (N-P-K)									G e s s o		
	0 - 18 - 20			05 - 25 - 25			18 - 07 - 28			K	eU	eTh
	K	eU	eTh	K	eU	eTh	K	eU	eTh			
	Bq/Kg											
1	651	926,19	1061,86	7936	22,14	165,649	9579	20,91	64,71	62	738	238,10
2	1116	639,6	729,75	9207	60,27	156,695	8339	35,67	55,35	62	527,67	177,45
3	682	414,51	584,05	7068	49,2	154,66	8246	20,91	60,24	124	661,74	186,41
4	279	597,78	875,86	6603	38,13	163,614	9145	25,83	49,25	93	589,17	194,14
5	620	742,92	734,23	7502	45,51	150,183	8773	29,52	62,68	31	629,76	229,96
6	589	714,63	895,81	8153	54,12	152,218	8184	23,37	55,76	124	693,72	204,31
7	217	662,97	775,74	7781	50,43	167,684	9331	31,98	54,54	31	595,32	182,74
8	837	878,22	791,62	7037	33,21	145,299	8866	22,14	63,90	62	708,48	220,59
9	930	544,89	758,24	8494	49,2	164,021	8711	30,75	61,86	93	603,93	191,70
10	496	789,66	978,43	8866	23,37	161,172	9517	29,52	53,32	31	729,39	180,30
11	744	466,17	653,24	6727	51,66	159,951	8494	20,91	55,35	155	644,52	209,20
12	868	623,61	738,71	7409	47,97	167,684	8959	28,29	64,31	124	592,86	202,28
13	465	766,29	820,92	6448	44,28	155,067	8618	34,44	58,20	93	677,73	226,29

(Continua)

Tabela 34. Conclusão

Amostras	Adubos/formulações (N-P-K)											
	0 - 18 - 20			05 - 25 - 25			18 - 07 - 28			G e s s o		
	K	eU	eTh	K	eU	eTh	K	eU	eTh	K	eU	eTh
	Bq/Kg											
14	279	886,83	693,94	8029	59,04	151,404	9176	19,68	57,39	62	597,78	186,81
15	1085	612,54	735,86	8432	52,89	157,509	8897	35,67	53,72	93	632,22	195,77
16	682	715,86	831,09	5983	30,75	150,183	8091	27,06	61,46	93	574,41	193,73
17	899	753,99	810,34	7006	59,04	136,345	8494	23,37	53,72	62	617,46	203,91
18	589	742,92	842,90	6231	47,97	166,463	8153	29,52	59,83	124	606,39	214,08
19	961	840,09	898,66	6045	56,58	176,638	8649	20,91	58,20	31	600,24	201,47
20	992	581,79	951,97	8091	54,12	151,404	9331	25,83	63,09	62	584,25	192,92
Mínimo	217	414,51	584,05	5983	22,14	136,35	8091	19,68	49,25	31,00	527,67	177,45
Máximo	1116	926,19	1061,86	9207	60,27	176,64	9579	35,67	64,71	155,00	738,00	238,10
<b>Média</b>	<b>699,05</b>	<b>695,07</b>	<b>808,16</b>	<b>7452,40</b>	<b>46,49</b>	<b>157,69</b>	<b>8777,65</b>	<b>26,81</b>	<b>58,34</b>	<b>80,60</b>	<b>630,25</b>	<b>201,61</b>
Desvio padrão	265,05	137,58	114,51	948,87	11,36	9,29	461,48	5,23	4,39	36,82	55,48	17,01
Coefficiente de variação (%)	37,92	19,79	14,17	15,86	51,31	6,82	5,70	26,57	8,91	118,77	10,51	9,59
Curtose	-0,74	-0,38	0,22	-0,97	0,10	0,38	-1,03	-1,12	-0,87	-0,79	-0,30	-0,31
Assimetria	-0,26	-0,24	0,30	0,08	-0,98	-0,20	0,19	0,30	-0,20	0,26	0,51	0,66

Tabela 35. Taxas de radiação (doses) calculadas a partir do valor médio para cada um dos radionuclídeos.

Variáveis	K		U		Th		soma
	%	micro R/h	ppm	micro R/h	ppm	micro R/h	micro R/h
<b>Adubo (0-18-20)</b>	2,3	2,71	56,57	28,17	198,56	43,88	74,76
<b>Adubo (05-25-25)</b>	24,04	28,37	3,78	1,88	38,74	8,56	38,81
<b>Adubo (18-07-28)</b>	28,32	33,42	2,18	1,08	14,33	3,17	48,83
<b>Gesso</b>	0,3	0,35	51,24	25,52	49,53	10,94	36,81
<b>Solos</b>	0,2	0,23	0,5	0,25	2,80	0,62	1,1
<b>Solos (testemunha)</b>	0,2	0,23	0,3	0,15	2,13	0,47	0,85

### 5.2.1.2 Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética apresenta-se semelhante para as duas profundidades, com médias de 0,52 e  $0,51 \times 10^{-3}$  SI (Tabela 31), respectivamente. Como os solos possuem teores de argila de apenas 16,2 e 16,9% (Tabela 38) para as duas profundidades, era de se esperar que não houvesse diferença significativa quanto à resposta magnética para as respectivas profundidades. Observa-se nas Figuras 92 e 93, a existência de um trato na direção sul/norte, onde ocorrem as maiores concentrações de minerais magnéticos. A suscetibilidade magnética possui uma relação espacial significativa com as Figuras 102 e 103 do ferro. É fato que a textura do solo, a topografia, a falta de proteção dos solos contra o impacto das gotas de chuva, estejam facilitando e contribuindo para o processo erosivo. Com já foi abordado anteriormente, existe um coletor principal na área, próximo ao centro, onde possivelmente esteja contribuindo para o acúmulo de sedimentos naquela direção.

Os valores da suscetibilidade desta Área, são muito semelhantes aos obtidos na Área 1 no solo de textura areno/argilosa  $0,45$  e  $0,43 \times 10^{-3}$  SI (Tabela 21).

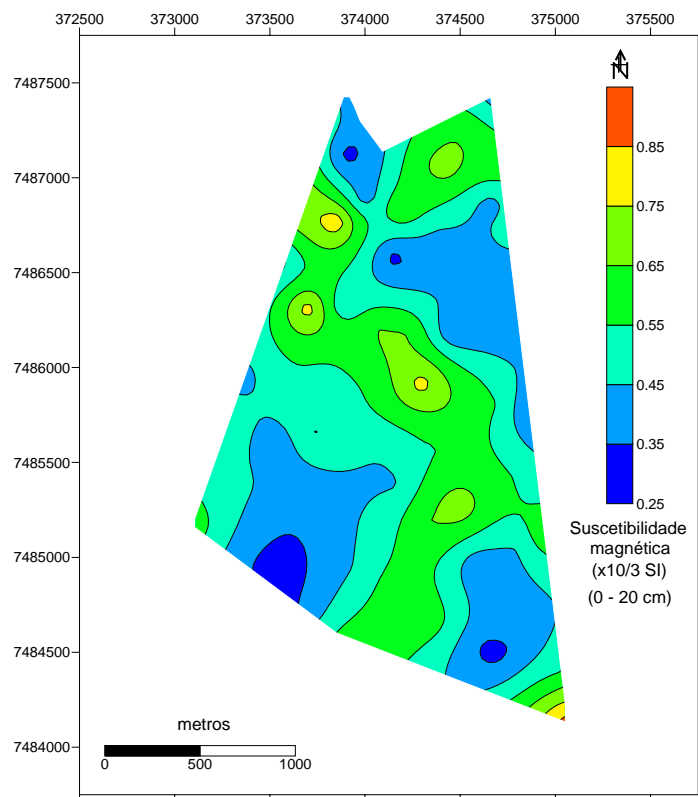


Figura 92. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade de 0 – 20 cm

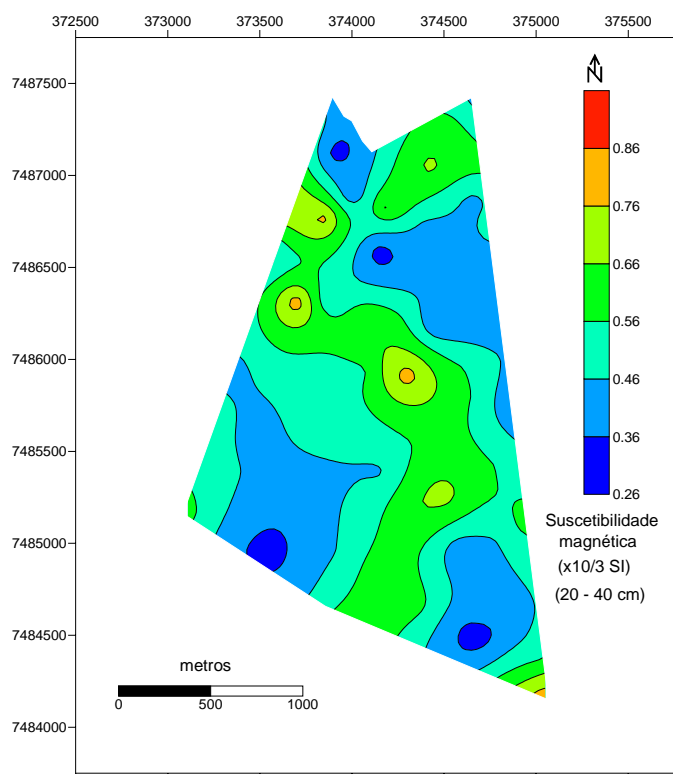


Figura 93. Suscetibilidade magnética dos solos para a profundidade de 20 – 40 cm

## 5.2.2 Dados geoquímicos

A segunda etapa dos resultados e discussões envolve as variáveis relacionadas aos dados das difratometrias de raios X e geoquímicos oriundos das análises de solos, referentes às duas profundidades analisadas (0 - 20 e 20 - 40 cm).

### 5.2.2.1 Mineralogia dos solos

As análises por difratometria de raios X (Figuras 94 a 101), mostram a presença de quartzo identificado pelo pico de 3,78 Å, e caulinita pelo pico de 7,37 Å, ambos de primeira ordem. A ausência de caulinita nas amostras aquecidas a 550°C, é devida à destruição de sua estrutura cristalina em função do aumento da temperatura, fato corroborado por Moraes, (1992), Almeida et al., (1997) e Melo et al., (2002). A caulinita em solos de textura arenosa em regiões tropicais pode ser atribuída ao intenso intemperismo e ao seu posicionamento em superfícies antigas e/ou estáveis na paisagem, as quais já perderam quase que completamente os minerais primários facilmente intemperizáveis, restando como produtos finais há argila e uma fração arenosa constituída de quartzo (Resende et al., 1995). A presença de argila do tipo 1:1, como a caulinita, formada por camada tetraédrica de sílica e uma octaédrica de alumínio, bem como óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goetita) e de alumínio (gibbsite), cujas cargas negativas são oriundas dos bordos quebrados que expõem o radical OH<sup>-</sup> à solução do solo, apresentam baixa CTC (caulinita 3 – 15 cmol<sub>c</sub> Kg<sup>-1</sup>; illita 30 - 40 cmol<sub>c</sub> Kg<sup>-1</sup> e a montmorilonita 80 – 150 cmol<sub>c</sub> Kg<sup>-1</sup>), se comparados a matéria orgânica que pode elevar a CTC dos solos até 400 cmol<sub>c</sub> Kg<sup>-1</sup>, o que explicaria a sua significativa contribuição na CTC dos solos (Santos & Camargo, 1999).

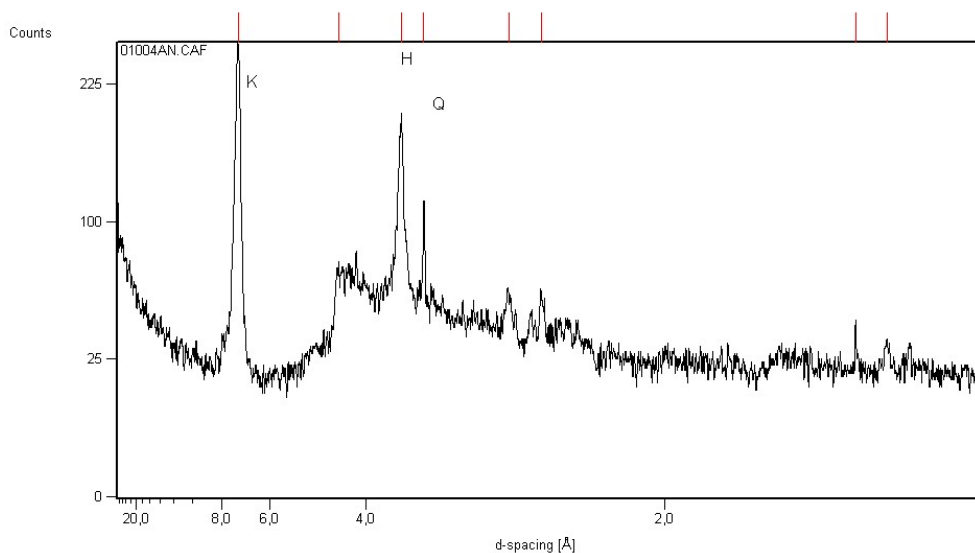


Figura 94. Difratoimetria de raios X da amostra *in natura* (amostra 1- Neossolo Quartzarênico. K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo)

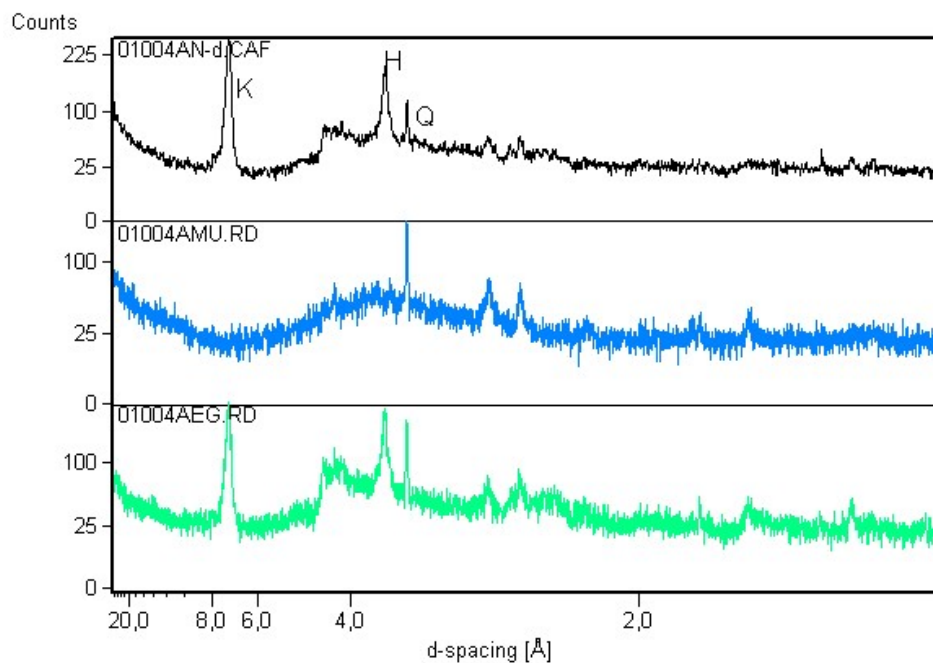


Figura 95. Difratoogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 1 – Neossolo Quartzarênico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida a 550°C e tratada com etilenoglicol. K =caulinita; H = hematita; Q = quartzo

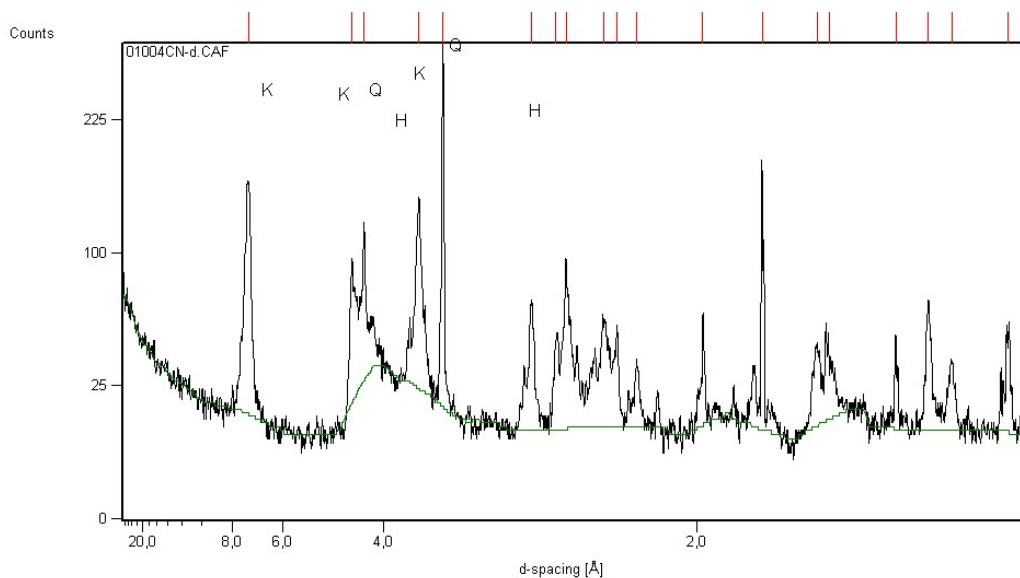


Figura 96 Difractometria de raios X da amostra *in natura* (amostra 2 - Neossolo Quartzarênico. K = caulinita; H = hematita; Q = quartzo)

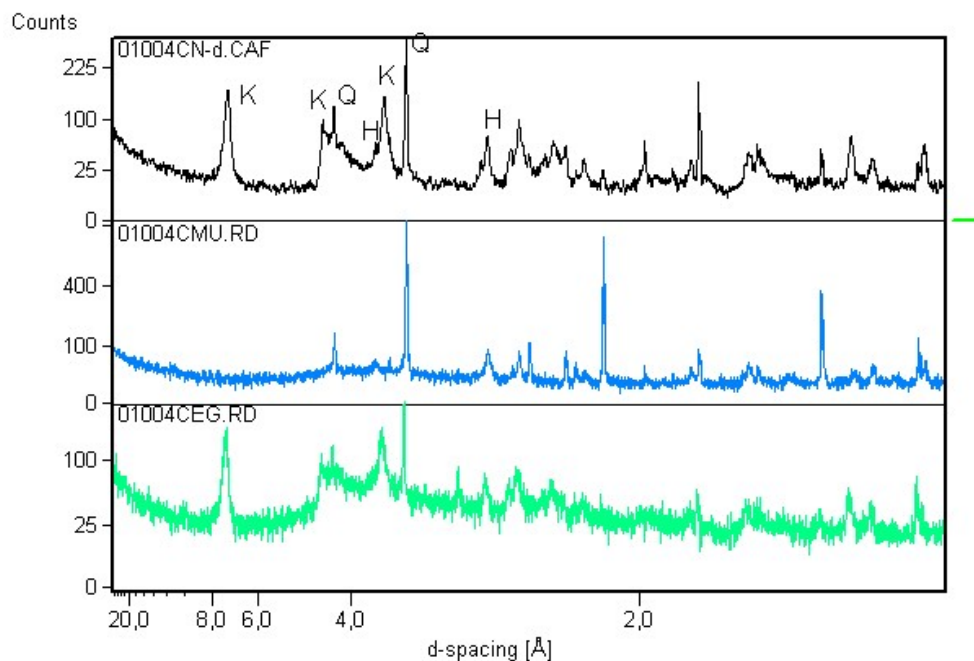


Figura 97. Difractogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra 2 - Neossolo Quartzarênico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida a 550°C e tratada com etilenoglicol. K = caulinita; H = hematita e Q = quartzo



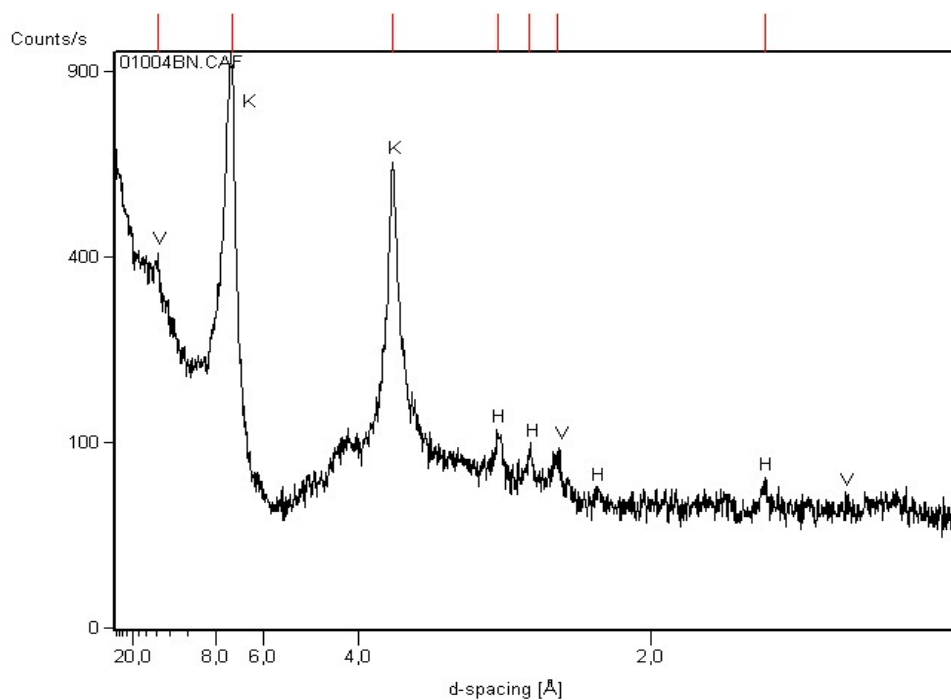


Figura 98. Difratoimetria de raios X da amostra *in natura* (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. V = vermiculita; K = caulinita; H = hematita)

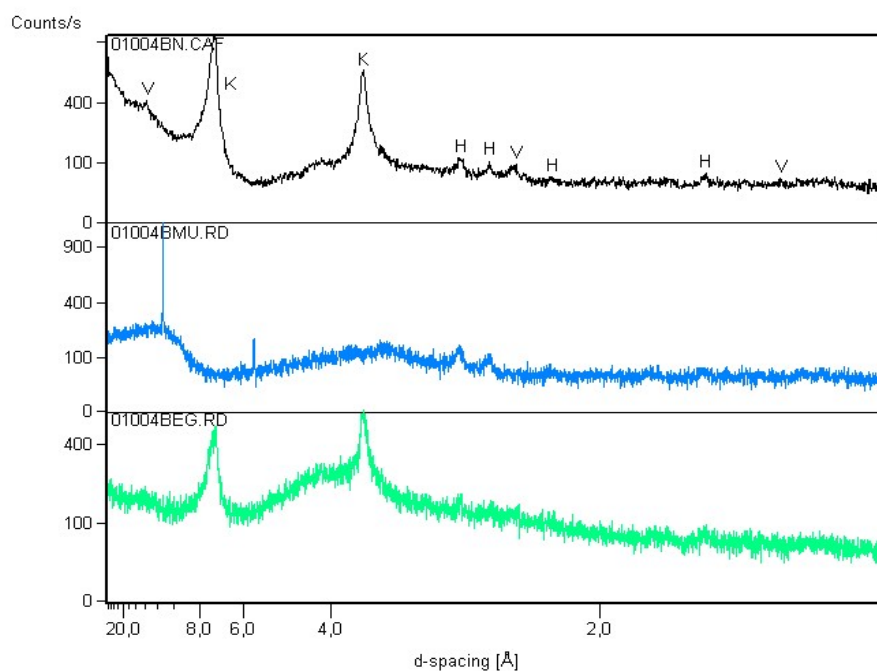


Figura 99. Difratoogramas comparativos de raios X com diferentes tratamentos (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida a 550°C e tratada com etilenoglicol. V = vermiculita; K = caulinita; H = hematita

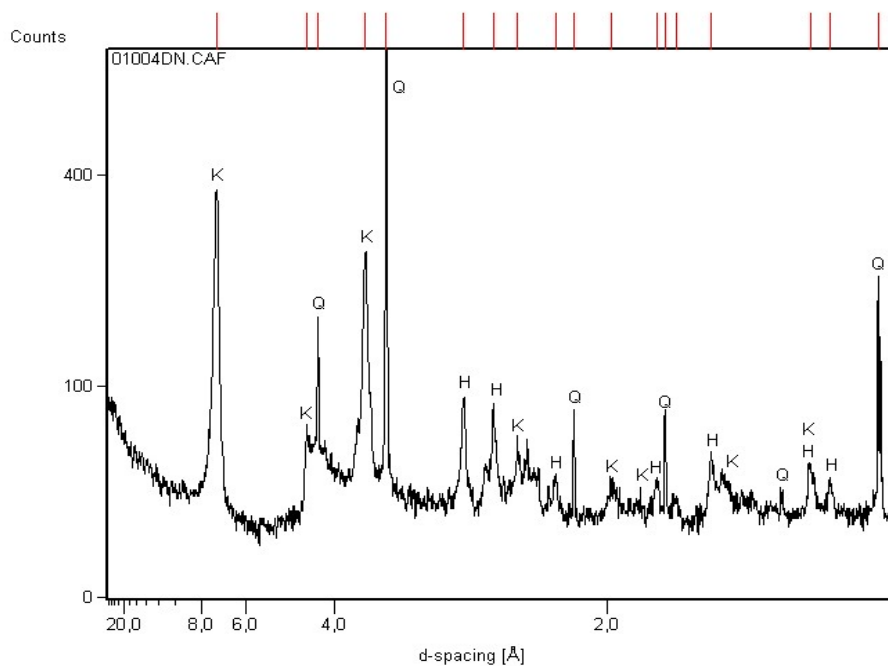


Figura 100. Difratoimetria de raios X da amostra *in natura* (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Epiálico. K = caulinita; Q = quartzo; H = hematita)

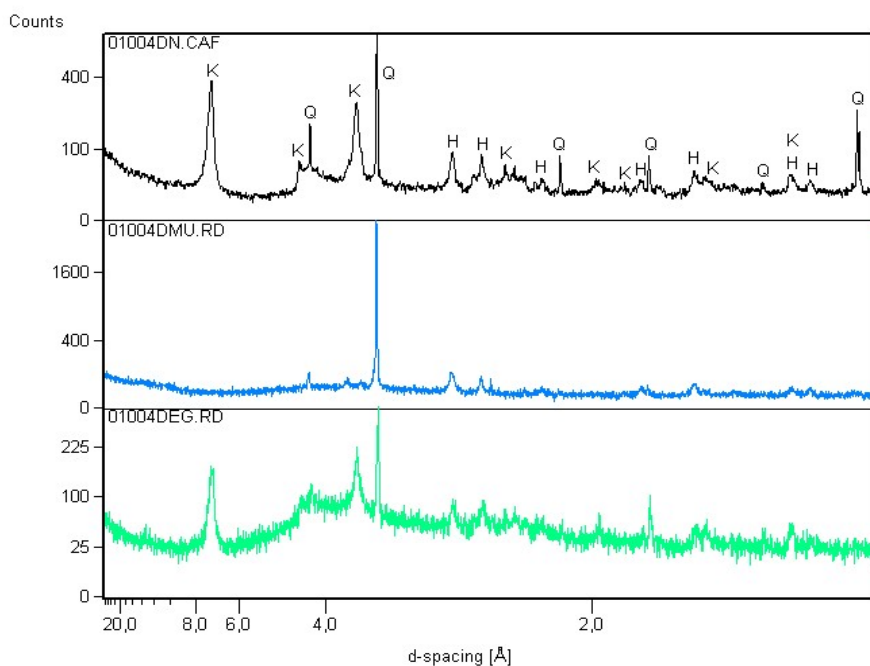


Figura 101. Difratogramas comparativos de raios X obtidos com diferentes tratamentos (amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo Epiálico). De cima para baixo: amostra *in natura*; aquecida a 550°C e tratada com etilenoglicol. K = caulinita; Q=quartzo; H = hematita

A presença do ferro principalmente na forma de hematita (Figuras 94 a 101), indicado espacialmente pelas Figuras 102 e 103, mostra uma diferença nos teores do referido elemento entre as duas profundidades, cujas maiores concentrações ocorrem entre 0 – 20 cm (Tabela 38). Mesmo assim, é nesta profundidade que existe a maior variação, 95% contra 72% para a profundidade de 20 a 40 cm. Tais variabilidades podem ser justificadas pelos tipos de solos, principalmente os Latossolos que encerram em sua composição maior percentagem de ferro.

Observando-se as Figuras 102 e 103, verifica-se que as maiores percentagens de ferro ocorrem nas manchas de domínio dos Latossolos (Figura 87). Tais concentrações possivelmente possam ser explicadas pela contribuição da Formação Serra Geral, retrabalhada com a Formação Goio-Erê.

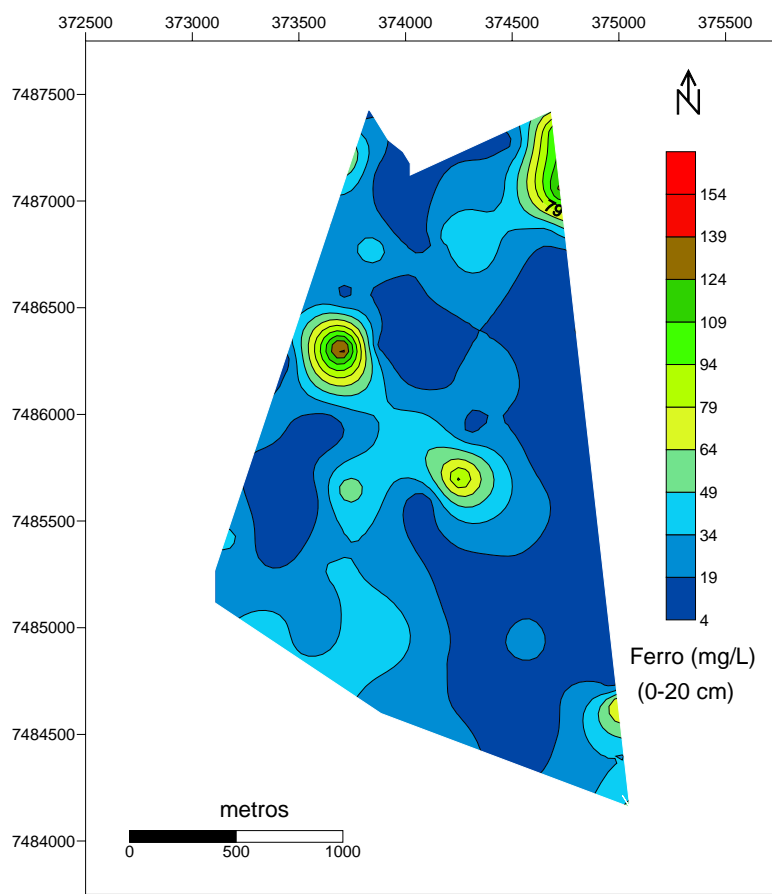


Figura 102. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 0 - 20 cm

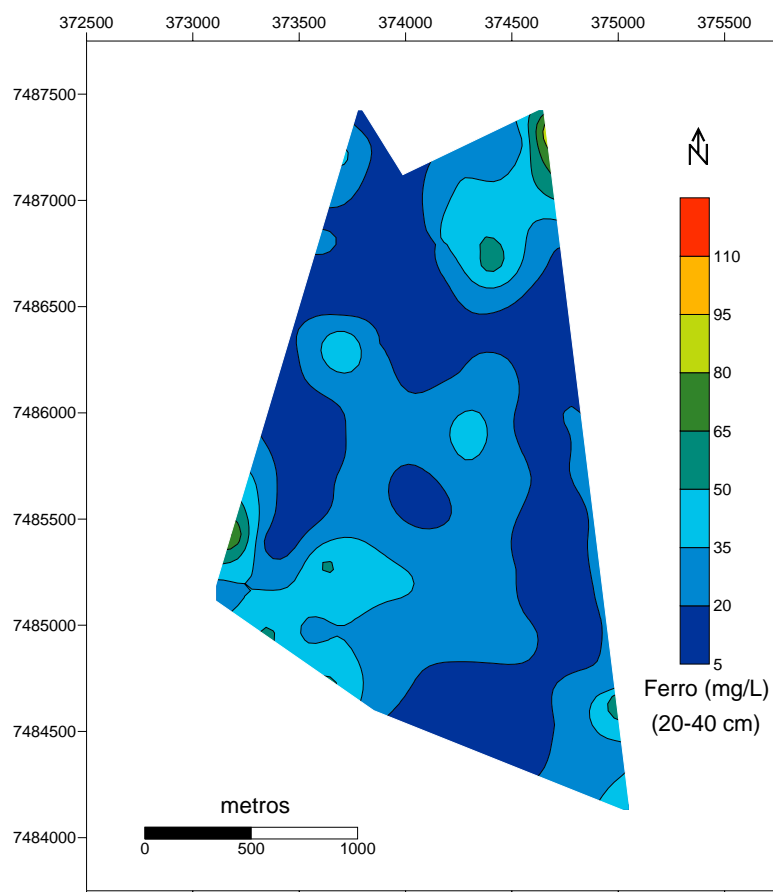
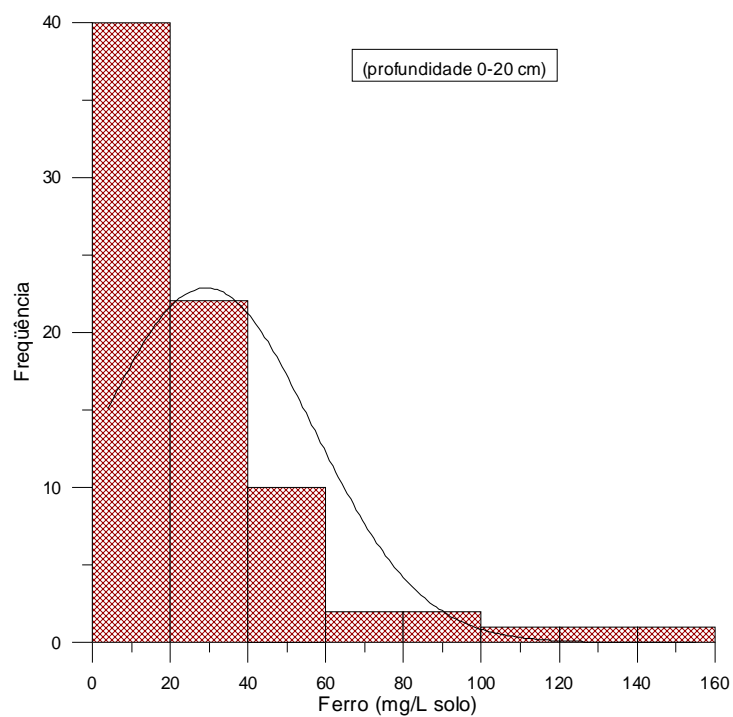


Figura 103. Distribuição espacial do ferro para a profundidade de 20 - 40 cm



(a)

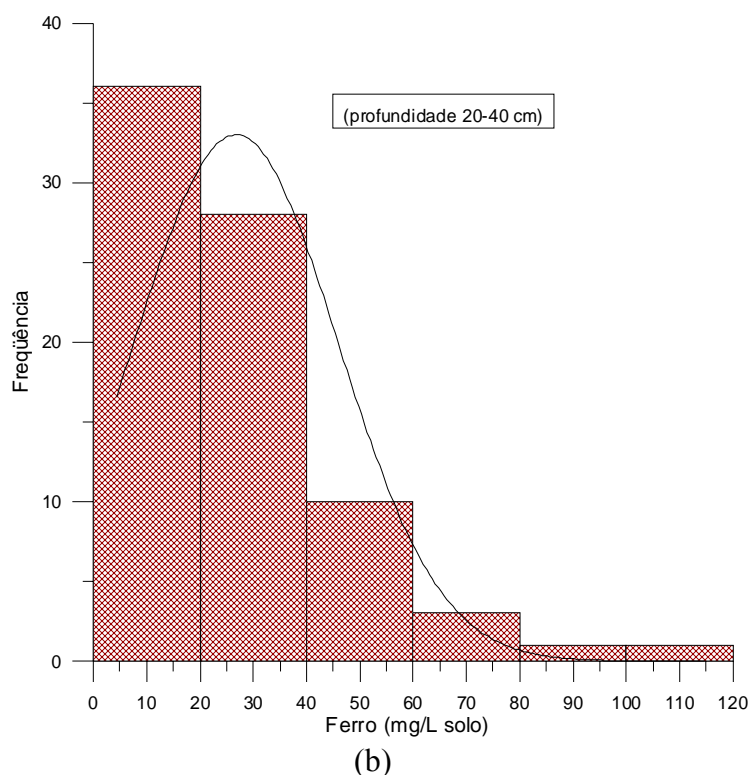


Figura 104. Histograma e curvas de distribuições do ferro para as duas profundidades

### 5.2.2.2 Análise dos dados geofísicos e geoquímicos

Nesta última etapa de discussão dos dados, efetuou-se as correlações de todas as variáveis geoquímicas (Tabelas 36 e 37) e geofísicas, levando-se em consideração os resultados das análises de solos para as duas profundidades. Optou-se por trabalhar com análise fatorial nesta área, em função das características da mesma como textura arenosa, baixo teor de matéria orgânica e baixa CTC dos solos, objetivando-se maximizar as inter-relações entre as variáveis.

Os baixos teores de matéria orgânica, 0,71% e 0,68% (Tabela 38), para as duas profundidades, respectivamente, tem como um dos principais fatores o manejo adotado antes da colheita, cujo procedimento é a queima da palhada, com a finalidade de diminuir a quantidade de folhas e ponteiros, e desta forma facilitar a colheita, aumentando o rendimento operacional e o carregamento mecânico, (Mendonza et al., 2000). As Figuras 105 e 106 representam a distribuição espacial e as Figuras 107 (a e b), refletem o comportamento estatístico da matéria orgânica.

Como os solos tem predominância textural arenosa, a capacidade de troca catiônica fica na dependência do teor de matéria orgânica. Segundo CQFS-NRS (2004), um percentual médio de matéria orgânica para os solos desta textura, seria da ordem de 3 %. Portanto, fica patente que ocorre pouca retenção dos adubos e gesso nesses solos e, como consequência, pode estar havendo lixiviação dos

radionuclídeos nos perfis, bem como transporte por erosão laminar, principalmente quando a cultura da cana-de-açúcar está se estabelecendo ou rebrotando, onde a cobertura vegetal é mínima, não reduzindo o efeito do impacto das gotas de chuva.

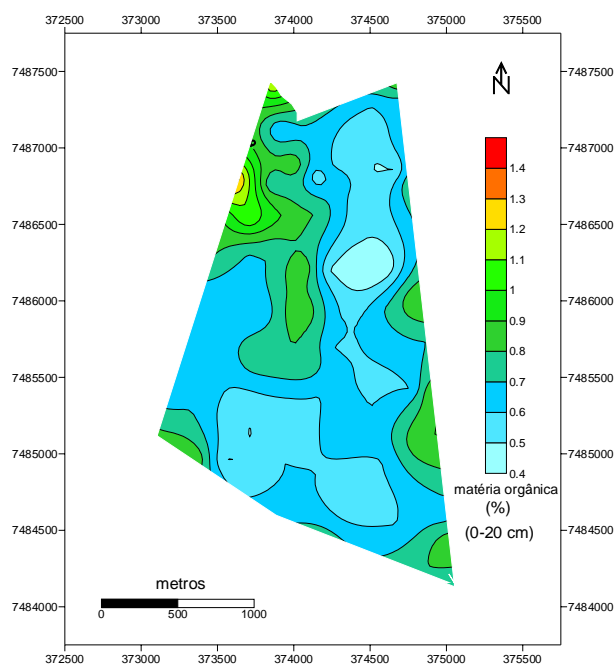


Figura 105. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 0-20 cm

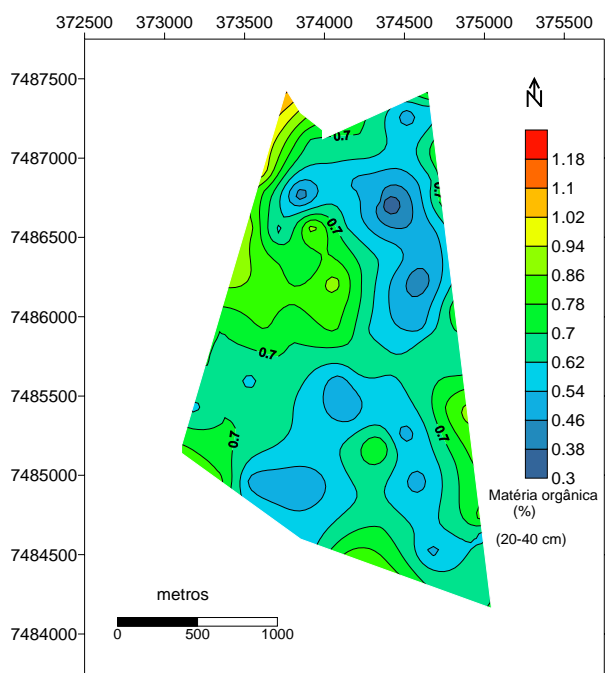
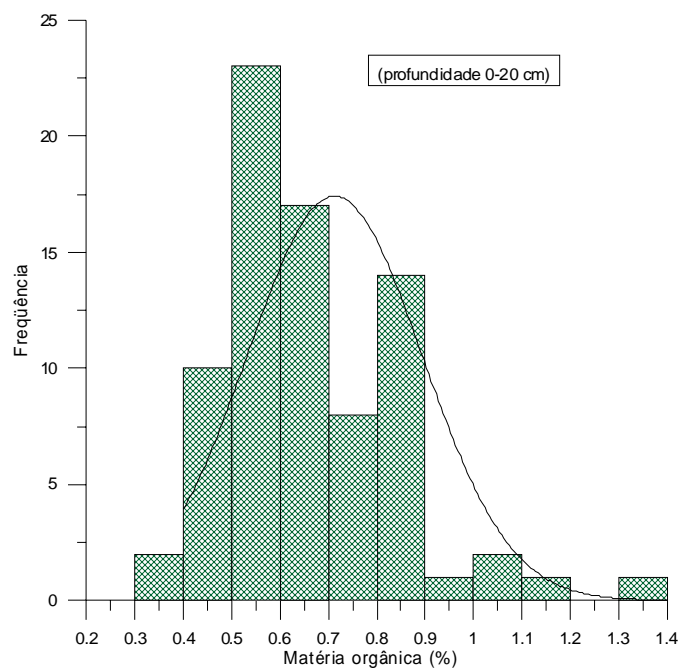
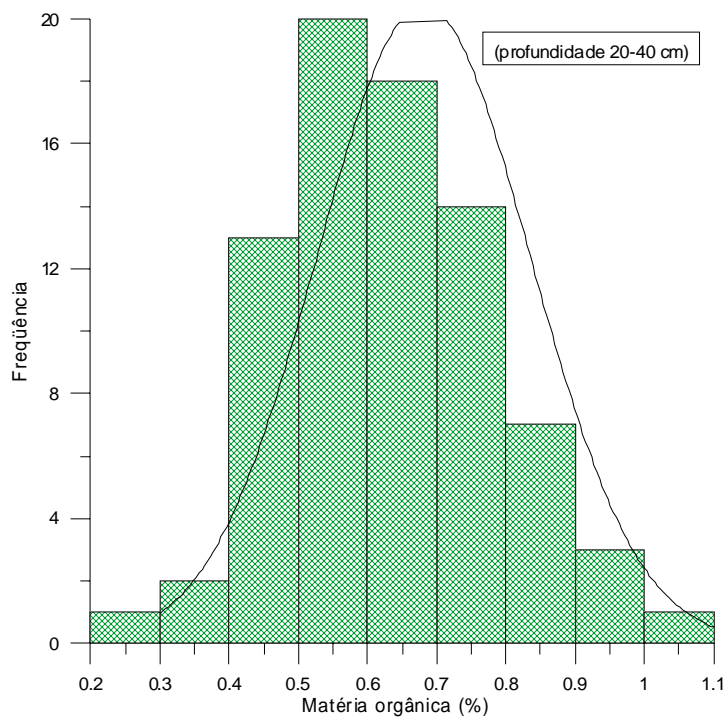


Figura 106. Distribuição espacial da matéria orgânica para a profundidade de 20-40 cm



(a)



(b)

Figura107. Histogramas e curvas de distribuições da matéria orgânica para as duas profundidades

Tabela 36. Dados geoquímicos para a profundidade de 0 - 20 cm.

X(E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo	Zinco ----- mg/L solo	Ferro ----- mg/L solo	Manganês ----- mg/L solo
375049	7484132	1	21	7,15	49	23	0,7	0	2,1	0,6	2,1	14,2	54,2	34,8
375020	7484404	2	16	7,27	29	30	0,9	0	1,3	0,5	1	4,3	32,9	59,4
374973	7484721	3	17	7,16	20,1	15	0,7	0	1,1	0,3	0,8	2,3	15,8	49
374939	7485116	4	15	7,27	20,8	20	0,9	0	1,8	0,7	0,4	4,7	17,6	66,2
374904	7485401	5	19	7,27	26,4	25	0,9	0	1,7	0,7	0,6	3,5	17,8	95,1
374878	7485742	6	16	7,27	24,5	12	0,7	0	1,3	0,3	0,4	2,8	17,6	43,1
374844	7486035	7	13	7,24	11,6	15	0,9	0	0,8	0,4	0,5	3,1	12,7	59,8
374816	7486400	8	14	7,44	28	21	0,7	0	1,3	0,4	0,4	5,8	21,1	99,8
374760	7486759	9	16	7,23	27,2	42	0,8	0	1,3	0,3	0,6	2,7	15,8	85,3
374728	7487045	10	16	7,29	80	38	0,7	0	1,8	0,7	2,1	6,7	131	136,7
374709	7487335	11	14	7,5	80	68	0,7	0	1,7	0,7	1	3,8	112,6	109,5
374701	7487424	12	14	7,34	80	116	0,9	0	1,6	0,4	0,5	3	61,5	83
374815	7484218	13	19	7,09	25	37	0,8	0	1	0,4	0,7	1,6	28,4	47,6
374483	7484330	14	13	7,41	16,2	23	0,7	0	1	0,4	0,5	1,6	15,3	69,9
374182	7484411	15	14	7,35	49	26	0,8	0	1,5	0,6	0,4	3,3	27,9	71
373910	7484529	15	14	7,26	17,9	15	0,7	0	1,3	0,4	0,2	1,5	16,6	54,8
373645	7484711	17	13	7,44	48,4	17	0,6	0	1,4	0,3	0,3	1,1	43	35,1
373355	7484967	18	12	7,33	39,2	21	0,9	0	1,5	0,4	2,7	1,9	44,6	36,5
373110	7485163	19	21	7,5	30,7	20	0,8	0	2	0,7	4,1	1,5	24,5	43,3

(continua)



Tabela 36. Continuação

X(E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo	Zinco ----- mg/L solo	Ferro ----- mg/L solo	Manganês ----- mg/L solo
373184	7485420	20	25	6,93	70,4	34	0,6	0	1,5	0,3	0,4	0,7	38	21,1
373277	7485675	21	19	7,3	17,3	15	0,7	0	1,1	0,4	0,4	1,4	16,5	55,9
373354	7485958	22	14	7,3	12,3	10	0,6	0	0,7	0,3	0,4	1	25,5	40
373437	7486253	23	20	7,56	8,7	12	0,8	0	1,3	0,1	0,4	1	10,8	47,7
373528	7486561	24	14	7,51	30,3	45	0,9	0	1,4	0,5	0,4	1,1	20,2	98,9
373611	7486915	25	17	7,22	20,2	37	1,1	0	1,4	0,6	0,2	1,8	13,4	102,4
373698	7487212	26	19	7,24	80	58	0,9	0	1,7	0,7	0,6	2,4	77,4	129,5
373795	7487418	27	19	7,17	41,1	100	1	0	1,5	0,4	0,7	1,7	11,3	94,1
373855	7487406	28	14	7,3	80	85	1,2	0	2,1	0,7	1,1	2,1	18,9	160,6
373901	7487118	29	17	7,1	1,2	21	0,6	0	0,7	0,1	1,4	0,5	6,5	35
373999	7486891	30	15	7,18	17	28	0,9	0	0,9	0,3	1,1	0,2	7,8	87,1
373922	7486564	31	14	6,9	11,1	71	0,9	0	0,5	0,2	0,6	0,7	11,1	52,1
373879	7486323	32	22	7,5	20,7	23	0,7	0	1,1	0,5	0,7	0,8	12,4	58,6
373783	7485921	33	13	7,56	17,5	6	0,6	0	0,6	0,2	0,6	1,5	25,1	40,4
373723	7485647	34	14	7,54	52	14	0,8	0	1,3	0,5	1	1,2	59,9	79,8
373623	7485286	35	18	7,33	20,7	16	0,5	0	0,9	0,5	1,1	0,3	34,7	21
373546	7484959	36	19	7,5	12,3	16	0,5	0	1	0,6	2,1	0,6	25,3	27,2
374675	7484535	37	15	7,22	17,3	19	0,6	0	1	0,2	0,9	1,8	14,6	87
374577	7484957	38	16	7,04	42,4	30	0,6	0	1,1	0,4	0,5	2	24,2	65,2
374501	7485260	39	17	7,14	22,5	14	0,6	0	0,8	0,3	0,6	0,7	16,7	58,4

(continua)

Tabela 36. Continuação

X(E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo	Zinco ----- mg/L solo	Ferro ----- mg/L solo	Manganês ----- mg/L solo
374383	7485582	40	14	7,21	80	33	0,6	0	1,3	0,3	0,6	1,8	44,3	60,9
374297	7485914	41	24	6,96	2,9	12	0,6	0	0,7	0,2	1,9	0,6	16,1	25,2
374229	7486205	42	24	7,23	8,5	63	0,5	0	1,5	0,5	1,5	0,4	18,6	58,7
374149	7486578	43	20	7,39	18,6	47	0,8	0	1,1	0,3	1,2	1	23,8	80
374164	7486812	44	15	7,36	21,6	71	0,5	0	1,1	0,3	0,6	1	20,9	54,6
374280	7487088	45	14	6,92	14,3	17	0,6	0	1,1	0,2	0,8	0,9	28,7	54,2
374510	7487271	46	14	7,26	21,3	9	0,6	0	1,2	0,2	0,5	1,5	17,8	61,9
374996	7484646	47	19	6,94	80	15	0,6	0	2,2	0,7	1,7	3,1	85,6	91
374680	7484585	48	13	7	11,8	7	0,6	0	0,9	0,4	0,3	0,6	15,1	40,8
374357	7484676	49	17	6,9	9,6	11	0,5	0	0,7	0,3	0,6	0,7	14,5	47,4
374148	7484856	50	15	6,98	30,3	46	0,6	0	0,7	0,2	0,5	0,8	20,6	61,6
373934	7484946	51	14	7,3	36,6	11	0,6	0	1,4	0,3	0,8	1,8	43,8	73,5
373992	7485189	52	15	7,12	30,4	38	0,5	0	1,1	0,3	0,6	1,4	29,2	77,6
374155	7485386	53	15	7,3	14,6	37	0,6	0	1,2	0,2	0,5	1,1	15,5	69
374252	7485700	54	14	7,4	80	105	0,6	0	1,1	0,4	0,9	1,9	99,4	82,7
373852	7486767	55	19	6,9	80	125	0,7	0	1,3	0,4	1,1	1,9	44,5	67,5
373610	7486801	56	19	7,1	58,6	78	1,4	0	2,4	1,1	0,6	2,4	25,9	87,7
373710	7486540	57	17	7,1	34,6	71	1,1	0	2	0,7	0,9	1,4	17,2	71,6
374059	7486213	58	16	7,3	11	54	0,9	0	2	0,7	0,3	0,9	5,4	61,8
374057	7485932	59	14	7,3	76	43	0,9	0	2,3	0,8	0,6	1,7	45,6	55,7

(continua)

Tabela 36. Conclusão

X(E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH (SMP)	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol/dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo	Zinco ----- mg/L solo	Ferro ----- mg/L solo	Manganês ----- mg/L solo
373699	7486309	60	14	7,14	80	39	0,7	0	3,1	1,1	1,7	5,8	155,2	120,6
374088	7485594	61	14	7,18	7,5	23	0,8	0	1	0,3	0,6	0,4	6,4	38,3
373629	7485951	62	14	7,2	12,7	24	0,6	0	1,8	0,3	0,6	0,7	5,7	41,2
373535	7485597	63	14	7,35	9	12	0,6	0	1,2	0,3	0,3	0,7	4	30,2
373376	7485387	64	15	7,16	13,7	15	0,7	0	1,8	0,4	0,5	0,8	6,5	39,9
374332	7485175	65	12	7,11	24,6	132	0,7	0	1	0,4	0,4	1,5	7,5	58,8
374819	7485078	66	14	7	30,6	26	0,9	0	1,5	0,4	0,5	0,9	8,8	45,6
374774	7485428	67	17	6,9	28,6	20	0,6	0	1,6	0,3	0,3	1,6	15,8	57,8
374665	7485808	68	17	7,4	11,4	21	0,7	0	1,9	0,8	0,3	0,7	8,9	35,4
374785	7486000	69	15	6,71	28,7	26	0,9	0	1	0,4	0,2	0,7	17,3	36,6
374663	7486512	70	15	6,96	15,5	21	0,6	0	1,2	0,3	0,6	0,8	7,9	50,2
374596	7486221	71	19	7,1	4,4	36	0,4	0	0,9	0,3	0,7	0,3	8,8	15,6
374590	7485947	72	19	7,3	25,9	25	0,7	0	2,3	0,5	0,4	0,9	13,3	55,6
374450	7486181	73	14	7,33	74,2	25	0,4	0	2,1	0,5	0,5	1,5	31	47,5
374436	7486382	74	14	7,25	37,2	21	0,5	0	1,8	0,4	0,4	0,9	17,6	46,1
374397	7486713	75	17	7,2	24,5	26	0,5	0	1	0,4	0,9	0,9	34,9	84,1
374426	7487048	76	14	7,17	19,3	31	0,5	0	0,9	0,6	0,9	0,5	26,6	67,8
374659	7486855	77	14	7,13	68	31	0,5	0	1,4	0,6	1,1	1,5	26,8	141,9
374339	7486737	78	12	7,24	39,6	27	0,7	0	0,8	0,3	0,7	0,5	42,4	69,9
374183	7486824	79	16	6,91	80	49	0,6	0	1,6	0,4	0,7	0,4	45,9	86,3

Tabela 37. Dados geoquímicos para a profundidade de 20-40 cm.

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH SMP	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio	Cálcio	Magnésio	Cobre	Zinco	Ferro	Manganês
								-----	cmol/dm <sup>3</sup>	-----		-----	mg/L solo	-----
375049	7484132	1	30	7,22	45	22	0,7	0	2,1	0,6	1,6	10,7	49,3	30,4
375020	7484404	2	19	7,08	23,3	29	0,7	0	0,9	0,3	1	7,3	28,4	53,7
374973	7484721	3	15	7,15	36	15	0,8	0	1,1	0,3	0,9	4	23,8	54,8
374939	7485116	4	16	7,26	20,5	20	0,8	0	1,7	0,6	0,5	11,8	27,9	76,1
374904	7485401	5	19	7,18	49,8	28	0,9	0	1,8	0,6	0,6	6,7	25,4	83,5
374878	7485742	6	15	7,17	9,5	13	0,6	0	0,6	0,2	0,6	12,6	23,7	41,3
374844	7486035	7	14	7,19	9,5	15	0,8	0	0,8	0,3	0,5	5,9	14,8	57,3
374816	7486400	8	14	7,48	32	20	0,6	0	1,5	0,4	0,4	3,7	17,4	88,5
374760	7486759	9	15	7,15	30,5	33	0,8	0	1,3	0,2	0,8	5,2	17	83,6
374728	7487045	10	18	7,25	80	40	0,8	0	1,2	0,5	1	4,7	58,8	82,5
374709	7487335	11	15	7,53	80	52	0,6	0	1,4	0,7	1	6,5	114,6	107,3
374701	7487424	12	15	7,12	80	73	0,9	0	1,6	0,3	0,4	3,1	62,4	61
374815	7484218	13	19	7	18,2	56	0,7	0	0,7	0,2	0,7	4,7	26,2	40
374483	7484330	14	13	7,27	20,6	21	0,8	0	0,7	0,3	0,6	2,9	16,6	56,5
374182	7484411	15	14	7,22	20,4	23	0,9	0	1,5	0,4	0,4	3,1	17,2	55,1
373910	7484529	16	15	7,19	17,3	12	0,6	0	1	0,3	0,2	2,7	17,8	49
373645	7484711	17	13	7,35	42,6	36	0,6	0	0,8	0,2	0,2	2,1	55	30,6
373355	7484967	18	12	7,24	27,3	22	0,8	0	1,3	0,2	2,7	3,2	53,3	33,1
373110	7485163	19	21	7,33	20	26	0,8	0	2	0,7	2,8	2,2	24,7	30,2

(continua)

Tabela 37. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH SMP	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol/dm <sup>3</sup> -----	Cálcio ----- cmol/dm <sup>3</sup> -----	Magnésio ----- cmol/dm <sup>3</sup> -----	Cobre ----- mg/L solo -----	Zinco ----- mg/L solo -----	Ferro ----- mg/L solo -----	Manganês ----- mg/L solo -----
373184	7485420	20	22	6,6	80	140	0,6	0	1,7	0,3	0,4	2	82,9	19,8
373277	7485675	21	19	7,14	43,6	16	0,7	0	1,2	0,5	0,7	1,9	37,6	53,9
373354	7485958	22	14	7,24	4,2	9	0,7	0	0,6	0,2	0,7	1,5	15	25,5
373437	7486253	23	18	7,55	12	12	0,9	0	1,5	0,1	0,4	1,4	13,3	48,3
373528	7486561	24	16	7,3	33	27	0,9	0	1,1	0,4	0,4	1,2	12,6	62,6
373611	7486915	25	19	7,07	44	44	1	0	1,2	0,5	0,2	2,8	17	93,4
373698	7487212	26	17	7,3	80	24	1	0	1,4	0,9	0,7	1,5	41,1	119,9
373795	7487418	27	18	7	28,1	69	1,1	0	2,1	0,4	0,6	2,1	11,5	100,7
373855	7487406	28	16	7,24	35,2	43	1	0	1,8	0,3	1,3	0,3	11,7	149,1
373901	7487118	29	19	7,17	1,4	26	0,7	0	0,6	0,1	1,8	0,2	10,2	33,9
373999	7486891	30	20	7,1	17	20	0,6	0	0,8	0,3	1,6	0,3	8,3	48,9
373922	7486564	31	15	7,15	10,8	88	0,9	0	0,6	0,2	0,6	0,8	11,8	53
373879	7486323	32	15	7,3	6,6	21	0,7	0	0,9	0,3	0,8	1,1	20	38,1
373783	7485921	33	17	7,6	26,3	7	0,7	0	0,4	0,1	0,4	1,6	27,7	32,2
373723	7485647	34	18	7,51	20,2	13	0,7	0	1,4	0,5	1	1,1	26,9	75,6
373623	7485286	35	21	7,3	58	19	0,7	0	0,9	0,6	1,9	1	53,4	18,9
373546	7484959	36	21	7,11	15,8	50	0,5	0	0,5	0,3	2	0,7	29,7	31
374675	7484535	37	15	7,16	8,8	18	0,5	0	0,6	0,1	0,8	1,9	18,4	65,7
374577	7484957	38	15	7,21	13,3	32	0,5	0	1	0,4	0,8	2,3	22,8	68,3
374501	7485260	39	16	7,07	14,1	20	0,5	0	0,7	0,2	0,9	0,9	20,8	49,2

(continua)

Tabela 37. Continuação

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH SMP	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	-----cmol/dm <sup>3</sup> -----			-----mg/L solo-----			
								Alumínio	Cálcio	Magnésio	Cobre	Zinco	Ferro	Manganês
374383	7485582	40	14	7,22	17,2	38	0,6	0	0,7	0,3	0,5	1,4	25,9	77,4
374297	7485914	41	24	7,09	3,9	38	0,6	0	0,8	0,2	1,5	0,6	44,3	28
374229	7486205	42	27	7,21	8,6	38	0,7	0	1,9	0,6	1,8	0,6	17,5	58,2
374149	7486578	43	19	7,4	5,7	24	0,6	0	0,8	0,2	1,2	0,8	12,5	58,9
374164	7486812	44	14	7,25	16,3	31	0,6	0	0,7	0,2	0,5	0,8	22,4	40,6
374280	7487088	45	16	7	61,4	19	0,7	0	1,3	0,5	0,7	1,2	37,2	55,4
374510	7487271	46	14	7,15	24	10	0,5	0	1,2	0,2	0,5	1,5	19,1	52,1
374996	7484646	47	18	6,98	80	18	0,6	0	2	0,8	1,6	1,9	64,8	68,4
374680	7484585	48	14	6,9	12	9	0,6	0	0,7	0,3	0,5	0,6	19,3	42,2
374357	7484676	49	19	6,75	6,4	15	0,7	0,5	0,5	0,2	0,7	0,6	17,3	45,8
374148	7484856	50	17	6,83	15,1	41	0,6	0,2	0,5	0,1	1,1	0,5	20,7	50,8
373934	7484946	51	14	7	26,2	30	0,5	0	0,8	0,1	0,7	1,4	22,5	57,4
373992	7485189	52	15	7,28	41,2	16	0,6	0	1,2	0,4	0,9	1,1	38,3	57,3
374155	7485386	53	14	7,32	22,1	23	0,5	0	1,1	0,2	0,5	1,1	24,6	71,7
374252	7485700	54	15	7,2	33,2	54	0,7	0	1	0,3	0,7	0,7	31,9	54
373852	7486767	55	17	6,8	53,6	93	0,4	0,3	1,2	0,4	1,1	0,7	18,1	32,6
373610	7486801	56	19	6,8	64	74	0,8	0,2	1,8	0,4	0,7	1	23,9	55,3
373710	7486540	57	19	7,2	15,3	28	0,6	0	1,8	0,5	0,5	1,1	6,2	46,6
374059	7486213	58	15	7,2	39	59	0,9	0	2,4	0,7	0,4	1,2	13,3	68,3
374057	7485932	59	18	7,1	39	33	0,8	0	1,9	0,4	0,4	1,2	21,5	40,7

(continua)

Tabela 37. Conclusão

X (E-W) (UTM)	Y (S-N) (UTM)	Pontos	Argila (%)	pH SMP	P (ppm)	K (ppm)	Matéria orgânica (%)	Alumínio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cálcio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Magnésio ----- cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	Cobre ----- mg/L solo	Zinco ----- mg/L solo	Ferro ----- mg/L solo	Manganês ----- mg/L solo
373699	7486309	60	18	6,82	80	69	0,8	0	1,8	0,6	1,3	2,1	52,6	83,8
374088	7485594	61	17	7,1	17,4	47	0,5	0	1,1	0,2	0,5	0,5	6,6	55,2
373629	7485951	62	16	7,37	23	19	0,8	0	2,2	0,4	0,4	0,8	7,7	53
373535	7485597	63	14	7,38	12,7	12	0,6	0	1,4	0,4	0,3	0,7	4,3	35,4
373376	7485387	64	17	7,1	12,2	21	0,7	0	1,8	0,3	0,6	0,9	4,9	38,1
374332	7485175	65	14	6,8	80	200	0,8	0,3	0,8	0,3	0,4	1,6	25,7	56,9
374819	7485078	66	15	6,8	15,5	28	0,7	0,3	1,2	0,2	0,4	1,1	5,8	54,6
374774	7485428	67	18	6,85	11,5	26	0,8	0	1,4	0,3	0,4	1,1	11,1	47,4
374665	7485808	68	18	7,25	4,3	27	0,7	0	1,3	0,4	0,4	0,7	17	23,8
374785	7486000	69	20	6,54	13,6	21	0,7	0,6	0,7	0,2	0,3	0,6	23,8	38,4
374663	7486512	70	15	6,95	4,9	22	0,5	0,4	0,8	0,2	0,6	0,5	7,3	39,1
374596	7486221	71	19	7,32	17,1	27	0,4	0	2,1	0,5	0,3	0,5	7,4	33,3
374590	7485947	72	19	7,31	9,7	20	0,5	0	1,5	0,3	0,4	0,6	9,6	38,8
374450	7486181	73	14	7,31	55,4	33	0,5	0	1,8	0,4	0,4	1,2	32,1	40,4
374436	7486382	74	14	7,2	12,2	23	0,6	0	1,2	0,3	0,5	0,7	13	45
374397	7486713	75	19	7,01	80	50	0,3	0	0,9	0,3	1,3	0,4	62	40,8
374426	7487048	76	14	6,95	45,6	59	0,6	0,3	0,5	0,2	1,2	0,4	37,4	77,4
374659	7486855	77	15	6,88	44,4	32	0,6	0	0,9	0,3	1,3	0,9	26	135
374339	7486737	78	16	6,68	31,4	26	0,5	0,6	0,4	0,1	0,6	0,1	46,7	41,5
374183	7486824	79	19	6,75	55,6	54	0,5	0,6	0,7	0,2	0,7	0,1	46	48,1

Tabela 38. Estatística descritiva dos dados geoquímicos para as profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm.

Profundidade 0 – 20 cm											
	Argila	M.O	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	pH
	----- % -----	-----	---ppm---		-cmol/dm <sup>3</sup> -		-----mg/L-----				
Mínimo	12	0,4	1,2	6	0,5	0,1	0,2	0,2	4	15,6	6,7
Máximo	30	1,4	80	132	3,1	1,1	4,1	14,2	155	16,1	7,5
<b>Média</b>	<b>16,2</b>	<b>0,71</b>	<b>33,6</b>	<b>35</b>	<b>1,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>	<b>1,8</b>	<b>29</b>	<b>64,5</b>	<b>7,2</b>
Desvio padrão	3,2	0,18	24,5	27,8	0,49	0,2	0,6	1,9	27,7	28,6	0,18
Coefficiente de variação	0,19	0,25	0,73	0,8	0,36	0,4	0,7	1,1	0,95	0,44	0,02
Assimetria	1,68	1,06	0,93	1,84	0,84	1,1	2,7	4,0	2,57	1,04	-0,3
Curtose	3,89	1,82	-0,47	3,16	0,93	1,5	10,3	22,3	7,5	1,35	-0,2
Profundidade 20 – 40 cm											
Mínimo	12	0,3	1,4	7	0,4	0,1	0,2	0,1	4,3	18,9	6,5
Máximo	30	1,1	80	200	2,4	0,9	2,8	12,6	114	149	7,6
<b>Média</b>	<b>16,9</b>	<b>0,68</b>	<b>30,7</b>	<b>35</b>	<b>1,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,81</b>	<b>2,1</b>	<b>26,8</b>	<b>55,6</b>	<b>7,1</b>
Desvio padrão	3,1	0,15	23,4	29	0,5	0,17	0,5	2,5	19,2	24,5	0,22
Coefficiente de variação	0,18	0,23	0,76	0,83	0,4	0,51	0,66	1,2	0,72	0,44	0,03
Assimetria	1,55	0,28	0,98	3,2	0,4	0,93	1,7	2,6	1,9	1,5	-0,5
Curtose	4,11	-0,05	-0,12	14,4	-0,8	0,65	3,3	7,3	5,06	3,1	0,2

Comparando-se os valores geoquímicos para as duas profundidades, respectivamente, verifica-se que a argila possui teor médio de 16,2 e 16,9 (Tabela 38). Sua distribuição espacial e o comportamento estatístico gráfico podem ser visto nas Figuras 108 a 110 (a e b), respectivamente. Os teores de cálcio e magnésio (Figuras 111 a 116) são oriundos das adições de calcário dolomítico, visando elevar os níveis de pH (Figuras 117 a 119) a uma faixa ideal de 6,0 a 6,5, já que o solo é quimicamente pobre, de textura arenosa, constituído basicamente por quartzo. Os níveis de fósforo e potássio (Figuras 120 a 125) são adicionados via adubação, e os nutrientes cobre, zinco, ferro e manganês segundo histórico da área, não tem origem antrópica, já que as formulações utilizadas são constituídas basicamente de N-P-K. Mesmo assim verifica-se diferenças dos elementos mencionados para as duas profundidades, cuja origem possivelmente possa ser atribuída à rochas eruptivas básicas intemperizadas, as quais foram recobertas pelos arenitos de idade mais jovem (Fernandes & Coimbra 2000), originando solos que foram retrabalhados, envolvendo as duas litologias (Embrapa, 1984).

Constatou-se correlações significativas entre urânio e tório, argila e tório e argila e urânio para a profundidade de 0 – 20 cm (Tabela 36). Para a profundidade 20 – 40 cm a correlação mais significativa ocorreu entre urânio e tório (Tabela 37). Kumru et al., (2003) não obtiveram correlações significativas entre Fe, K, Mn, U e Th em amostras de solos, ao contrário de Navas et al., (2003), que conseguiram valores significativos de correlações entre K e U e Th e Ra.



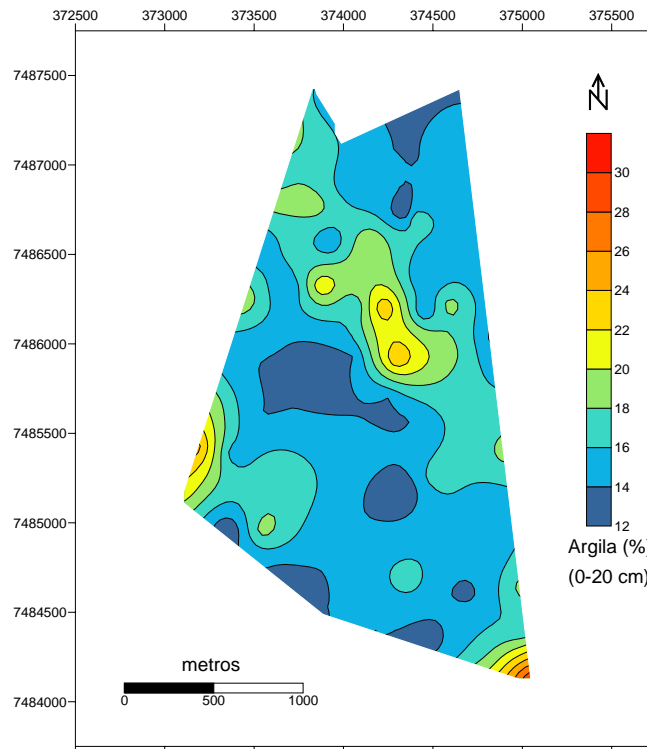


Figura 108. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 0 - 20 cm

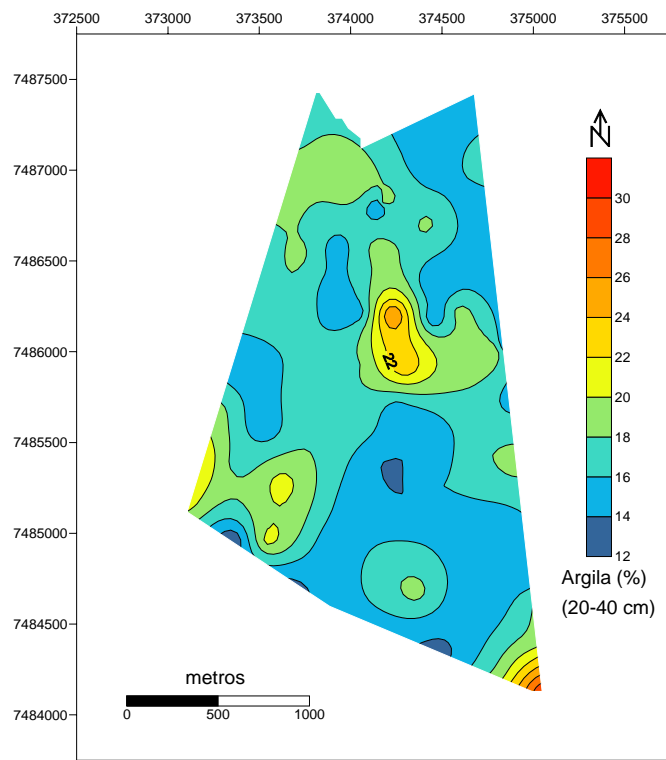
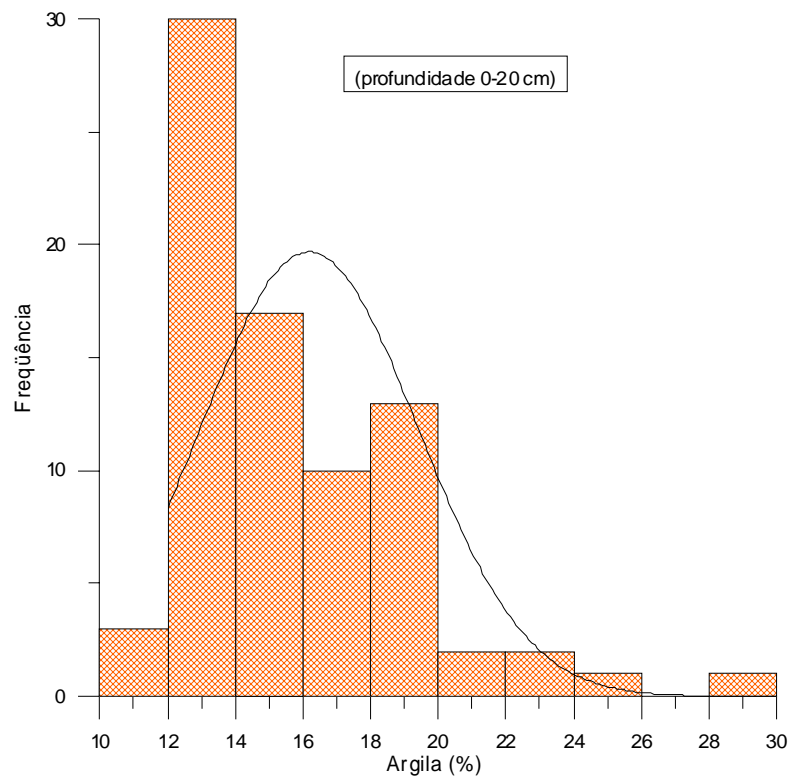
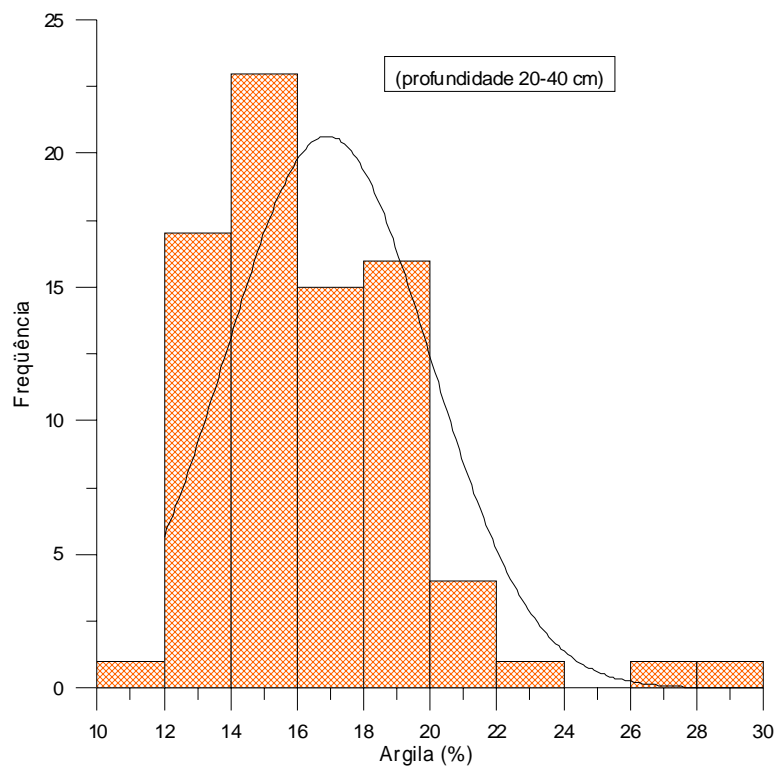


Figura 109. Distribuição espacial da argila para a profundidade de 20 - 40 cm



(a)



(b)

Figura 110. Histogramas e curvas de distribuições da argila para as duas profundidades

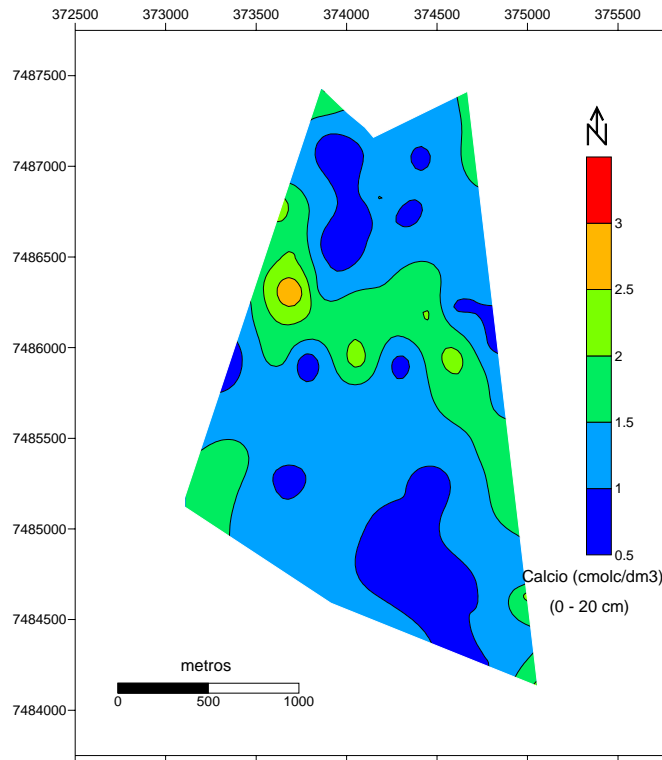


Figura 111. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 0 – 20 cm

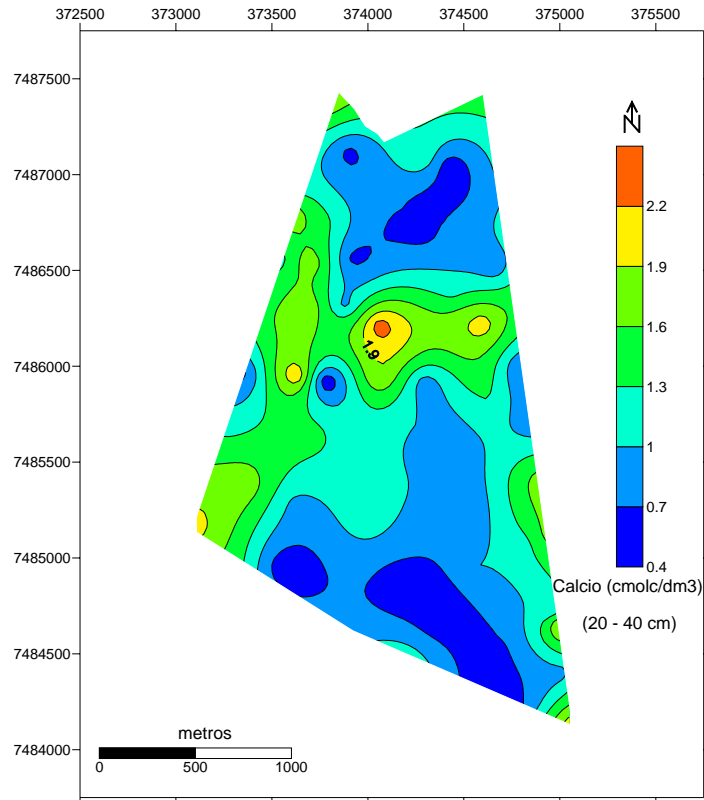
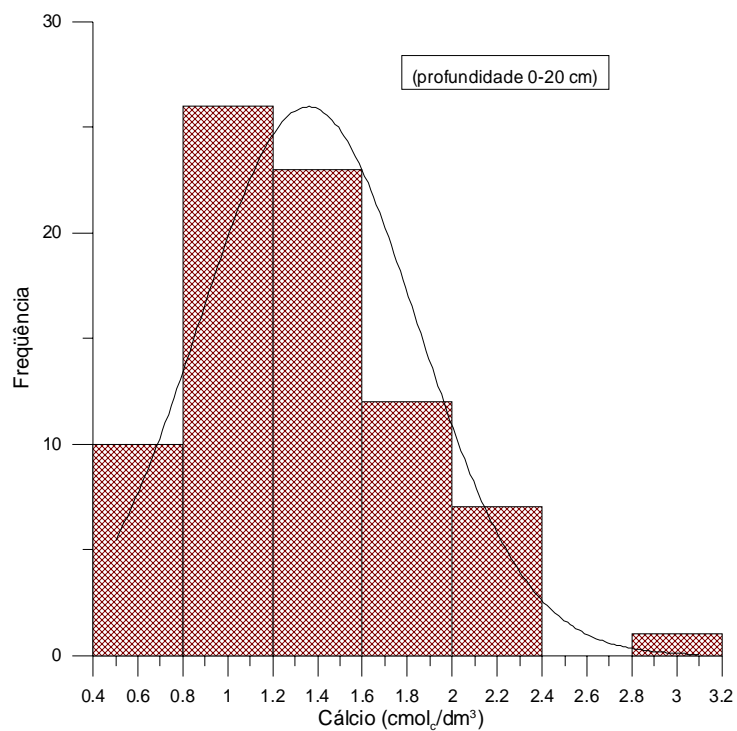
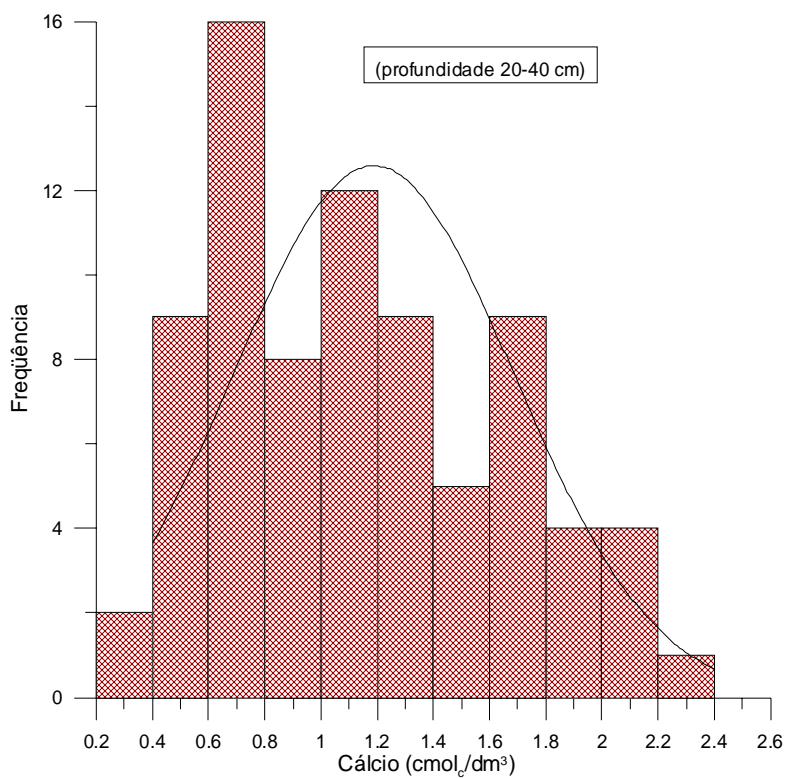


Figura 112. Distribuição espacial do cálcio para a profundidade de 20 – 40 cm



(a)



(b)

Figura 113. Histograma e curvas de distribuições do cálcio para as duas profundidades

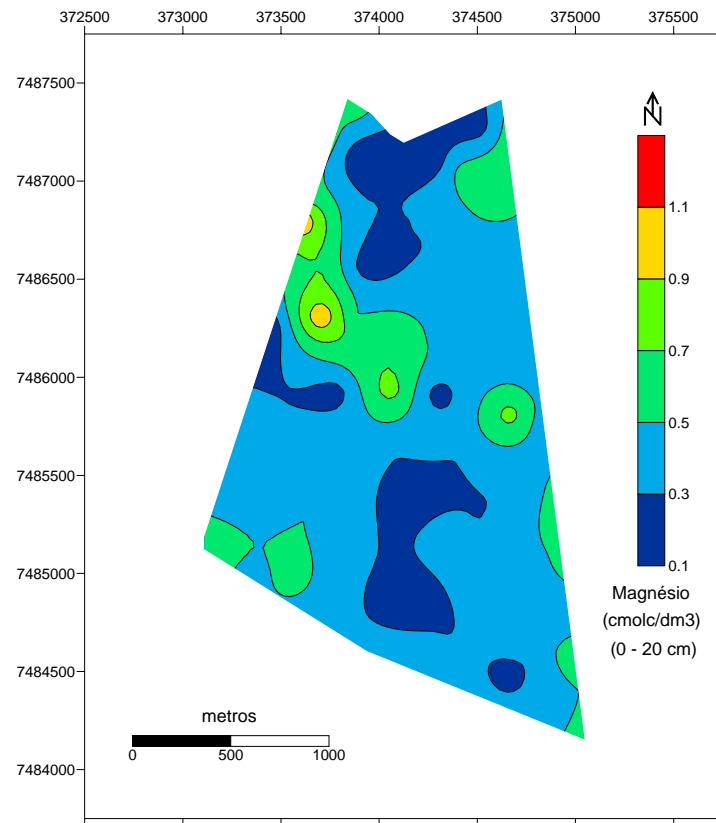


Figura 114. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 0 – 20 cm

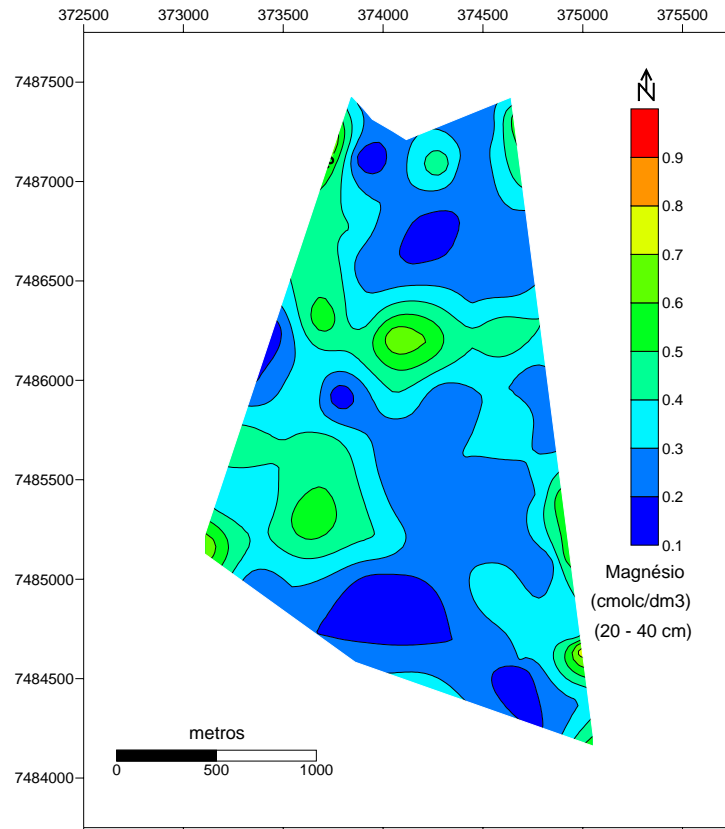


Figura 115. Distribuição espacial do magnésio para a profundidade de 20 – 40 cm

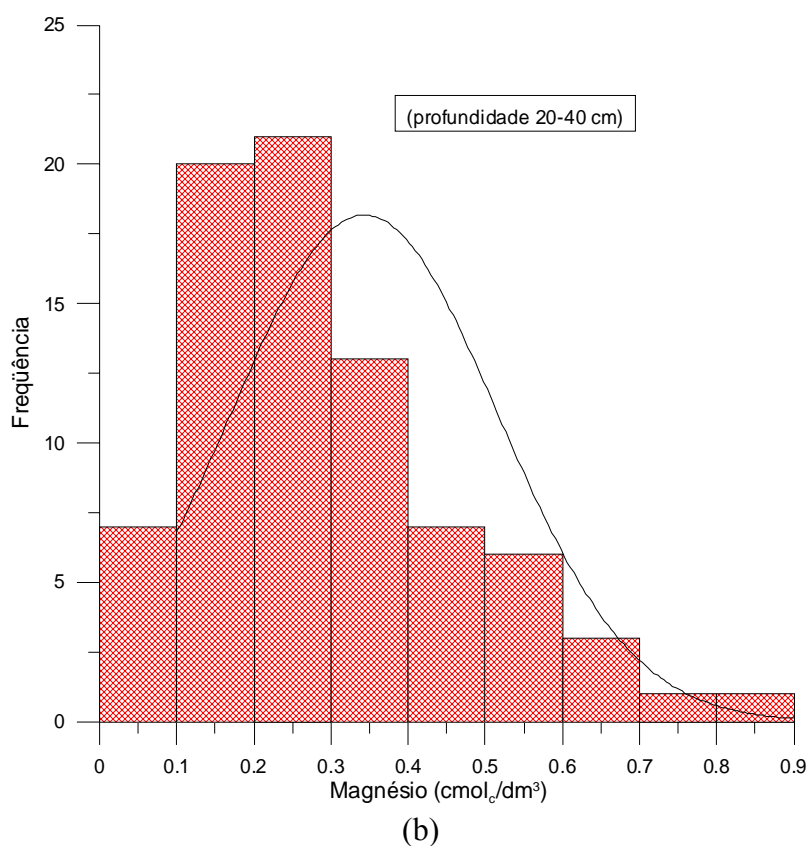
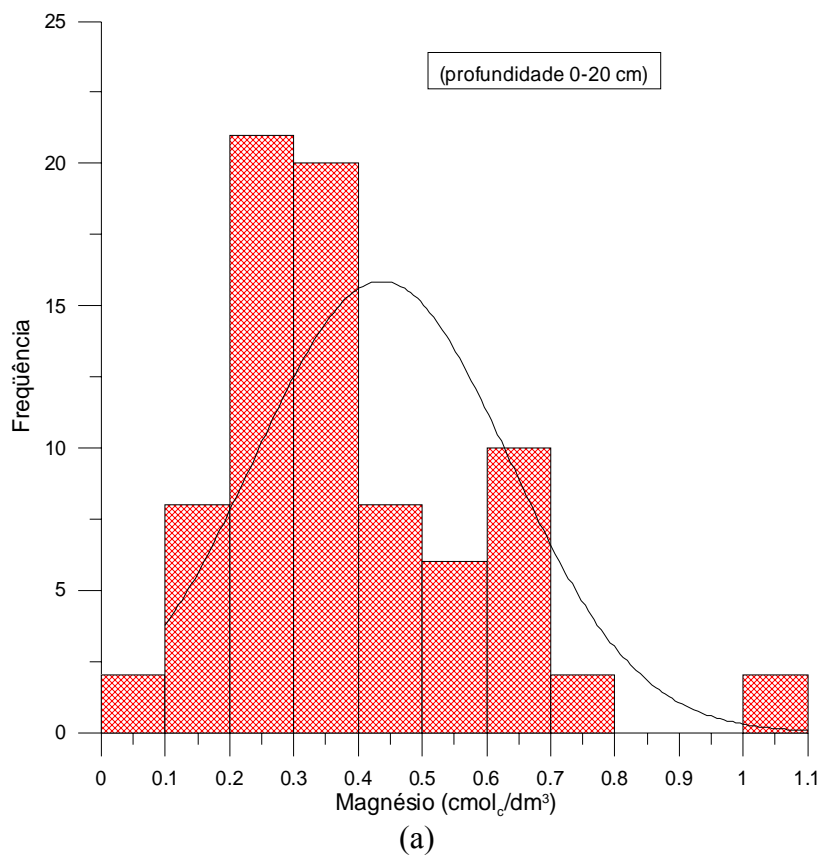


Figura 116. Histograma e curvas de distribuições do magnésio para as duas profundidades

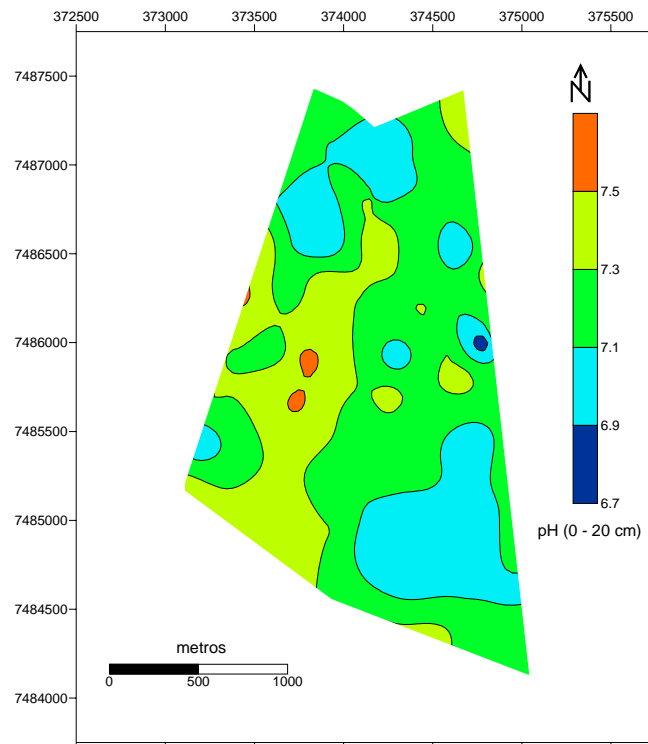


Figura 117. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 0 – 20 cm

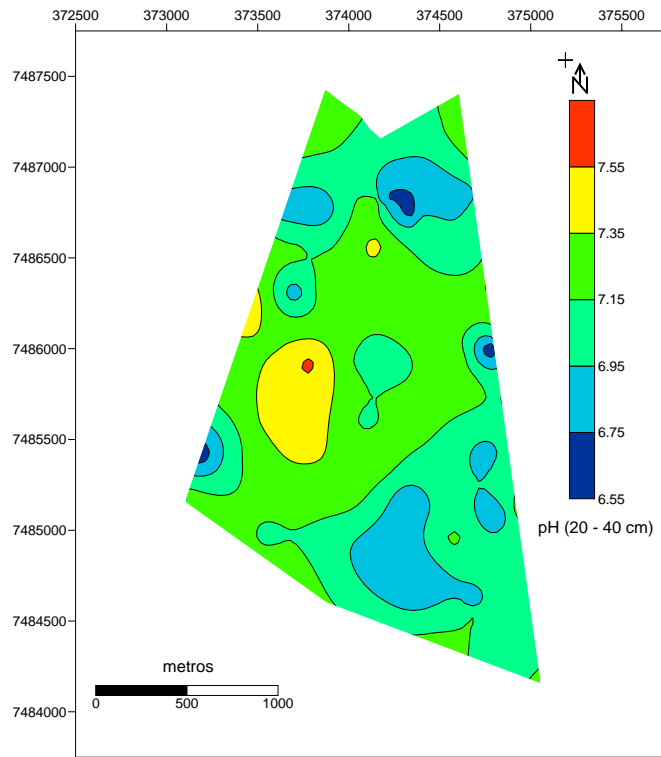
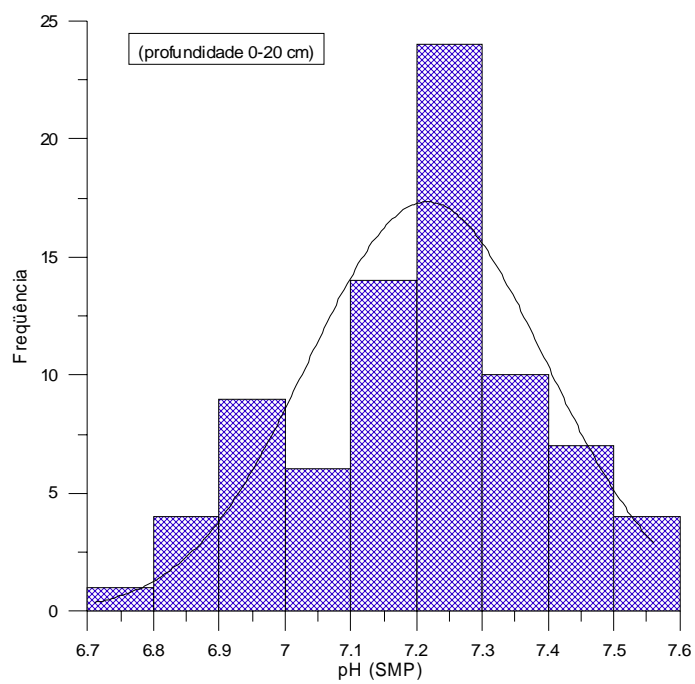
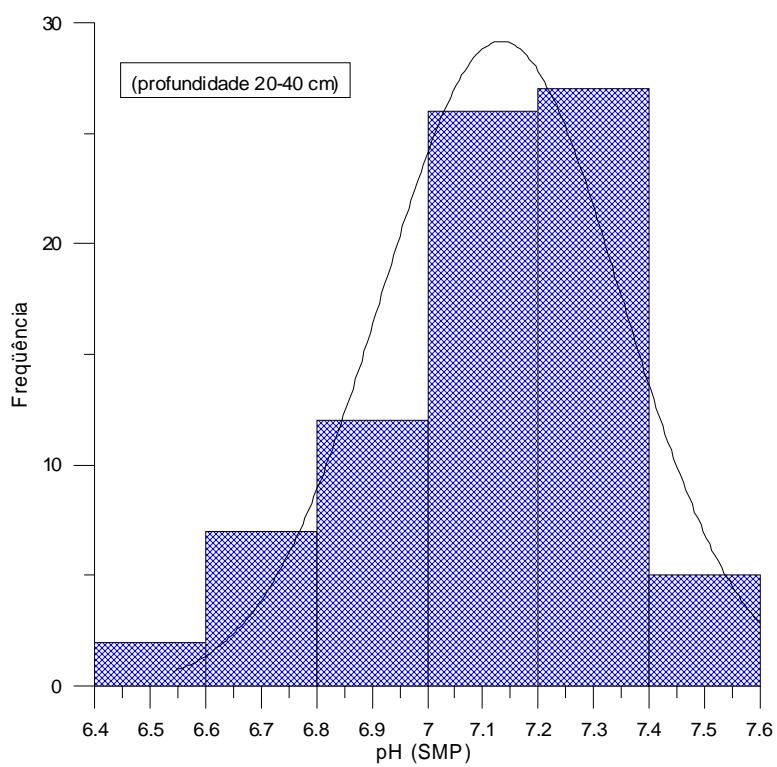


Figura 118. Distribuição espacial do pH para a profundidade de 20 – 40 cm



(a)



(b)

Figura 119. Histogramas e curvas de distribuição do pH para as duas profundidades



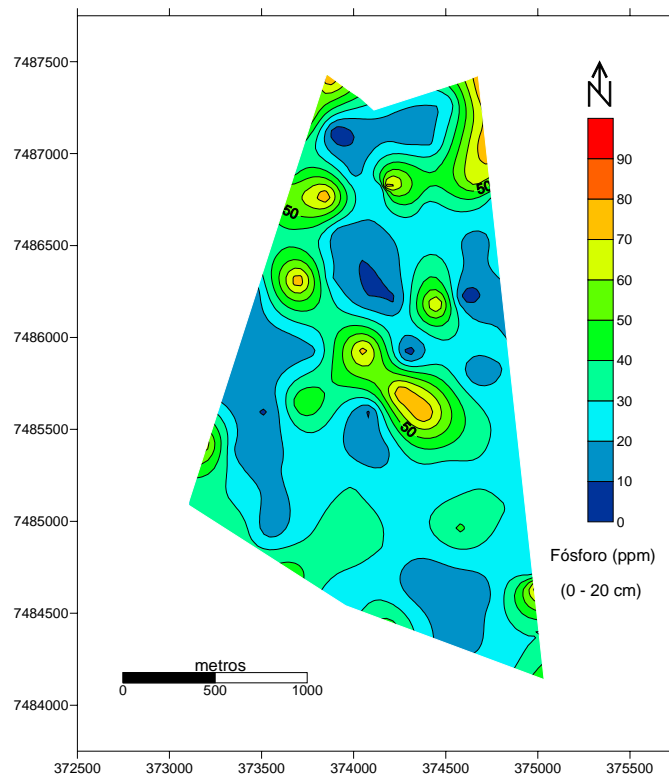


Figura 120. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 0 – 20 cm

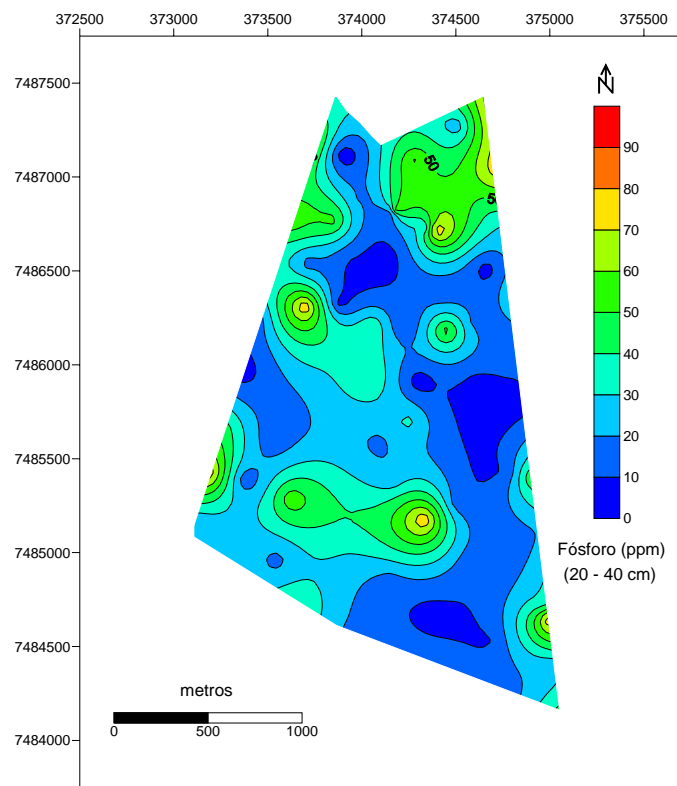
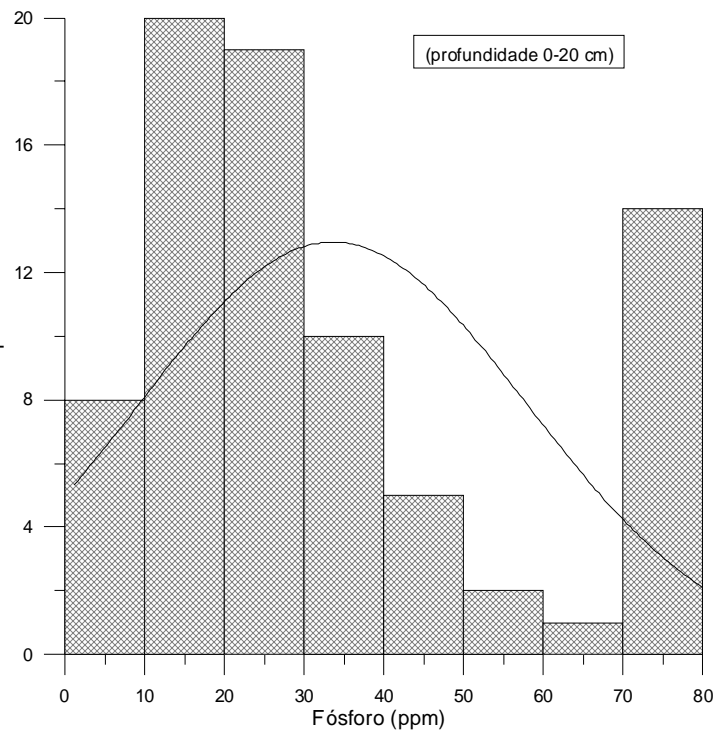
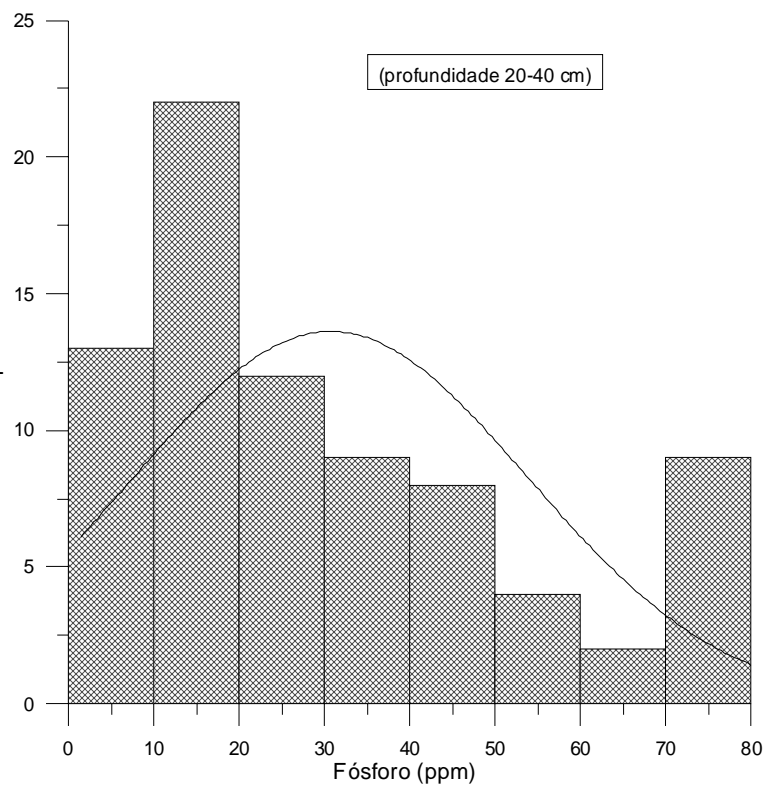


Figura 121. Distribuição espacial do fósforo para a profundidade de 20 – 40 cm



(a)



(b)

Figura 122. Histogramas e curvas de distribuições do fósforo para as duas profundidades

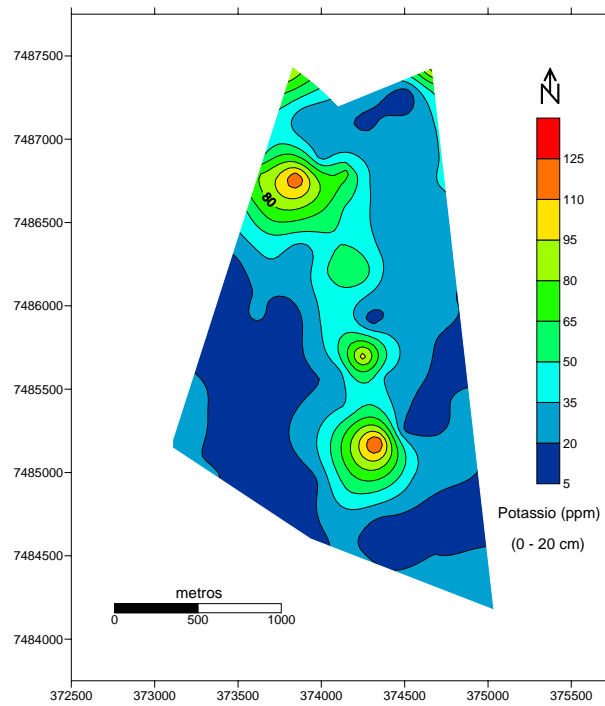


Figura 123. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 0 – 20 cm

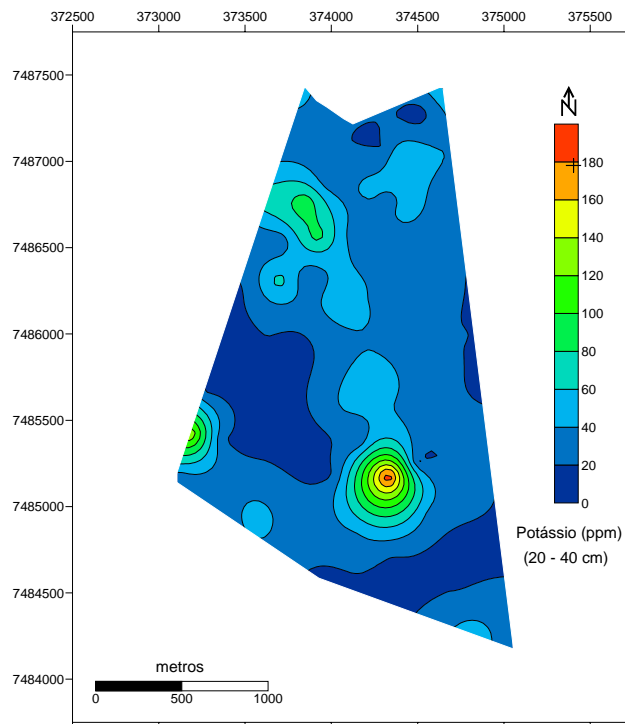
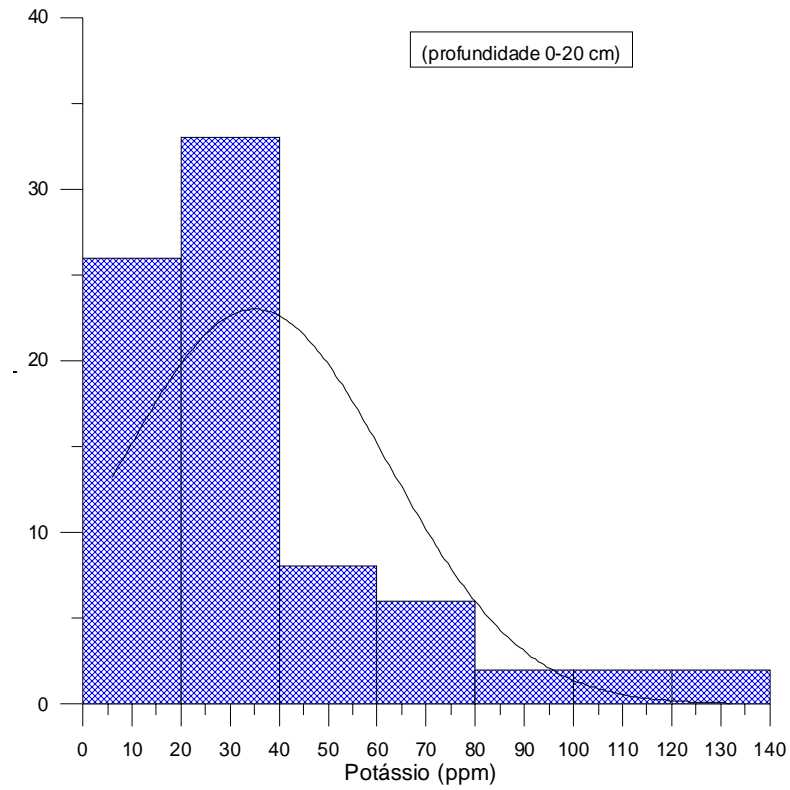
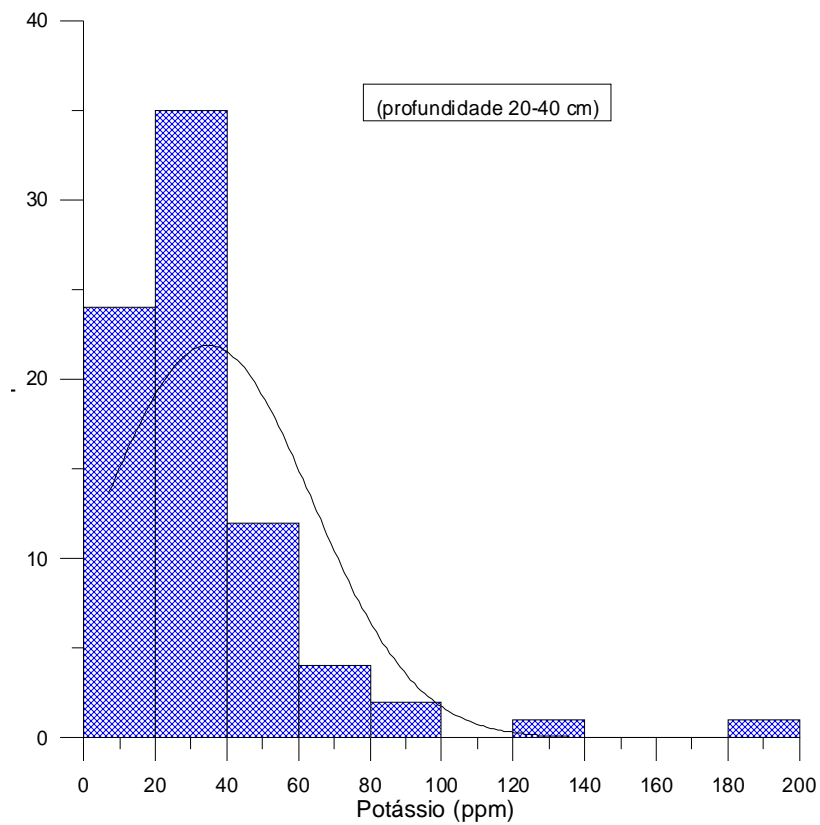


Figura 124. Distribuição espacial do potássio para a profundidade de 20 – 40 cm



(a)



(b)

Figura 125. Histogramas e curvas de distribuições do potássio para as duas profundidades

As Tabelas 39 e 40 mostram as respectivas matrizes de correlação para as duas profundidades investigadas. As correlações mais significativas ocorreram entre a argila e o urânio e argila e o tório (0,90 e 0,84), respectivamente e entre urânio e o tório, cujo fato também foi constatado por Tomé et al., (2002); Kannan et al., (2002).

Tabela 39. Matriz de correlação para a profundidade 0 – 20 cm das variáveis geoquímicas e geofísicas.

	<i>K</i>	<i>U</i>	<i>Th</i>	<i>Argila</i>	<i>pH</i>	<i>Fósforo</i>	<i>Potássio</i>	<i>Matéria orgânica</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>
<b>K</b>	1													
<b>U</b>	0,08	1												
<b>Th</b>	0,16	<b>0,88</b>	1											
<b>Argila</b>	0,11	<b>0,90</b>	<b>0,84</b>	1										
<b>pH</b>	-0,09	-0,07	-0,10	-0,07	1									
<b>P</b>	0,04	-0,02	0,01	-0,03	0,01	1								
<b>Potássio</b>	0,02	0,25	0,24	0,24	0,16	-0,09	1							
<b>Matéria orgânica</b>	0,01	-0,06	-0,01	-0,04	0,01	0,02	-0,26	1						
<b>Ca</b>	-0,01	0,0	0,01	0,02	-0,09	0,04	-0,08	-0,04	1					
<b>Mg</b>	-0,07	-0,18	-0,16	-0,27	0,07	0,11	0,06	-0,08	-0,01	1				
<b>Cu</b>	-0,04	0,04	-0,01	0,02	0,06	0,28	0,0	0,01	-0,07	0,16	1			
<b>Zn</b>	-0,03	-0,06	0,0	-0,04	-0,07	0,01	-0,12	-0,03	-0,11	0,01	-0,01	1		
<b>Fe</b>	-0,01	-0,11	-0,03	-0,12	0,16	0,28	0,16	0,02	-0,14	0,21	0,12	0,10	1	
<b>Mn</b>	-0,01	-0,07	-0,05	-0,12	0,15	0,20	0,10	0,05	-0,10	0,10	0,07	0,32	0,28	1

Os valores em azul são significativos a 5%.

Tabela 40. Matriz de correlação para a profundidade 20 – 40 cm das variáveis geoquímicas e geofísicas.

	<i>K</i>	<i>U</i>	<i>Th</i>	<i>Argila</i>	<i>pH</i>	<i>Fósforo</i>	<i>Potássio</i>	<i>Matéria orgânica</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>
<b>K</b>	1													
<b>U</b>	0,15	1												
<b>Th</b>	0,03	<b>0,75</b>	1											
<b>Argila</b>	-0,07	0,04	-0,07	1										
<b>pH</b>	-0,08	-0,04	0,01	-0,04	1									
<b>Fósforo</b>	-0,13	-0,08	0,04	0,01	0,10	1								
<b>Potássio</b>	0,20	0,01	-0,01	0,02	0,09	-0,01	1							
<b>Matéria orgânica</b>	-0,02	0,11	0,18	0,19	0,02	0,13	0,0	1						
<b>Ca</b>	-0,05	-0,09	-0,06	0,10	-0,01	0,06	0,04	-0,05	1					
<b>Mg</b>	0,05	-0,03	-0,03	-0,02	-0,09	-0,05	-0,20	-0,14	-0,11	1				
<b>Cu</b>	-0,14	0,08	0,17	-0,05	0,09	0,06	0,00	-0,06	-0,07	-0,05	1			
<b>Zn</b>	-0,09	-0,08	-0,02	-0,03	0,14	<b>0,36</b>	-0,19	-0,02	0,00	0,18	0,01	1		
<b>Fe</b>	0,09	0,24	0,25	-0,07	0,12	0,06	0,08	0,18	-0,04	0,16	0,03	0,04	1	
<b>Mn</b>	0,09	0,14	-0,02	0,20	0,16	0,17	-0,03	0,01	0,18	0,21	0,22	0,09	0,20	1

Os valores em azul são significativos a 5%.

Nas tabelas 41 e 42, encontram-se os dados das análises fatoriais com rotação Varimax, cujo objetivo é encontrar eixos com o menor número possível de pesos altos e tantos pesos próximos de zero quanto possível. A análise fatorial é uma técnica de análise multivariada que tem por objetivo explicar a correlação entre um conjunto com grande número de variáveis em termos de um conjunto de poucas variáveis aleatórias chamadas de fatores (Johnson & Wichern, 1990; Clemente, 1990). Para as variáveis analisadas na profundidade de 0 – 20 cm, obteve-se 5 Fatores que são responsáveis por mais de 61% da variabilidade total. O número de fatores recomendável é aquele cujos autovalores sejam maior do que 1 (Kaiser, 1958).

Tabela 41. Rotação Varimax da análise fatorial para a profundidade de 0 – 20 cm.

<b>Fator</b>	<b>Fator 1</b>	<b>Fator 2</b>	<b>Fator 3</b>	<b>Fator4</b>	<b>Fator5</b>
<b>K</b>	0,17	-0,05	0,00	0,04	0,31
<b>U</b>	<b>0,95</b>	0,06	0,06	0,00	0,05
<b>Th</b>	<b>0,93</b>	-0,03	0,03	0,14	0,10
<b>Argila</b>	<b>0,94</b>	0,07	0,01	-0,04	0,06
<b>pH</b>	-0,05	0,06	0,06	0,13	<b>-0,72</b>
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,00	-0,12	-0,09	<b>0,77</b>	0,19
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,32	0,09	<b>0,65</b>	0,00	-0,38
<b>Matéria orgânica</b>	0,00	0,08	<b>-0,81</b>	0,09	-0,19
<b>Ca</b>	-0,06	0,33	0,12	0,08	0,52
<b>Mg</b>	-0,30	-0,02	-0,38	0,42	-0,04
<b>Cu</b>	0,05	0,09	-0,06	<b>0,67</b>	-0,06
<b>Zn</b>	-0,03	<b>-0,82</b>	-0,03	-0,12	0,19
<b>Fe</b>	-0,05	-0,36	-0,14	0,50	-0,30
<b>Mn</b>	-0,04	<b>-0,71</b>	-0,05	0,24	-0,17
<b>Autovalores</b>	2,99	1,87	1,34	1,25	1,10
<b>% Variação explicada</b>	21,38	13,37	9,60	8,94	7,86
<b>% Variação acumulada</b>	21,38	34,75	44,36	53,30	61,17

O Fator 1 que explica 21% da variabilidade total, tem como variáveis correlacionáveis o U o Th e a argila. Essa correlação deve-se possivelmente ao fato de que a área vem sendo cultivada a mais de cinco anos com cana-de-açúcar, cuja cultura recebe adubações maciças de N-P-K, bem como aporte significativo de gesso, cuja importância agrícola já foi comentada anteriormente. O Fator 2 encerra 13% da variabilidade total, cujas variáveis Fe e Mn se correlacionam; o Fator 3 com 9% da variabilidade, tem como variáveis correlacionáveis o K e a matéria orgânica; para o Fator 4 com 9% da variabilidade, mostra a correlação entre as variáveis fósforo e Cu e o Fator 5 com 7% de variabilidade, tem como variável principal o pH, cujos valores 7,2 e 7,1 estão próximos a faixa de neutralidade para ambas as profundidades (Tabela 33), são atribuídos aos teores de cálcio e magnésio adicionados pela incorporação de calcário dolomítico, o qual eleva a saturação de bases dos solos.



Tabela 42. Rotação Varimax da análise fatorial para a profundidade de 20 – 40 cm.

<b>Fator</b>	<b>Fator 1</b>	<b>Fator 2</b>	<b>Fator 3</b>	<b>Fator 4</b>	<b>Fator5</b>
<b>K</b>	0,08	-0,56	0,39	0,39	-0,17
<b>U</b>	<b>0,87</b>	-0,12	0,10	0,10	-0,04
<b>Th</b>	<b>0,89</b>	0,03	-0,04	0,09	0,08
<b>Argila</b>	0,01	0,04	0,03	<b>-0,75</b>	-0,20
<b>PH</b>	-0,06	-0,07	0,02	0,01	<b>0,68</b>
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-0,01	0,41	0,01	-0,25	0,50
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-0,05	<b>-0,72</b>	-0,11	-0,09	0,28
<b>Matéria orgânica</b>	0,38	0,12	-0,21	0,50	0,00
<b>Ca</b>	-0,21	-0,11	0,04	-0,49	0,08
<b>Mg</b>	-0,06	0,26	0,74	0,19	-0,24
<b>Cu</b>	0,18	0,07	-0,02	0,17	0,48
<b>Zn</b>	-0,10	0,58	0,26	0,03	0,32
<b>Fe</b>	0,41	-0,11	0,42	-0,02	0,25
<b>Mn</b>	0,04	-0,02	<b>0,64</b>	-0,40	0,32
<b>Autovalores</b>	2,05	1,74	1,40	1,03	1,23
<b>% Variação explicada</b>	14,70	12,44	10,02	9,50	8,78
<b>% Variação acumulada</b>	14,70	27,14	37,16	46,66	55,44

Com relação aos dados da profundidade de 20 – 40 cm com 5 Fatores, que são responsáveis por mais de 55% da variabilidade total. O Fator 1 tem como variáveis correlacionáveis U e Th, de forma analoga para a profundidade de 0 – 20 cm ou seja, os referidos radionuclídeos tem origem nas formulações dos adubos e do gesso adicionados ao solos, o mesmo ocorrendo para o Fator 2 que tem como variável principal o potássio oriundo das adubações na área de cana-de-açúcar. O Fator 4 destaca a argila e por último o Fator 5 tendo como variável principal o pH, que é influenciado pela adição de calcário dolomítico composto de Ca e Mg .

## 6. SÍNTESE DAS DISCUSSÕES

Esta pesquisa procurou investigar as inter-relações entre dados geofísicos e geoquímicos em duas áreas com atividades agrícolas diferentes localizadas no Noroeste do estado do Paraná, objetivando verificar o comportamento de elementos radioativos (K, U e Th) em solos argilosos, areno/argiloso e arenosos.

Métodos geofísicos como a gamaespectrometria e a resistividade aparente foram utilizados para quantificar os teores dos radionuclídeos em solos cultivados, áreas testemunhas, adubos, gesso e rocha e o método elétrico para o mapeamento de solos.

Observou-se que há um comportamento diferenciado dos radionuclídeos nos diferentes tipos de solos estudados, influenciados pela textura, matéria orgânica e mineralogia. Os solos argilosos retêm mais radionuclídeos, comparativamente aos arenosos.

Constatou-se que as menores concentrações de radionuclídeos mensurados nas áreas testemunhas, comprovam que a o aporte de fertilizantes à longo prazo, propicia o acúmulo de elementos radioativos nos solos, principalmente nos argilosos e naqueles com teores de matéria orgânica mais elevado.

A mineralogia e a matéria orgânica influenciam diretamente na adsorção de elementos radioagênicos, que concorrem com outros íons para fazer parte das estruturas dos minerais de argila, participando da troca catiônica, bem como pela adsorção nos bordos das estruturas cristalográficas.

Existe uma diferença de concentração de elementos radioativos nas formulações de adubos e gesso, o que conseqüentemente acarreta em aporte diferenciado de tais elementos nas áreas que os recebem, influenciadas pelo teor de argila, mineralogia e percentagem de matéria orgânica.

As maiores doses de radiação constatadas foram nos adubos, gesso, rocha, área cultivada e áreas testemunhas. As doses calculadas não são consideradas perigosas à saúde.

Verificou-se diversas correlações dos dados geofísicos com os geoquímicos. As mais significativas foram entre o urânio e matéria orgânica, urânio e argila, urânio e fósforo, urânio e cálcio e urânio, magnésio e urânio e pH. Entre o tório e pH, tório e fósforo, tório e matéria orgânica, tório e cálcio e tório e magnésio.

Pode-se dizer que é indissociável entender a presença e o comportamento de elementos radiogênicos em áreas agrícolas, sem estudar conjuntamente outras variáveis geoquímicas, principalmente a argila, a matéria orgânica e os minerais de argila.

Os valores de resistividade aparente dos solos argilosos foram maiores do que o areno-argiloso. A diferença de textura dos solos da Área 1 influenciado pela litologia, foram detectadas pela resistividade aparente, auxiliando na confecção do mapa de solos, comprovando que tal método geofísico pode ser uma ferramenta importante para mapear solos onde tem-se gradiente textural.

Observou-se correlações negativas entre a argila e a resistividade aparente, evidenciando que quanto maior o teor de argila e umidade do solos, maior é a facilidade com que a corrente elétrica transita por tal meio, ao contrário do solo mais arenoso, que impõe maior resistência à passagem da corrente.

Os valores de suscetibilidade magnética dos solos argilosos foram maiores do que a dos arenosos. Os solos oriundos da Formação Serra Geral apresentam maior concentração de minerais magnéticos.

## 7. CONCLUSÕES

As principais conclusões da pesquisa podem ser sumarizadas como segue:

### Área 1

Os solos Nitossolo Vermelho Eutrófico e Latossolo Vermelho Eutroférico de textura argilosa, retêm mais radionuclídeos do que o Latossolo Vermelho Distrófico;

Os teores de radionuclídeos são mais baixos nas áreas testemunhas, quando comparados com os tratos de atividade agrícola, denotando a contribuição dos fertilizantes fosfatados e do gesso no incremento dos teores nos solos cultivados;

Foram constatadas diferenças nos teores de radionuclídeos, em correspondência às formulações dos adubos, as quais se refletiram nas medidas gamaespectrométricas;

As maiores taxas de radioatividade foram constatadas na seguinte ordem: nos adubos, no gesso, na área com atividade antrópica e nas testemunhas;

As doses de radioatividade não oferecem riscos ao meio ambiente. No entanto deve-se continuar monitoramento o incremento dos elementos radioativos nos solos cultivados;

Constatou-se acúmulo dos radionuclídeos nos perfis dos solos;

Houve correlação positiva e significativa entre urânio e argila; urânio e matéria orgânica; urânio e pH; urânio e fósforo; urânio e cálcio; urânio e magnésio. Entre tório e pH; tório e fósforo; tório e cálcio; tório e magnésio. Correlação negativa entre resistividade elétrica e argila;

Os valores de resistividade variaram de 20 a 620 Ohm.m, verificando-se que as maiores magnitudes refletiram-se no solo mais arenoso, ao contrário dos argilosos;

A resistividade elétrica é uma ferramenta importante para auxiliar no mapeamento de solos, principalmente em áreas onde ocorrem variações nas texturas quanto aos teores de argila e areia. Embora o espaçamento entre os eletrodos tenha sido de apenas um metro objetivo do trabalho, aberturas maiores podem ser utilizadas para se obter a profundidade dos perfis dos solos. Também pode-se fazer arranjos com aberturas inferiores a 1 m, para discriminar os horizontes dos solos.

## **Área 2**

Houve diferenças nos teores dos radionuclídeos da área agrícola em relação à testemunha;

Constatou-se diferenças nos teores de radionuclídeos, em correspondência às formulações dos adubos, as quais se refletiram nas medidas gamaespectrométricas;

As maiores doses de radioatividade foram constatadas nos adubos, gesso, área com atividade antrópica e testemunhas respectivamente;

Assim como a Área 1, esta Área não apresenta doses radioativas preocupantes, embora o ideal fosse um monitoramento periódico dos solos e dos cursos d'água;

A queima da cana-de-acúcar antes da colheita propicia um decréscimo nos teores de matéria orgânica dos solos, e conseqüentemente contribui para a diminuição da capacidade de troca de cátions;

O fato dos solos serem de textura arenosa, acarretam menor retenção dos adubos e gesso, em função da maior porosidade e conseqüentemente propicia uma percolação no perfil dos solos tanto dos nutrientes constantes dos adubos e gesso, bem como dos radionuclídeos;

Como os solos são vulneráveis há erosão, observou-se que em partes da área a ocorrência de erosão laminar, contribuindo para o arraste dos adubos e do gesso e, conseqüentemente dos elementos radioativos. É possível que parte dos radionuclídeos estejam sendo carreados para os cursos d'água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A.M.; León, M. G.; Ivanovich, M. U and Th speciation in river sediments. **The Science of the Total Environment**, v. 173/174, p. 203–209, 1995.
- Alan, M.N.; Chowdhury, M.I.; Kamal, M.; Ghose, S.; Hamida Banu.; Chakraborty, D. Radioactivity in chemical fertilizers used in Bangladesh. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 48 n. 8, p.1165-1168, 1997.
- Almeida, J.A.; Kämpf, N.; Almeida, R. Caracterização mineralógica de cambissolos originados de rochas pelíticas nos patamares do alto rio Itajaí e no planalto de Lages (SC). **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p.181-190, 1997.
- Arnold, T.; Zorn, T.; Bernhard, G.; Nitsche, H. Sorption of uranium(VI) onto phyllite. **Chemical Geology**, v.151, p.129-141, 1998.
- Arya, A.P. **Fundamentals of nuclear Physics**. Boston: Allyn and Bacon Inc, 1966.
- Baixeras, C.; Erlandsson, B.; Font L.; Jonsson G. Radon emanation from soil samples. **Radiation Measurements**, v. 34 p. 441-443, 2001.
- Banton, O.; Seguin, M.K.; Climon, M.A. Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity. **Soil Science Society of Journal**, v. 61, p.1010-1017, 1997.
- Barisic, k D.; Lulic, S.; Miletic, P. Radium and uranium in phosphate fertilizers and their impact on the radioactivity of waters, **Water Res.** v. 26 n. 5, p. 607-611. 1992.
- Barretto, P.M.C.; Austerlitz, C.; Malheiros, T.; Lovborg, L. **Radioactive concrete sources at IRD/CNEN, Brazil, for the calibration of uranium exploration and environment field instruments**. Relatório IRD/DEX-3/CNEN, 66. 1986.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p.105-112, 1997.
- Bittencourt, A.V.L. **Sólidos hidro transportados na bacia hidrográfica do Rio Ivaí: aplicação de balanços hidrogeoquímicos na compreensão da evolução de processos da dinâmica externa**. São Paulo, 1978. 201p. (Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo).
- Bittencourt, A.V.L. Transporte de sólidos na bacia hidrográfica do Rio Ivaí. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 35 p.1-54, 1982.
- Bolivar, J.P.; Tenório, R.G.; León, G. Fluxes and distribution of natural radionuclides in the production and use of fertilizers. **Applied. Radiation and Isotopes**, v. 46, n.6/7, p.717-718. 1995.

Borovec, Z. The adsorption of uranyl species by fine clay. **Chemical Geology**, v.32, p.45-58, 1981.

Boyle, R.U. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. **Developments in economic geology**, n.16, p. 71-78, 1982.

Brady, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. p.647 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, 1979.

Braga, A.C.O. 2002. **Métodos Geométricos Aplicados – Módulo Hidrogeologia (material didático)**. In: [www.rc.unesp.br/](http://www.rc.unesp.br/) ou [acobraga@rc.unesp.br](mailto:acobraga@rc.unesp.br);

Celi, M.; Schnitzer, M.; Négre, M. Analysis of carboxyl groups in soil humic acids by a wet chemical method, fourier-transform infrared spectrophometry, and solution-state carbon-13 nuclear magnetic resonance. A comparative study. **Soil Science**, Baltimore, v.162, p.189-196, 1997.

Clemente, A. **Pesquisas de variáveis múltiplas**. Scientia et Labor, 204 p, 1990.

Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS-NRS). Núcleo Regional Sul. 2004. **Manual de adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 1 ed. Porto Alegre, SBCS-NRS, 2004. 400p.

Corwin, D. L.; Rhoades, J.D. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. **Soil Science Society of América Journal**, v. 48, n. 288-291, 1984.

Curi, N. **Relações genéticas e geomórficas em solos das encostas inferior e superior do Nordeste no Rio Grande do Sul. Porto Alegre**. 1975, 134p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

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

Dowdall, M.; O’Dea, J.  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  disequilibrium in an upland organic soil exhibiting elevated natural radioactivity. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 59 p. 91-104, 2002.

Echevarria, G.; Sheppard, M.I.; Morel, J.L. Effect of pH on the sorption of uranium in soils. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 53 n. 2, p.257-264, 2001.

El-Arabi, A.M.; Khalifa, I.H. Application of multivariate statistical analyses in the interpretation of geochemical behaviour of uranium in phosphatic rocks in the Red Sea, Nile Valley and Western Desert, Egypt. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 61, p.169-190, 2002.

Embrapa, SNLCS. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Curitiba, 1984. 413p. (Boletim Técnico, 57).

Fernandes, L.A.; Coimbra, A.M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p.164-176, 1994.

Fernandes, L.A.; Coimbra, A.M. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (neocretáceo). **Revista brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p.723-734, 2000.

Ferreira, F. J. F.; Riffel, S. B.; Forlin, M.; Guimarães, G. B. **Gamaespectrometria do Granito do Carambeí** – PR. *In: 7<sup>th</sup> Internacional Congress of the Brazilian Geophysical Society* (2001: Salvador). CDROM, Salvador, Bahia, Brazil.

Ferreira, F.J.F., Flexor, J.M.; Guimarães, G.B. **Síntese da calibração do gamaespectrômetro GS-512 do LPGA/UFPR no IRD-CNEN**, 2003.12p. (relatório inédito).

Figueiredo, O.A.R. **Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um Latossolo Bruno**. Porto Alegre, 1985. 74p. (Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Porto Alegre).

Ford, R.G.; Berstsch, P.M.; Farley, K.J. Changes in transition and heavy metal partitioning during hydrous iron oxide aging. **Environ. Sci. Technol**, v. 31, p.2028-2033, 1997.

Fukue, M.; Minato, T.; Horibe, H.; Taya, N. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. **Engineering Geology**, n.54, p.43-53, 1999.

Gallas, J.D. **Principais métodos geofísicos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia de engenharia e geologia ambiental**. Rio Claro, 2000. 172 p. Tese (Doutorado em Geociências) – UNESP.

Galhego, H.R.; Espíndola, C.R. Mineralogia da argila de solos desenvolvidos de produtos de alteração de rochas eruptivas básicas em Botucatu (SP). **Revista brasileira de Ciência Solo**. v. 3, p. 131-135, 1979.

Geofyzika. Portable Gamma-Ray Spectrometer (GS-512), **Instruction Manual**, Brno Version 2.00, Czech Republic, 1998. 77p.

Gert, J. Unit-cell dimensions of pure and trace metal-associated goethites. **Geochimica Cosmochimica Acta**, v. 64, p.363-371, 1990.

Giblin, A.M.; Batts, B.D.; Swaine, D.J. Laboratory simulation studies of uranium mobility in natural waters. **Geochimica Cosmochimica Acta**, v. 45, p. 699-709, 1981.

Gimenez, A.F.; Pires Neto, A.G.; Ricomini, C. **Mapeamento geológico do bloco SF-22T (ACS-33)**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1983, 69p. (relatório 14845).

Giongo, V. **Alumínio em sistemas de culturas no plantio direto**. Porto Alegre, 1997. 90p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

Grenthe, I.; Fuger, J.; Konings R.; Lemire, R.J; Muller, A.B.; Wanner, J. **The Chemical thermodynamics of uranium**. 1992. Elsevier.

Guimond, R.J. **The Radiological aspects of fertilizer utilization**. Radioactivity in Consumer Products, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, p. 380-392, 1978.

Guimond, R.J.; Hardin, J. M. Radioactivity released from phosphate containing fertilizers and from gypsum. **J. Radiat. Appl. Instrum. Radiat. Phys. Chem.**, v.34, n.2, p. 369-315, 1989.

Gunn, R.H. A soil catena on weathered basalt in Queensland, **Aust. J. Soil Res.**, 12:1-14, 1974.



Hansen, D. AA. Geological applications. Manual for Portable Gamma-ray Spectrometers. Toronto, Exploranium G.S Limited, 87p, 1975.

Hermamo, H.; Landsberger, S.; Harbotile, G., Panno, S. Studies of radioactivity and heavy metals in phosphate fertilizer. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* v.194, p.331-336, 1995.

Iapar. **Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina, 1978. 41 p.

Ibrahim, N. Determination of natural radioactivity in fertilizers by gamma ray spectroscopy. **Radiat. Phys. Chem**, v. 51, n. 621, p.4-6, 1998.

Johnson, R.A.; Wichern, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hala, 1990. 607 p.

Kaiser, H.F. The varimax criteria for analytical rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, p.186-200, 1958.

Kampf, N. & Klamt, E. Mineralogia e gênese de Latossolos (Oxisols) e solos Podzólicos da região nordeste do Planalto Sul-Riograndense. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p.68-73, 1978.

Kannan, V.; Rajan, M.P.; Iyengar M.A.A.R.; Ramesh R. Distribution of natural and anthropogenic radionuclides in soil and beach samples of Kalpakkam (Índia) using hyper pure germanium (HPGe) gamma ray spectrometry. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 57, p.109-119, 2002.

Kaplan, I. **Física nuclear**. In: Radioatividade natural e as leis da transformação radioativa. 1ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1978. p.194.

Khan, K.; Khan, M.; Tufail, M.; Khatibeth, A.J.A.H.; Ahmad, N. Radiometric analysis of Hazara phosphate rock and fertilizers in Pakistan. **J. Environ. Radioactivity**, v. 38, n.1, p.77-84, 1998.

Killeen, P.G. **Gamma ray spectrometry methods in uranium exploration – Application and interpretation. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores**. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, v. 31, p.163-229, 1979.

Kilislioglu, A. The effect of various cations and pH on the adsorption of U(VI) on Amberlite IR-118H resin. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 58, p.713-717, 2003.

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

Kumru, M.N.; Bakaç, M. R-mode factor analysis applied to the distribution of elements in soils from the Aydin basin, Turkey. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 77, p. 81-91, 2003

Lin, Y.M.; Lin, P.H.; Chen, C.J.; Huang, C.C. Measurement of terrestrial gamma radiation in Taiwan, Republic of China, **Health Physics**, v. 52, n. 6, p.805-811, 1987.

Lindsay, W.L.; Frazier, A.W.; Stephenson, H.F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, p. 446-552, 1962.

Lopes, A.S. **Solos sob “Cerrado”: Características, propriedades e manejo**: Instituto da Potassa & Fosfato. 162p. 1983.

- Lopes, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. POTAFOS. 177p. 1998.
- Malavolta, E. **Manual de química agrícola**. Ed. Ceres Ltda. 527 p. 1976.
- Malavolta, E. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato: Instituto Internacional da Potassa, 224p. 1981.
- Marques, L.S. Rare elements. In: Piccirillo, E.M.; Melfi, A. J. **The Mesozoic flood Volcanism of The Paraná Basin**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988. p.499-504.
- Martinez, C.E.; McBride, M;B. Co-precipitates of Cd, Cu, Pb and Zn in iron oxides: Solid phase transformations and metal solubility after aging and thermal treatment. **Clay Clay Min**, v. 46, p. 537-545, 1998.
- Mazzilli, B.; Palmiro, V.; Saueia, C.; Nisti, M.B. Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 49, p.113-122, 2000.
- McAulay, I.R.; Moran, C. Natural radioactivity in soil in republic of Ireland. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 24, p. 47-49, 1983.
- McBride, M.B. **Environmental chemistry of soils**. Oxford University Press, 1994. 406p.
- McBride, R. A.; Gordon, A. M.; Shrive, S. C. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, p. 290-293. 1990.
- Mckinley, J.P.; Zachara, J.M.; Turner, G.D. The influence of uranyl hydrolysis and multiple site-binding. **Clay and Clay Minerals**, v. 43, p. 586-598. 1995.
- Melo, V.F.; Novais, R. F.; Schaefer, C.E.G.R.; Fontes, M.P.F.; Singh, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo Barreiras no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 29-41, 2002.
- Mendonza, H.N.S., Lima, E., Anjos, L.H.C, Silva, L.A., Ceddia, M.B., Antunes, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 201-207, 2000.
- Minty, B.R.S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n.2, p. 39-50, 1997.
- Moraes, M.H. **Discriminação de horizontes e de unidades-de-solo e sua ordenação numa topossequência proveniente de rochas eruptivas básicas**. Piracicaba, 1992, 153p. (Tese de Doutorado – Esalq/USP).
- Morrison, S.J.; Spangler, R.R.; Tripathi, V.S. Adsorption of uranium (VI) on amorphous ferric oxyhydroxide at high concentrations of dissolved carbon (IV) and sulfur (VI). **Journal of Contaminant Hydrology**, v.17, p. 347-363. 1995.
- Moyses, L.N.; Parkman, R. H.; Charnock, D.J.; Livens, F. T.; Hughes, C.R.; Braithwaite, A. Uranium uptake from aqueous solution by interaction with goethite, lepidocrocite, muscovite and

- mackinawite: An x-ray absorption spectroscopy study. **Environ. Sci. Technol**, v. 34, p.1062-1068, 2000.
- Nadler, A.; Frenkel, H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four electrode method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p.1216-1221, 1980.
- Nascimento, C.T.C. **Resistividade elétrica e radiação gama natural no estudo de solos sob cerrado nativo**. Brasília, 2003. 115p. (Tese de Doutorado – Universidade de Brasília).
- Nascimento, C.T.C.; Ferreira, F.J.F. **Relatório das medições gamaespectrométricas e de resistividade elétrica realizadas na área do projeto carbonatito**. Relatório inédito. 28p. 2003.
- Nascimento, C.T.C.; Pires, A.C.B.; Moraes, R.A.V. Reconhecimento de solos por meio de resistividade elétrica e radiação gama. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n.3, p.383-392, 2004.
- Navas, A.; Soto, J.; Machin, J.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  activities in soil profiles of the Flysch sector (Central Spanish Pyrenees). **Applied Radiation and Isotopes**, v. 57, (4) p.579-589, 2002.
- Nuernberg, N.J.; Rech, T.D.; Basso, C. **Usos do gesso agrícola**. Florianópolis: Epagri, 2002. 31p. Boletim Técnico, 122.
- Ogunleye, P.O.; Mayaki, M.C.; Amapu, I.Y. Radioactivity and heavy metal composition of Nigerian phosphate rocks: possible environmental implications. **Environmental Radioactivity**, v. 62, p.39-48, 2002.
- Paschoa, A.S.; Mafra, O.Y.; Cardoso, D.O.; Rocha, A.C.S. Application of SSNTD to the Brazilian phosphate fertilizer industry to determine uranium concentrations. **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v.8, n. 1-4, p.469-472, 1984.
- Pfister, H.; Philipp, G.; Paul, Y.H. Population dose from natural radionuclides in phosphate fertilizers. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 13, p. 247-261, 1976.
- Prado, H. **Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação e levantamento**. 2.ed. revisada e ampliada. 220p. 2001.
- Raij, B.V. Avaliação da fertilidade do solo. Instituto da Potassa & Fosfato. 1983. 142p.
- Rebelo, A.M.A. **Processos supergênicos na distribuição de radônio em paisagens tropicais úmidas**. Curitiba. 2000. 209p. (Tese de Doutorado – Universidade Federal do Paraná).
- Resende, M.; Curi, N.; Resende, B. S.; Corrêa, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 1995. 304p.
- Ribeiro, F.B.; Carlos, D.U.; Hiodo, F.Y.; Strobino, E.F. A Least squares procedure for calculating the calibration constants of a portable gamma-ray spectrometer. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 113, no. 3, 251-256, 2005.
- Righi, S.; Betti, M.; Bruzzi, L.; Mazzotti, G. Monitoring of natural radioactivity in working places. **Microchemical Journal**, v. 67, p.119-126, 2000.

- Ring, R.J. Recovery of byproduct uranium from the manufacture of fosfatic fertilizers. **Atomic Energy**, p.12-20, 1977.
- Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M.; Atangana, Q.Y. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. **Journal Appl. Geoph.** v. 34, p.237-253, 1996.
- Romesburg, H.C. **Cluster analysis for researchers**. California. Lifetime Learning Publications, 1984. 334p.
- Rothbaum, H.P.; McGaveston, D.A.; Wall, T.; Johnston, A.E.; Mattingly, G.E.G. Uranium accumulation in soils from long-continued applications of superphosphate. **Journal of Soil Science**, v.30, n.1, 147-153, 1979.
- Rufino, R.L.; Biscaia, R.C.M.; Merten, G.H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná, através de pluviometria: Terceira aproximação. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.439-444, 1993.
- Salet, R.L.; Anghinoni, I.; Kochhann, R.A. Atividade do alumínio na solução do solo do sistema de plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, p.9-1, 1999.
- Sample, E.C.; Soper, R.J.; Racs, G.J. **Reactions of phosphate fertilizers in soil**. In: Khasawneh, F.E.; Sample, E.C., eds. The role of phosphorus in agriculture. Madison, cap. 11, p.253-310. 1980.
- San, A.K.; Ahamed, M. M. O.; El Khangi F. A.; El Nigumi, Y.O.; Holm, E. Radiological and chemical assesment of Uro and Kurun rock phosphates. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 42, p. 65-75, 1999.
- San Miguel, E.G.; Pérez-Moreno, J.P.; Bolívar, J.P.; García-Tenório, R. Validation of isotope in sediments affected by anthropogenic inputs from uranium series radionuclides. **Environmental Pollution**, v. 123, p.125-130, 2003.
- Sanyal, S.K.; DeDatta, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Adv. Soil Sci.** New York, v. 16, p2-120, 1991.
- Santos, G.A.; Camargo, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Editores – Porto Alegre: Genesis, 1999. 508p.
- Selvasekarapandian, S.; Sivakumar, R.; Manikandan, N.M.; Meenakshisundaram, V.; Raghunath, V.M.; Gajendran, V. Natural radionuclide distribution in soils of Gudalore, Índia. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 52, p.299-306, 2000.
- Shainberg, I.; Rhoades, J.D.; Prather, R.J. Effect of exchangeable sodium percentage, cation exchange capacity, and soil solution concentration on soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p.469-473, 1980.
- Sharpley, A.N.; Singh, U.; Uehara, G.; Kimble, J. Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 53, p. 153-158, 1989.
- Sheriff, R. E. **Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Third Edition, 384p. 1999.

Shenber, M.A. Measurement of natural radioactivity levels in soil in Tripoli. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 48, n.1, p.147-148, 1997.

Snedecor, G.W. & Cochran, W.G. **Statistical methods**. 6.ed. Ames, Iowa State University Press, 1967, 593p.

Spalding, R.F.; Exner, M.E. Temporal uranium variations in the Brazos river. **Radioecology and Energy Resources**. p. 230-233, 1976.

Souza, J.L. **Anomalias aerogamaespectrométricas (K, U e Th) da quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatados**. Curitiba, 1998. 197p. (Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná).

Souza, J.L.G. **Estudo da fração argila da Terra Roxa Estruturada do Município de Botucatu para fins de gênese e classificação de solos**. FCMBB, UNESP, Botucatu, 73p. 1973 (Tese de Doutorado).

Sroor, A.; El-Bahi, S.M.; Ahmed, F.; Abdel-Haleem, A.S. Natural radioactivity and radon exhalation rate of soil southern Egypt. **Appl. Radiat. Isotopes**. 55:873-879, 2001.

Tedesco, J.M.; Gianello, C.; Bissani, C. A.; B. Humberto.; Volkweiss, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, 1995. 174p. (Boletim técnico n. 5).

Telford, W.M., Geldart L.P., Sheriff, R.E.; Keys, D.A. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press. 860 p. 1985.

Theng, B.K.G.; Tate, K.R.; Sollins, P. **Constituents of organic matter in temperature and tropical soils**. In: Coleman, D. C. et al. (Eds.) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Honolulu: NIPTAL Project, 1989. p.5-32.

Tieh, T.T.; Ledger, E.B.; Lind, B. Release of uranium from granitic rocks during in situ weathering and initial erosion (central Texas). **Chemical Geology**, v. 29, p.227-248, 1980.

Tomé, F. V.; Rodríguez, P. B.; Lozano, J.C. Distribution and mobilization of U, Th and <sup>226</sup>Ra in the plant-soil compartments of a mineralized uranium area in south-west Spain. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 59 p.41-60, 2002.

Tzortis, M.; Tsertos H. Determination of thorium, uranium and potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 77, p. 325-338, 2004.

Velloso, A.C.X.; Santos, G.A.; Ramos, D.P. Capacidade de troca de cátions e adsorção de fosfato de solos sob vegetação de Cerrado do Amapá. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, p.27-32, 1982.

Vieira, L.S. **Manual da ciência do solo**. São Paulo. Ed. Agronômica Ceres, 1975. 464p.

Vieira, L.S.; Santos, P.C.T.; Vieira, M.N.F. **Solos: propriedade, classificação e manejo**. Brasília, MEC/ABEAS, 1988. 154p.

Viers, J.; Dupré, M.; Polvé, M.; Schott, J.; Dandurand, J.L.; Braun, J.L. Chemical weathering in the drainage basin of a tropical watershed (Nsimi-Zoetele site, Cameroon): comparison between organic-poor and organic-rich waters. **Chemical Geology**, v.140, p.181-206, 1997.

Vucic, N.; Ilic, Z.. Extraction and spectrophotometric determination of uranium in phosphate fertilizers. **J. Radioanal. Nucl. Chem.** v. 129, p. 113-120. 1989.

Waite, T. D.; Davis, J.A.; Payne, T. E.; Waychunas, G.A.; Xu, N. Uranium adsorption to ferrihydrite: Application of a surface complexation model. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v. 58, p. 5465-5478. 1994.

Weijden, C.H.; Weijden, R.D. Mobility of major, minor and some redox-sensitive trace elements and rare-earth elements during weathering of four granitoids in central Portugal. **Chemical Geology**, v.125, p.149-167, 1995.

Wilford, J. R.; Bierwirth, P. N.; Craig, M. A. Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, p.201-216, 1997.

Yamazaki, I.M.; Geraldo, L. P. Uranium content in phosphate fertilizers commercially produced in Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 59, p. 133-136, 2003.

Yu, K.N.; Guan, Z.J.; Stokes, M.J.; Young, E.C.M. The assessment of the natural radiation dose committed to the Hong Kong people. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 17, p. 31-48, 1992.

Zielinski, R.A.; Bolinder, S.A.; Méier, A.L.; Jonhson, C.A.; Szabo, B.J. Natural or fertilizer-derived uranium in irrigation drainage: a case study in southeastern Colorado, USA. **Applied Geochemistry**, v.12, p. 9-21, 1997.

Zielinski, R.A.; Simmons, K. R.; Orem W.H. Use of  $^{234}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  isotopes identify fertilizer-derived uranium in the Florida Everglades. **Applied Geochemistry**, v. 15, p. 369-383, 2000.