

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM GEOGRAFIA

Maíra Lopes Nogueira

**Dinâmica da água em subsuperfície na bacia do
córrego do Quebra, Gouveia, Espinhaço Meridional,
Minas Gerais**

Minas Gerais, Brasil
Maio de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Maíra Lopes Nogueira

**Dinâmica da água em subsuperfície na bacia do córrego do Quebra,
Gouveia, Espinhaço Meridional, Minas Gerais**

Dissertação apresentada ao Colegiado de Pós-Graduação de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Orientadora: Profa. Dra. Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin

Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Antunes Aranha

Belo Horizonte, Minas Gerais
Instituto de Geociências da UFMG
Maio de 2008

Dissertação defendida em 05 de maio de 2008 e aprovada pela Banca Examinadora
constituída por:

Profa. Dra. Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin - Orientadora - UFMG

Prof. Dr. Paulo Roberto Antunes Aranha - Co-Orientador - UFMG

Profa. Dra. Vilma Lúcia Macagnan Carvalho - UFMG

Prof. Dr. Fernando de Moraes - UFT



Aos meus pais, sem os
quais não seria possível...



“...os amantes da verdade não temem águas tempestuosas ou turvas.

O que tememos são águas rasas!”

F. Nietzsche

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Cristina Augustin, por fazer nascer em mim o gosto pela Geografia e por fazer crescer em mim o gosto pela Geomorfologia. Agradeço por me ensinar a “fuçar” a biblioteca e pela liberdade que me fez aprender a “correr atrás”!

Ao meu co-orientador PAI Aranha, por tudo!

É difícil escrever a importância do Paulo, então vou resumir o tanto de motivos pelos quais eu o agradeço: pelos ensinamentos, pelo gosto de pesquisar, pelos puxões de orelha, pela mão estendida e pela mão-aberta, pela confiança, pelos elogios e pelas críticas, pelas confissões mútuas, por ser amigo, por acreditar em mim!

“Quando a gente gosta, é claro que a gente cuida”.

À Fapemig, pelo auxílio financeiro dado por meio do projeto “Utilização Integrada de Métodos Geofísicos e Dados Geológicos/Gemorfológicos/Geotécnicos no Estudo de Escorregamentos na Região de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG”.

Aos membros das bancas prévia e final pelas contribuições à pesquisa.

Ao Seu João, o simpático dono das terras sobre as quais foi feita a pesquisa.

Aos tantos estudantes que me ajudaram em campo e tornaram o difícil parecer mais fácil (obrigada pelas boas risadas e companheirismo!) São eles: da Geografia: Luiz Felipe “Lufe”, Álvaro “Maninho”, Fred “Goiano”, Rodrigo Ádamo (ajuda também com discussões e ótimo material pra leitura); da Engenharia de Minas: Jadir “Verbo” e seu amigo Luquinhas; da Geologia (por ordem de aparição): Rodrigo Penna, Luis Fernando “Tox”, Henrique “Furão”, Daniel Gradin, Taylor, Christiano Nogueira (ajuda também com a análise das curvas de tensão), Bruno “Baiano”, Tati Mascarenhas, Irã, Ramayana, Juliana, Juni, Mariáh (Eletro, Surfer e Res2dinv na veia! Obrigada minina!), Joana, Matheus “Alemão”, Humberto “Broz”, Daniel Galvão, Lucas “Sequestrado”, Natércia, Marcos “Calouro da Física” e Fred Almeida. Agradeço também aos trabalhadores de campo de Gouveia: Sérgio, Nona, Preto, Marcineli, Jorge e Edibelton (o Seu Moço), e o camarada Eduardo, que os contactava e emprestava ferramentas.

Aos que me ajudaram fora de campo: Léo Rocha – doutorando em Geografia, com discussões e materiais diversos; Charles – da Engenharia Civil, que não mediu esforços para tratar da complicação dos pontos de GPS e estação total; Fernando Moraes – doutor em Geografia e membro da banca final, com conversas, dicas e essencial material de leitura; Luiz Felipe, que com muito capricho elaborou mapas e figuras; Ricardo C. Henrique, do Laboratório de Geomorfologia, e a professora Giovana Parizzi, da Geologia – além do carinho e da atenção, Gigi emprestou seus “precious” tensiômetros!

Aos tantos colegas do mestrado, com entrada em 2005, 2006 e 2007, por compartilhar dessa experiência, tornando-a menos árdua.

À minha mummy Ângela, meu daddy José Marcos e minha sister Jay, base de tudo na minha vida, a quem eu quero sempre orgulhar. Vocês são minha motivação!

À Pantufa, que nunca saiu do meu lado, nem depois que sua hora chegou.

À minha família dos dois lados: vó, vô, padrinho, madrinha, tios, tias, primos e primas!

Às Miguitas, Dorianas e Creusas, que mesmo não tão de perto da dissertação propriamente dita, sempre “estavam ali”, na torcida.

Ao computador de casa, que não me deixou na mão uma vez sequer!

A todos que não citei, mas que sei que torceram pelo meu sucesso!

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução	1
1.2 - Objetivos	3

CAPÍTULO 2 - ESTUDO DA INTERAÇÃO ÁGUA-SOLO

2.1 - Movimentação da Água no Solo	6
2.1.1 - Conceitos Energéticos da Água no Solo	7
2.2 - Fatores Condicionantes da Infiltração e Percolação da Água no Solo	9
2.2.1 - Condicionantes Climáticos	9
2.2.2 - Cobertura Vegetal	10
2.2.3 - Condicionantes Geomorfológicos.....	12
2.2.4 - Condicionantes do Solo.....	14
2.3 - Métodos Utilizados na Avaliação do Comportamento do Fluxo Subsuperficial ..	18
2.3.1 - A Tensiometria na Coleta de Dados Sobre o Comportamento da Água no Solo	18
2.3.2 - Os Métodos Geofísicos Utilizados e suas Aplicações	19
2.3.2.1 - O Método Georadar	20
2.3.2.2 - O Método de Eletrorresistividade	22
2.3.3 - O Uso de Traçadores na Avaliação do Fluxo Subsuperficial	23

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 - Localização do Município de Gouveia	26
3.1.1 - Localização da Vertente Investigada	26
3.2 - Rede Hidrográfica	28
3.3 - Caracterização Climática	29
3.4 - Características da Vegetação Local	32
3.5 - Inserção Geológica Regional	33
3.5.1 - Geologia da Bacia do Córrego do Quebra	35
3.6 - Contexto Geomorfológico Local	37
3.6.1 - Aspectos Geomorfológicos da Bacia do Córrego do Quebra	40
3.7 - Características dos Solos da Região	42

3.7.1 – Características dos Solos da Vertente Estudada	44
--	----

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 – Introdução à Metodologia: Escolha de Parâmetros	47
4.1.1 – Revisão Bibliográfica e Escolha da Área de Estudo	47
4.1.2 – Escalas Espaciais Investigadas	48
4.1.3 – Escala Temporal Investigada	49
4.2 – Atividades Desenvolvidas em Campo	51
4.2.1 – Medição da Densidade de Cobertura Vegetal	52
4.2.2 – Medição da Cobertura de Superfície	54
4.2.3 – Instalação das Estações em Cruz	55
4.2.4 – Aplicação da Solução Salina e Colorimétrica	56
4.2.5 – Obtenção de Perfis de Eletrorresistividade	57
4.2.6 – Obtenção de Perfis por Georadar	62
4.2.7 – Medidas de Tensiometria	66
4.2.8 – Abertura das Trincheiras para Observação do Traçador Azul	69
4.2.9 – Amostragem de Solo	72
4.3 – Tratamento dos Dados	72

CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – Vegetação e Solo	74
5.1.1 – Parcela da Alta Vertente	74
5.1.2 – Parcela da Média Vertente	76
5.1.3 – Discussão dos Dados de Solo	80
5.2 – Tensiometria	80
5.2.1 – Discussão da Tensiometria	83
5.3 – Eletrorresistividade	85
5.3.1 – Parcela da Alta Vertente no Início do Período Chuvoso	85
5.3.2 – Parcela da Média Vertente no Início do Período Chuvoso	89
5.3.3 – Discussão dos Dados de Eletrorresistividade	92
5.4 – Georadar	93
5.4.1 – Dados do Início do Período Chuvoso	94
5.4.1.1 – Discussão dos Dados de GPR do Início do Período Chuvoso ..	101
5.4.2 – Dados do Final do Período Chuvoso	101

5.4.2.1 - Discussão dos Dados de GPR do Início do Período Chuvoso ..	107
5.5 - Traçador Colorimétrico	107
5.5.1 - Parcela da Alta Vertente.....	107
5.5.1.1 - Início do Período Chuvoso.....	108
5.5.1.2 - Final do Período Chuvoso.....	112
5.5.2 - Parcela da Média Vertente	117
5.5.2.1 - Início do Período Chuvoso.....	118
5.5.2.2 - Final do Período Chuvoso.....	122
5.5.3 - Discussão dos Dados do Traçador Colorimétrico	127
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	
.....	132
CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXOS	
ANEXO A.....	148
ANEXO B	149
ANEXO C.....	151
ANEXO D.....	154

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Diagrama esquemático de um sistema Georadar	21
FIGURA 2.2 - Diagrama esquemático de um corte de perfil para visualização do traçador.....	24
FIGURA 2.3 - Padrão de coloração do solo em resposta aos tipos e processos de fluxo e às feições do solo	24
FIGURA 3.1 - Localização do município de Gouveia em Minas Gerais.....	26
FIGURA 3.2- Localização das parcelas na vertente estudada.....	27
FIGURA 3.3 - Mapa da rede hidrográfica local: bacia do ribeirão do Chiqueiro.....	28
FIGURA 3.4 - Mapa geológico regional.....	34
FIGURA 3.5 - Mapa geológico local.....	36
FIGURA 3.6 - Mapa hipsométrico da bacia do ribeirão do Chiqueiro.....	38
FIGURA 3.7 - Mapa de solos da bacia do ribeirão do Chiqueiro.....	43
FIGURA 3.8 - Perfil de solos da vertente de estudo, com localização das parcelas experimentais.....	46
FIGURA 4.1 - Esquema representativo da disposição dos eletrodos no arranjo “Cacau”	61
FIGURA 4.2 - Esquema representativo da obtenção de um perfil por CMP	64
FIGURA 4.3 - Esquema representativo dos cortes de perfil de solo	70
FIGURA 5.1 - Perfil base de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso	86
FIGURA 5.2 - Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 4 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa.....	86
FIGURA 5.3 - Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 20 horas após a aplicação da solução aquosa	87
FIGURA 5.4 - Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 43 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa.....	87
FIGURA 5.5 - Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 7 dias e 3 horas após a aplicação da solução aquosa	88
FIGURA 5.6 - Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 13 dias e 22 horas após a aplicação da solução aquosa.....	88

FIGURA 5.7 – Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 27 dias e 23 horas após a aplicação da solução aquosa	89
FIGURA 5.8 – Perfil base de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso	89
FIGURA 5.9 – Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 3 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa.....	90
FIGURA 5.10 – Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 23 horas após a aplicação da solução aquosa	90
FIGURA 5.11 – Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 8 dias e 1 hora após a aplicação da solução aquosa.....	91
FIGURA 5.12 – Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 15 dias após a aplicação da solução aquosa.....	91
FIGURA 5.13 – Perfis perpendiculares no início do período chuvoso na alta vertente..	95
FIGURA 5.14 – Perfis paralelos no início do período chuvoso na alta vertente	96
FIGURA 5.15 – Perfis perpendiculares no início do período chuvoso na média vertente	98
FIGURA 5.16 – Perfis paralelos no início do período chuvoso na média vertente.....	99
FIGURA 5.17 – Perfis perpendiculares no final do período chuvoso na alta vertente..	102
FIGURA 5.18 – Perfis paralelos no final do período chuvoso na alta vertente	103
FIGURA 5.19 – Perfis perpendiculares no final do período chuvoso na média vertente.....	105
FIGURA 5.20 – Perfis paralelos no final do período chuvoso na média vertente.....	106
FIGURA 5.21 – Perfis de cortes perpendiculares pequenos na alta vertente no início do período chuvoso	108
FIGURA 5.22 – Perfis de cortes paralelos pequenos na alta vertente no início do período chuvoso	109
FIGURA 5.23 – Perfis de cortes perpendiculares grandes na alta vertente no início do período chuvoso	110
FIGURA 5.24 – Perfis de cortes paralelos grandes na alta vertente no início do período chuvoso.....	111
FIGURA 5.25 – Visualização tridimensional da cruz da alta vertente no início do período chuvoso	112
FIGURA 5.26 – Perfis de cortes perpendiculares pequenos na alta vertente no final do período chuvoso	113

FIGURA 5.27 – Perfis de cortes paralelos pequenos na alta vertente no final do período chuvoso.....	114
FIGURA 5.28 – Perfis de cortes perpendiculares grandes na alta vertente no final do período chuvoso	115
FIGURA 5.29 – Perfis de cortes paralelos grandes na alta vertente no final do período chuvoso.....	116
FIGURA 5.30 – Visualização tridimensional da cruz da alta vertente no final do período chuvoso	117
FIGURA 5.31 – Perfis de cortes perpendiculares pequenos na média vertente no início do período chuvoso	118
FIGURA 5.32 – Perfis de cortes paralelos pequenos na média vertente no início do período chuvoso	119
FIGURA 5.33 – Perfis de cortes perpendiculares grandes na média vertente no início do período chuvoso	120
FIGURA 5.34 – Perfis de cortes paralelos grandes na média vertente no início do período chuvoso	121
FIGURA 5.35 – Visualização tridimensional da cruz da média vertente no início do período chuvoso	122
FIGURA 5.36 – Perfis de cortes perpendiculares pequenos na média vertente no final do período chuvoso	123
FIGURA 5.37 – Perfis de cortes paralelos pequenos na média vertente no final do período chuvoso	124
FIGURA 5.38 – Perfis de cortes perpendiculares grandes na média vertente no final do período chuvoso	125
FIGURA 5.39 – Perfis de cortes paralelos grandes na média vertente no final do período chuvoso	126
FIGURA 5.40 – Visualização tridimensional da cruz da média vertente no final do período chuvoso	127

LISTA DE FOTOS

FOTO 3.1 – Pluviômetro vinculado ao sistema da ANEEL em Gouveia	30
FOTO 3.2 – Aspecto da vegetação na alta porção da vertente estudada.....	33
FOTO 3.3 – Aspecto da vegetação na média porção da vertente estudada	33
FOTO 3.4 – Visão geral do relevo na área de estudo e entorno.....	41
FOTO 4.1 – Medição da cobertura vegetal em transectos	53
FOTO 4.2 – Medição da cobertura de superfície.....	54
FOTO 4.3 – Estação em cruz montada com a estrutura em madeira e com o líquido traçador aplicado	55
FOTO 4.4 – Irrigação da solução traçadora azul em uma estação em cruz	57
FOTO 4.5 – Disposição dos eletrodos dentro da caixa delimitadora da área a receber a solução aquosa (levantamento base)	58
FOTO 4.6 – Medida de eletrorresistividade realizada após a injeção da solução traçadora.....	59
FOTO 4.7 – Operação das unidades de controle (voltímetro e potenciômetro) na obtenção de medidas	60
FOTO 4.9 – Levantamento <i>comon offset</i> com antenas de 200 MHz	64
FOTO 4.10 – Levantamento com antenas de 1 GHz.....	65
FOTO 4.11 – Perfuração do solo com trado próprio para instalação dos tensiômetros, bem próximo à cruz.....	66
FOTO 4.12 – a) Tensiômetro analógico em processo de medição	68
b) Tensiômetros instalados em quatro profundidades – da esquerda para a direita: 15, 30, 45 e 60 cm	68
FOTO 4.13 – Início da abertura das trincheiras: perfis A1 e B1	69
FOTO 4.14 – Trincheira menor aberta para observação do fluxo marcado pelo colorímetro	71
FOTO 4.15 – Trincheira maior aberta para observação do fluxo marcado pelo colorímetro	71
FOTO 5.1 – Aspecto da cobertura vegetal na parcela da alta vertente.....	74
FOTO 5.2 – Delimitação dos horizontes do solo da alta vertente	76
FOTO 5.3 – Aspecto da vegetação na parcela da média vertente	77
FOTO 5.4 – Delimitação dos horizontes do solo da média vertente.....	79
FOTO 5.5 – Perfil da média vertente ao início do período chuvoso, onde se nota o azul	

bem marcado em profundidade, mas pouco aparente próximo à
superfície129

LISTA DE QUADROS, GRÁFICOS E TABELAS

QUADRO 4.1 – Síntese da distribuição diária das coletas dos dados em outubro e novembro de 2006	50
QUADRO 4.2 – Síntese da distribuição diária das coletas dos dados em abril e maio de 2007	51
GRÁFICO 3.1 – Precipitação média mensal em Gouveia coletada pela ANEEL de 1972 a 1990.....	30
GRÁFICO 3.2 – Precipitação média mensal em Gouveia coletada pela ANEEL de 1995 a 1999.....	31
GRÁFICO 5.1 – Tensiometria da alta vertente no início do período chuvoso	81
GRÁFICO 5.2 – Tensiometria da média vertente no final do período chuvoso.....	82
GRÁFICO 5.3 – Tensiometria da alta vertente no final do período chuvoso	82
GRÁFICO 5.4 – Tensiometria da média vertente no final do período chuvoso.....	83
TABELA 2.1 – Frequência central da antena versus profundidade de penetração da onda na subsuperfície.....	22
TABELA 5.1 – Cobertura vegetal da alta vertente.....	75
TABELA 5.2 – Cobertura de superfície da alta vertente.....	75
TABELA 5.3 – Análise granulométrica do solo da alta vertente	76
TABELA 5.4 – Cobertura vegetal da média vertente	77
TABELA 5.5 – Cobertura de superfície da média vertente	78
TABELA 5.6 – Análise granulométrica do solo da média vertente.....	79

RESUMO

Este estudo tem por objetivo obter e analisar informações mais precisas sobre a dinâmica subsuperficial da água de infiltração em parcelas experimentais. Este tema se reveste de grande importância quando correlacionado a outros dados, dentre eles a forma da vertente, a micro-topografia, características do solo, entre outros. A capacidade de infiltração tem grande importância devido a sua influência nos processos erosivos de vertente e na capacidade do solo de manter a cobertura vegetal, por exemplo. Assim, as questões que norteiam esta pesquisa baseiam-se no fato de que a água, em seu processo dinâmico de entrada e saída da superfície, torna-se responsável, localmente, por mudanças na fisionomia das vertentes e, regionalmente, pela evolução do relevo. A pesquisa foi desenvolvida no município de Gouveia, Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil, em uma vertente suavemente ondulada na margem esquerda de um córrego de 3ª ordem. Na alta vertente ocorre o cambissolo e média vertente o latossolo. Os experimentos foram realizados sob diferentes condições iniciais de umidade: no início e no fim de um período chuvoso. A metodologia envolveu três etapas principais: 1 - aplicação no solo de uma solução aquosa traçadora, constituída por água e corante Brilliant Blue FCF e cloreto de sódio; 2 - leitura da subsuperfície por métodos geofísicos (perfis geoeletricos e Georadar); 3 - abertura de perfis de solo para observação do traçador e coleta e análise de dados de solo. A visualização do movimento da água em subsuperfície por meio do traçador azul foi feita tanto por meio dos métodos geofísicos quanto por perfis abertos no solo cinco semanas após a injeção da solução traçadora. Os perfis foram abertos tanto perpendicular quanto paralelamente ao escoamento esperado do fluxo na vertente. Os resultados demonstram clara diferença no modo como a água infiltra nos dois diferentes tipos solos estudados, revelando também a inquestionável influência da forma da vertente e também a eficácia da metodologia empregada para esses estudos.

ABSTRACT

This study aims to obtain and analyze more precise information about sub superficial water dynamics at soil plots. Infiltration capacity of soils is an important subject due to its influence on slope processes of erosion and on soil capacity of maintaining vegetation cover, for example. So a basic premise for this research is based on the fact that infiltration has an immediate effect on the availability of runoff water, having influence, locally, on changes of slope form, and, regionally, on the evolution of the landform. In the present research, infiltration speed and the form that infiltration front assumes are correlated to other data, such as slope shape, surficial micro-forms, soil characteristics, among others. The field work was carried out in Gouveia, Minas Gerais State, Brazil, on a gentle undulating slope at the left margin of third order stream. On the upper slopes occurs cambisol, while on the middle slopes the ferralsol. The experiments were carried out under different initial conditions of humidity: at the end of rainy and of dry season. The methodology involved three main steps: 1 - injection of a water, sodium chloride and dye tracer Brilliant Blue FCF solution on the soil; 2 - investigation of the subsurface by geophysical methods (electrical resistivity and Ground Penetrating Radar), and 3 - digging soil holes for observation of the tracer and for physical and chemical analysis of soil samples. The visualization of the subsurface water movement by the blue tracer was made at vertical soil sections five weeks after the injection of the tracer solution. The vertical soil sections were prepared perpendicular as well as parallel to the expected flow on the slope. The results demonstrate clear differences in the way water infiltrates in the two types of soil, revealing also undoubtedly influence of slope form, besides the efficiency of the employed methodology for this type of research.

1.1 - Introdução

Este estudo foi desenvolvido em Gouveia, município localizado na porção meridional da Serra do Espinhaço, em Minas Gerais. Desde a década de 1980 a comunidade acadêmica vem conduzindo diversas pesquisas na região, o que tem levado à produção e publicação de vários trabalhos, desenvolvidos principalmente por alunos e professores pesquisadores do Instituto de Geociências da UFMG, e envolvendo também outras unidades da Universidade. Os estudos abarcam diferentes temas, com destaque para as pesquisas em geomorfologia. Essas pesquisas têm buscado, ao longo de anos e através de várias etapas, o entendimento das especificidades e da dinâmica da evolução geomorfológica da região.

Os projetos desenvolvidos na área têm como eixo norteador os estudos sobre a dinâmica cenozóica do relevo, para a qual se tornam fundamentais as investigações de maior escala, como base para o entendimento dos mecanismos que levam à elaboração atual da paisagem da área, incluindo o relevo. Nesta escala, uma das temáticas principais investigadas em Gouveia é a erosão hídrica, que constitui um dos processos mais importantes no refeiçãoamento (*reshaping*) do relevo (Augustin, 1995), sendo muito acentuada na região. Os trabalhos de Augustin *et al.* (1998), Ádamo (2001), Marchioro (2002), Diniz (2002), Salgado (2002), Portilho (2003), Barbosa (2002; 2004) e Cruz (2003; 2006) são alguns exemplos de estudos no âmbito dessa temática.

Estudos prévios no município, como o de Augustin (1995), ressaltaram que algumas áreas possuem condições lito-pedológicas e geomorfológicas que predisõem a erosão em diferentes graus. Grande parte do relevo do município está inserida geologicamente sobre litologias do embasamento cristalino, no qual se desenvolvem formas específicas, como os anfiteatros, entalhado por drenagens de pequenas ordens, susceptíveis à erosão considerada, e onde predomina uma associação de latossolos e cambissolos, em geral com alto grau de lixiviação (Augustin, 1995). O clima da região é do tipo tropical sub-úmido, com precipitações médias anuais de mais 1.400 mm. Esse clima favorece a ação do intemperismo químico, o qual, associado às demais

características naturais da área, faz da erosão um processo significativo. Além das predisposições pedológicas, geomorfológicas e geológicas, esse processo é intensificado pelo manejo incorreto do solo, com destaque para a alteração da vegetação original predominante, o bioma Cerrado.

Outras pesquisas realizadas previamente no mesmo local (Augustin, 1995; Barbosa, 2002; Marchioro, 2002; Portilho, 2003) demonstraram que a erosão laminar tem relevante importância no tocante à perda de solo e seu remanejamento nestas vertentes. Por conseguinte, espera-se, no presente trabalho, ser possível estabelecer melhores correlações entre essa disponibilização da água para o escoamento superficial e a capacidade dos solos de receber água em subsuperfície.

A obtenção de informações mais precisas sobre a atuação da água em subsuperfície se reveste de grande importância principalmente quando correlacionada a outros dados, dentre eles a configuração da vertente, com seus componentes atuando ou não como condicionantes de maior ou menor fluxo superficial ou infiltração da água. Como ressaltam os trabalhos de Thurler et al. (1996), Weiler (2001), Honauer (2002), Portilho (2003) e Moraes (2007), o fluxo subsuperficial da água pode variar em volume, velocidade, direção e profundidade, devendo tais variações estar relacionadas às propriedades do solo e também a outros fatores, tais como litologia, vegetação, pluviosidade, declividade e forma da vertente.

Assim, as questões que norteiam esta pesquisa se baseiam no fato de que a água, em seu processo dinâmico de entrada e saída da superfície, promove a remoção de partículas dos solos em intensidades variáveis, e acaba sendo responsável, localmente, por mudanças na fisionomia das vertentes e, regionalmente, pela evolução da paisagem. Aranha (2003) aponta indícios de que elementos subsuperficiais têm influência sobre a percolação da água e possivelmente sobre o desenvolvimento de voçorocas na região estudada.

A configuração subsuperficial dos solos é aqui entendida como o estado atual dos mesmos, e é resultante dos processos de evolução pelos quais estes solos passaram. A composição mineralógica das partículas e o arranjo dos grãos configuram a distribuição da textura, da estrutura e da porosidade no perfil do solo. Esta

configuração da subsuperfície, que também está relacionada a fatores externos, tais como clima, vegetação e uso do solo, é determinante do comportamento da água nesse ambiente.

O comportamento subsuperficial da água é dependente tanto da configuração da subsuperfície quanto da configuração da superfície – aspectos do relevo e cobertura do solo –, como também da disponibilização de água ao solo em volume e intensidade. Este comportamento é aqui entendido como dinâmico, pois não é um processo homogêneo, de uma só variável, envolve a entrada e saída de água no solo, a movimentação desta no perfil e a sua velocidade de infiltração, todas essas possuindo variabilidade tanto vertical quanto lateral.

O modo como processos e mudanças contemporâneas podem influenciar a forma de vertentes é de grande interesse para a Geomorfologia. O estudo em macro-escala na análise do relevo, como é o caso desta pesquisa, objetiva entender o desenvolvimento e a forma de vertentes, bem como os processos que têm sido responsáveis por diferentes feições na paisagem (Chowdhury, 1978).

Nesta perspectiva, esta dissertação busca contribuir para o melhor conhecimento sobre os processos de vertente na Depressão de Gouveia. Nesta pesquisa são utilizados dados obtidos em estudos prévios de outros autores, em especial os de Diniz (2002), Portilho (2003), Barbosa (2004) e Rocha (2004), para aprimorar a discussão a respeito do quadro ambiental da região de estudo.

1.2 - Objetivos

Esta pesquisa está fundada na hipótese de que a configuração subsuperficial dos solos tem influência sobre a percolação da água nos mesmos e na maneira como a água penetra e se movimenta nestes ambientes, pois procura-se quais suas possíveis relações com os processos de vertente na área pesquisada.

A atuação das águas de superfície e de subsuperfície tanto sofrem influência de elementos geomorfológicos – que são relativos à forma, à microforma, aos solos e à

hidrografia, e que se integram de maneira inerente à própria vertente –, quanto influenciam estes elementos e os processos associados a eles. Assim, a conformação superficial da encosta não só influencia a infiltração, como também é influenciada por ela, resultando no refeioamento do relevo.

Deste modo, na busca de um melhor entendimento destas relações e processos, tem-se como objetivo principal deste estudo:

- Analisar a dinâmica da água em subsuperfície, em diferentes condições iniciais de umidade do solo em uma vertente do córrego do Quebra, através da utilização de métodos geofísicos associados ao uso de traçadores e de tensiômetro, procurando caracterizar o comportamento do escoamento subsuperficial.

Para alcançar esta meta, são objetivos específicos desta pesquisa:

- Verificar, qualificar e quantificar elementos superficiais dos solos locais (vegetação e cobertura do horizonte superficial) e ressaltar suas prováveis relações com a infiltração da água nestes;
- Aplicar os métodos geofísicos de Georadar e de imageamento elétrico associados ao uso de solução aquosa salina para leitura e interpretação do fluxo na subsuperfície;
- Aplicar a técnica do uso de traçador colorimétrico (Brilliant Blue FCF) seguida da abertura de trincheiras para verificar o comportamento do fluxo em perfil;
- Estimar os valores de tensão da água nos solos e
- Avaliar os resultados obtidos nas parcelas da alta e média vertente para as duas épocas analisadas – início e fim do período chuvoso – e compará-los.

CAPÍTULO 2

ESTUDO DA INTERAÇÃO ÁGUA-SOLO

O entendimento dos fatores e processos envolvidos na interação água-solo é de grande importância para a compreensão de fenômenos ambientais e antropicamente impactantes, a exemplo de erosões, inundações, fluxo de poluentes, agentes contaminantes e instabilidade de taludes.

As pesquisas nesta área possuem diferentes enfoques e escalas. Trabalhos como os de Thurler et al. (1996), Weiler (2001), Honauer (2002), Marchioro (2002), Portilho (2003), Barbosa (2004) e Morais (2007) estudam a interação água-solo em parcelas experimentais, ou seja, em grande escala, e com objetivos acadêmicos. Alguns estudos nessa mesma escala estão voltados para o interesse agrícola, como é o caso de Reichenberger et al. (2002). Em menor escala, Moreira & Dourado (2003) investigam a contaminação do subsolo e Davis & Annan (1989) e Harari (1996) pesquisam a água subterrânea a grandes profundidades. Muitos estudos sobre erosão estão relacionados à água movendo-se entre os poros do solo por meio de *piping*¹, sendo este fenômeno uma das principais manifestações geomorfológicas do fluxo hídrico subsuperficial (Kirkby, 1978; Beven & Germann, 1982).

A dinâmica interna da água no solo revela uma relação de diversos fatores que controlam o componente hídrico, como o clima, propriedades físicas do solo, tensão, sistema radicular da vegetação, macro e micro fauna e uso do solo (Bezerra & Rodrigues, 2006: 161). Chowdhury (1978) ressalta que é de fundamental importância o conhecimento da entrada e da saída da água do perfil, sob diferentes condições de solo, clima, vegetação e uso do solo.

Para melhor compreensão da interação água-solo, cabe lembrar que este pode ser definido como um material natural trifásico: o solo é constituído por grãos minerais e matéria orgânica, formando uma fase sólida, envolvidos por uma fase líquida constituída basicamente por água, e preenchido em parte por ar, que forma a fase gasosa (Bailey, 1943; Costa, 1975). De acordo com este autor, as partes constituintes do

¹ *Piping*, ou atunelamento, remete a *pipes*, que são, a grosso modo, largos canais ou túneis formados por macroporos em solo (Kirkby, 1978).

solo variam em composição e em quantidade, no tempo e no espaço. A área ocupada por uma das partes não é ocupada pelas outras. A fase sólida do solo é bastante estável se comparada às outras, que normalmente estão em constante processo de substituição de uma pela outra, caracterizando a movimentação da água no solo.

2.1 - Movimentação da Água no Solo

A interação da água com o solo, em termos de movimento, tem início no primeiro contato da água com o solo, seja este por meio de pluviosidade, subida do nível freático, oscilações verticais sazonais do nível d'água subsuperficial, irrigação, entre outros. A interação com a porção interior do solo - a subsuperfície - dá-se inicialmente a partir da infiltração, que disponibiliza a água para diferentes caminhos (Moniz & Medina, 1972; Costa, 1975). Parte do volume infiltrado serve de suprimento às necessidades hídricas dos vegetais e parte evapora-se. Contudo, a maior proporção do volume infiltrado tem continuidade na percolação, processo pelo qual a água circula pelo solo, sem que obedeça necessariamente um fluxo descendente (Pinto et al., 1976).

Segundo Lepsch (2002), neste momento inicial de percolação da água pelo solo pode-se dizer que todos os poros são preenchidos com água e o ar está praticamente ausente. Neste caso, é gerado no sistema do solo a chamada zona saturada, configurando a saturação do meio por água, que segue um fluxo homogêneo neste meio. Durante eventos pluviais, a condição de fluxo saturado tem curta duração, só se estabelecendo quando a quantidade de água adicionada ao sistema do solo é exatamente igual ou maior que a capacidade do solo de receber água (Kalpagé, 1974; Kirkby, 1978, Thomas, 1994). Assim, em situações como esta, todos os poros do solo são preenchidos com água e este pode ficar momentaneamente saturado até mesmo próximo à superfície. O líquido que está contido nos poros maiores percola para baixo ou lateralmente, atingindo maiores profundidades. Essa água, que percola sob ação da gravidade, é chamada de gravitativa (Bailey, 1943; Klar, 1988).

Todavia, à medida que o fornecimento de água diminui ou cessa, ocorre entrada de ar no sistema, configurando assim uma zona vadosa ou de aeração, caracterizada pela percolação não saturada do fluxo (Costa, 1975). Após a passagem da água gravitativa, o solo terá se tornado úmido, contendo ar nos macroporos e água nos microporos.

Sobre estes últimos intervêm forças de natureza capilar e molecular de interação entre a fase sólida e líquida (Brady & Buckman, 1979). A força capilar retém a água no solo em seus espaços porosos, e é o fenômeno responsável pela descida e subida do nível de água no solo através dos condutos capilares (Gavande, 1972). A força de retenção exercida pela capilaridade é forte o suficiente para vencer a gravidade, mas não é tão intensa a ponto de impedir as raízes de extrair esta água. Contudo, a força de retenção molecular, ou adsortiva, supera a capacidade de extração das raízes, sendo a água por ela retida denominada higroscópica (Bailey, 1943).

As primeiras mensurações dessa movimentação da água no solo foram realizadas por Henry Darcy, em 1856, que correlacionou a velocidade de percolação com a permeabilidade, definindo esta como a maior ou menor facilidade com que a água percola através de um solo (Kirkby, 1978). Outro conceito associado à infiltração é o de condutividade hidráulica, que pode ser definida como a taxa de movimento interno da água através do solo, ou a capacidade do solo em absorver e transferir água (Costa, 1975; Jorge, 1986). Quanto maior o conteúdo de água no solo, maior é a sua condutividade hidráulica, pois existe maior conectividade entre as moléculas de água, que tendem a se atrair mutuamente, gerando movimento de condução do volume líquido (Klar, 1988).

Estudos posteriores ao de Darcy explicam que a movimentação da água no solo ocorre numa tendência de se alcançar um estado de equilíbrio energético (Gavande, 1972; Kirkby, 1978). Em condições de saturação, a água contida no solo move-se por gravidade. Em um solo insaturado, a água está sob tensão e se move devido à diferença entre a sua pressão e a atmosférica (Klar, 1988). Para melhor entendimento destas relações de forças atuantes na movimentação da água no solo, faz-se necessária a compreensão da energia envolvida nesse processo.

2.1.1 - Conceitos Energéticos da Água no Solo

A água presente no solo, nas plantas, na atmosfera, assim como em qualquer corpo na natureza, pode ser caracterizada pelo seu estado de energia. A água comporta-se no solo de modo complexo, pois sua retenção e movimentação obedecem a princípios

físicos básicos que envolvem principalmente o estado energético potencial da água (Bailey, 1943; Paz et al., s.d.).

A lei geral da natureza é a de os corpos ocuparem um estado mínimo de energia. Assim como toda energia na natureza, que busca uma condição de equilíbrio, a energia da água faz com que esta, preferencialmente, se desloque dos pontos de maior potencial para os de menor potencial. Desse modo, esta diferença de potencial, chamada gradiente, é o que comanda as direções e intensidades do movimento da água no solo, tornando-se sua obtenção fundamental, pois permite caracterizar a magnitude e a direção dos fluxos d'água dentro do solo (Kirkby, 1978; Hillel, 1982).

Para que se determine quão longe a água do solo está do equilíbrio, é preciso avaliar as forças que agem sobre ela. Desse modo, torna-se importante o conhecimento da energia potencial total da água no solo, que é resultante da soma de três campos de força principais: o potencial gravitacional – que atua sobre todos os corpos sobre a superfície terrestre e independe das condições de pressão da água no solo –, o potencial osmótico – que se relaciona com a presença de solutos na água do solo e exerce pouca influência no movimento da água no solo – e o potencial matricial ou potencial de pressão – que tem relação com a energia da água em relação às partículas sólidas do solo e às demais moléculas de água (Gavande, 1972; Klar, 1988).

O potencial matricial aparece como o mais importante campo de força atuante na água do solo. Em um solo insaturado, as forças capilares e de adsorção conferem à água estados energéticos iguais ou menores que o da água livre à pressão atmosférica. Uma vez que a esta é atribuído valor igual a zero, o potencial matricial, que está sob tensão ou sucção, terá sempre valor negativo (Moniz & Medina, 1972; Hillel, 1982; Hartmann, 1989). Como o potencial matricial é diretamente proporcional à umidade, e torna-se cada vez mais negativo à medida que o solo seca, este potencial associa-se à capilaridade – que atua quando os poros estão úmidos, porém não saturados –, e à adsorção – que atua nas películas de água que envolvem as partículas do solo. Apenas em condições de saturação do solo, quando o fluxo torna-se homogêneo, é que se verificam valores nulos de potencial matricial, aumentando assim a importância do potencial gravitacional (Moniz & Medina, 1972; Hillel, 1982).

Todavia, mesmo tendo-se conhecimento sobre as tensões atuantes na água do solo, não é possível ainda um domínio total de todos seus vetores, devido ao nível microscópico dessa investigação. Klar (1988) coloca que, por causa das diferentes formas e larguras dos poros, o fluxo torna-se muito variável. Como exemplo, o autor ressalta que os poros mais largos conduzem a água mais rapidamente e, ainda, que a velocidade dentro do poro é maior no seu centro que próximo às paredes do mesmo.

Devido a essa variedade de movimentos e de diferenças de pressão, Klar (1988) coloca que se faz necessário o estudo do comportamento médio da água no solo, devendo-se, para isto, recorrer a métodos de estudos mais abrangentes e macroscópicos, que façam uso de aparelhos de medição de valores de potencial de pressão, como os tensiômetros, que foram utilizados nesta pesquisa e são detalhados no item 2.4.1.

2.2 - Fatores Condicionantes da Infiltração e Percolação da Água no Solo

A infiltração e a percolação da água no solo dependem diretamente da atuação, conjunta ou isolada, de muitas variáveis ambientais (Kirkby, 1978). Como principais variáveis podem ser destacadas o clima - temperatura, insolação, precipitação, umidade do ar, vento -, a cobertura vegetal - tipo e densidade -, o relevo - forma e declividade da vertente - e o solo propriamente dito - textura, estrutura, porosidade, teor de matéria orgânica, umidade inicial. Apesar destas variáveis serem estreitamente correlacionadas entre si, elas são aqui tratadas individualmente, na tentativa de melhor compreender o movimento da água no solo na escala da vertente.

2.2.1 - Condicionantes Climáticos

O clima exerce influência direta na infiltração e percolação da água no solo, uma vez que determina os regimes térmicos e pluviométricos. Estes, por sua vez, interferem no teor de umidade do solo, e este último, conforme explicado anteriormente, tem relação direta com o potencial matricial do solo.

O clima disponibiliza, através das chuvas, água para o solo, que pode ser armazenada em pequenas depressões, ou se infiltrar, contribuindo, dessa forma, para aumentar a

capacidade de armazenamento dos solos (Kirkby, 1978). O volume e a intensidade da precipitação, quando muito elevados, fazem com que o solo atinja a condição de saturação mais rapidamente, pois os espaços existentes entre as partículas do solo são preenchidos. Desse modo, pelo fato da capacidade de infiltração ter se tornado praticamente nula, o movimento de infiltração fica reduzido, podendo levar ao encharcamento a superfície do terreno (Morgan, 1980).

O processo de infiltração não é estático ao longo do ano. A variação anual tanto das chuvas quanto da temperatura também tem importância fundamental no comportamento da água no solo, pois determina a umidade e a temperatura do ar, e conseqüentemente do solo. Assim, quanto mais baixa a umidade do ar e mais alta a temperatura, maior será a taxa de evaporação da água do solo, reduzindo o potencial matricial das camadas superiores e aumentando o gradiente no interior do solo (Kalpagé, 1974). Isto faz com que ocorra movimentação ascendente da água no solo, que, à medida que se aproxima da superfície, sofre ainda mais intensamente a ação destas variáveis. Neste processo, também tem relevância a umidade inicial do solo, que varia consideravelmente ao longo do ano. Ao se iniciarem as chuvas após um longo período de estiagem, por exemplo, a tendência é que o solo demore mais para atingir a saturação que quando o solo apresenta maior umidade antecedente (Custodio & Llamas, 1976; Thomas, 1994).

Aos condicionantes climáticos da infiltração citados acima se somam, ainda, a quantidade e a intensidade da insolação – que têm relação direta com a temperatura – e o vento, que conseqüentemente influenciam as taxas de evaporação. Também é relevante nesses casos a presença de vegetação, que produz sombreamento à superfície, ameniza a temperatura e conseqüentemente diminui a evaporação da água do solo (Brady & Buckman, 1979; Thornes, 1985).

2.2.2 - Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal tem grande importância no tocante ao comportamento da água no solo, especialmente porque aumenta e mantém sua capacidade de infiltração (Kirkby, 1978; Morgan, 1979).

A interferência da vegetação tem início antes da chegada das gotas de chuva ao solo, quando estas são interceptadas pelas partes aéreas dos vegetais, tendo sua energia cinética dispersada (Morgan, 1980; Thornes, 1990). Isto ocorre pela “quebra” da aceleração das gotas através da absorção do impacto delas sobre a vegetação. Algumas gotas dividem-se em outras menores e caem no solo com menor força, e outras escoam lenta e gradualmente, pelas folhas, galhos, caules e troncos, até a superfície. Desse modo, neste primeiro momento o processo de entupimento dos poros por partículas de solo é evitado e a taxa de infiltração durante o evento chuvoso pode se manter maior por mais tempo (Barros, 1961). Ademais, parte da água nem chega a atingir o solo, ficando estancada em concavidades do vegetal, de onde é absorvida por este ou se evapora.

A eficiência da interceptação da chuva depende tanto das características dos vários estratos – gramíneo, herbáceo, arbustivo e arbóreo, que apresentam diferentes tipos e dimensões de folhas, galhos, troncos e caules – quanto da densidade de cobertura proporcionada pelos espécimes (Carvalho, 1991).

Barbosa (2002), ao avaliar o papel da vegetação no processo de perda de solo e esculturação de vertentes na depressão de Gouveia, concluiu que o tipo de cobertura apresenta-se como mais relevante que a densidade de cobertura vegetal, sendo, assim, os estratos arbustivos e arbóreos mais significativos na infiltração que os estratos gramíneos e herbáceos. Contudo, Baccaro (1999) atesta o expressivo significado da cobertura vegetal enquanto protetora do solo contra o efeito erosivo das chuvas no domínio do Cerrado. Segundo a autora, as gramíneas, que apesar de possuírem raízes rasas são abundantes neste domínio, oferecem proteção ao solo principalmente quando tem início o período chuvoso. Nesta época, as primeiras chuvas “atacam” o solo até então ressecado pela estiagem, mas ao mesmo tempo favorecem o desenvolvimento da vegetação, que assim passa a proteger ainda mais o solo.

Assim, a vegetação, ao evitar o choque direto das gotas de chuva contra a superfície do solo, também diminui o poder de compactação destas, que levaria à formação de crostas no topo do solo que fariam aumentar as taxas de escoamento superficial em detrimento das taxas de infiltração (Tackett & Pearson, 1964).

Bertoni e Lombardi Neto (1999) destacam ainda outros efeitos da cobertura vegetal sobre a infiltração que atuam no sentido de melhor estruturar o solo. Um deles é o aumento da infiltração pela produção de poros no solo por ação das raízes. Estas formam dutos (macroporos) que facilitam a percolação por se tornarem caminhos preferenciais à passagem da água. Assim, quanto maior a densidade de raízes na matriz do solo, melhor será a estruturação e a porosidade.

O outro efeito da vegetação sobre a infiltração é o aumento da capacidade de retenção de água pela estruturação do solo por efeito da produção e incorporação de matéria orgânica (Gavande, 1972). A vegetação promove, ainda, a drenagem do solo por meio da sua retirada através da transpiração (Custodio & Llamas, 1976), e, conforme mencionado anteriormente, atua na amenização da temperatura do solo, fazendo com que as taxas de evaporação da água sejam menores (Brady & Buckman, 1979; Thornes, 1985).

2.2.3 - Condicionantes Geomorfológicos

A influência da geomorfologia na dinâmica da água no solo é considerada fundamental e verifica-se principalmente pela declividade e pelo comprimento da rampa (Kirkby, 1978; Scanlon et al., 1997). Também são consideradas importantes a micro-topografia da superfície do terreno e as diferenças de comportamento da água nas diferentes porções da vertente, uma vez que sob diferentes condições de inclinação e solo, o relevo pode apresentar aspectos que controlam a umidade e a pressão do solo (Chowdhury, 1978).

Os pontos de maior ou menor infiltração numa vertente dependem da sua morfometria (Schoeneberger & Wysocki, 2005). Esta estabelece áreas de convergência e divergência de fluxos, que têm relação tanto com as porções côncavas e convexas quanto com os “segmentos” da vertente.

Dentre os diversos modelos explicativos do papel da água na elaboração de vertentes, são mais recorrentes o de Horton (1945) e o de Dalrymple, Blong & Conacher (1968, *apud* Gerrard, 1992). Estes últimos propuseram a divisão da vertente em nove unidades hipotéticas, em que cada uma apresenta formas e processos morfogenéticos

dominantes. Horton (1945) foi mais conciso e propôs a distinção de três segmentos. No segmento do *topo da vertente* predomina a divergência dos fluxos, sendo que a quantidade de água que atinge esta porção é praticamente igual ao volume de chuvas que atinge a superfície. No segmento da *meia vertente* verifica-se tanto a convergência dos fluxos quanto o aumento do escoamento superficial, e no segmento *da base*, onde há ruptura do gradiente da vertente, ocorre diminuição da competência do escoamento superficial e predomina a deposição de sedimentos carregados pela água. Nestas duas porções mais baixas da vertente, à precipitação sobre elas deve ser acrescido o volume de água proveniente das partes superiores, que atingem estas porções inferiores tanto pela superfície quanto pela subsuperfície (Kirkby, 1978). Ainda segundo estes autores, esta distribuição de fluxos também tem relação com o comprimento de rampa, uma vez que quanto maior o caminho a ser percorrido pelas águas mais estas se avolumam à medida que descem a vertente.

Em alguns casos, as porções convexas da vertente tendem a apresentar maiores taxas de infiltração, enquanto as porções côncavas, por propiciar convergência dos fluxos e rápida formação de escoamento superficial, apresentam valores de infiltração menores (Berndtsson & Larson, 1987). Fernandes (1990) coloca que também os fluxos subsuperficiais obedecem à morfometria da vertente, canalizando-se e concentrando-se nas porções côncavas.

A declividade é um fator que tem relação direta com a velocidade de escoamento da água na vertente. A água precipitada em vertentes mais inclidadas tende, por força da gravidade, a adquirir velocidades mais elevadas, e quanto maior a velocidade, menor o tempo de contato da água com o solo e, conseqüentemente, menor a taxa de infiltração (Bertoni & Lombardi Neto, 1999).

A micro-topografia da superfície - formada por pequenas depressões ou elevações, formigueiros, termiteiros, raízes aéreas, entre outros - é também controladora do fluxo de superfície. Micro-elevações e micro-depressões configuram obstáculos ao escoamento da água ao tornarem a superfície mais rugosa, reduzindo assim a velocidade do fluxo e aumentando as possibilidades de infiltração (Kalpagé, 1974; Kirkby, 1994). No tocante ao deslocamento da água pela vertente, as feições micro-topográficas têm praticamente as mesmas funções que as macro-feições do relevo: a

água converge para as micro-depressões (concauidade) e é dispersada nas micro-elevações (saliência) (Römken et al., 2001).

2.2.4 - Condicionantes do Solo

As propriedades pedológicas têm estreita relação com o comportamento da água no solo, destacando-se a textura, a estrutura e a porosidade, que se associam a outras propriedades relevantes como o teor de matéria orgânica e a densidade.

A textura é definida tendo como parâmetro os diferentes tamanhos de partículas minerais individuais e sua proporção relativa no solo. A textura influi na capacidade de infiltração e absorção de água no solo, uma vez que os tipos de partículas presentes – areia, silte e argila – e sua proporção determinam uma maior ou menor coesão entre estas, o que por sua vez está relacionada com a retenção de água no perfil do solo (Salomão, 1999).

Solos com predomínio da fração argilosa normalmente possuem grande capacidade de retenção de água, isto devido aos efeitos de adsorção e capilaridade existente entre este tipo de partícula (Lepsch, 2002), o que se reflete em um alto potencial matricial (Gavande, 1972). Opostamente, um solo de textura mais grosseira, com predomínio da fração arenosa, apresenta baixa capacidade de retenção de água. Desse modo, infere-se que quanto maior a proporção de partículas argilosas, que atuam como uma ligação entre partículas (Salomão, 1999), maior é a resistência à infiltração. Ádamo (2001) e Portilho et al. (2001; 2002), em estudos realizados em solos no município de Gouveia, concluíram que a água possui grande dificuldade em infiltrar e percolar nos solos argilosos da região, estabelecendo, assim, uma relação inversamente proporcional entre o teor de argila do solo e a infiltração.

Contudo, a textura sozinha não determina o comportamento da água no solo. O modo como as partículas se arranjam no solo, ou seja, a estrutura do solo, também influencia nesse processo. Desse modo, um solo argiloso, se bem estruturado, pode ter permeabilidade mais elevada que a de um solo arenoso mal estruturado, fazendo, assim, com que a infiltração dependa mais da estrutura que da textura do solo (Baird, 1997).

Os agregados, que são estruturas definidas formadas pela unificação das partículas, variam tanto lateral quanto verticalmente num mesmo perfil de solo e, ainda, podem existir, dentro de um mesmo horizonte, diferentes tipos de agregados (Silva, 1999; Lepsch, 2002).

A estrutura do solo é classificada de acordo com as características morfológicas das unidades estruturais, existindo cinco tipos principais de estrutura: laminar, prismática, colunar, granular e em blocos. Estas, por sua vez, são classificadas em função das dimensões dos agregados e do grau de coesão intra e inter agregados (Lemos & Santos, 2002; Lepsch, 2002).

Para que ocorra a estruturação, é necessário que as partículas elementares do solo se agreguem, e isto depende tanto da presença de elementos agregadores, tais como argila, matéria orgânica e cátions (Fe, Al, Ca, Si), quanto de atividade biológica (Silva, 1999). Desse modo, propriedades químicas, biológicas e mineralógicas do solo influem no estado de agregação entre partículas (Salomão, 1999).

Os elementos agregadores possuem a capacidade de promover a coesão entre partículas, tornando o solo mais estável em presença de água, mais poroso e com maior poder de retenção de água (Salomão, 1999). Assim, a atividade biológica em um solo, representada pela ação decompositora dos microorganismos, pela ação de pequenos animais e pela presença de raízes, faz com que materiais do solo sejam agregados através de sua atividade metabólica, que além de criar espaços porosos, também produz substâncias cimentantes que agregam partículas do solo (Gavande, 1972; Moniz & Medina, 1972; Dias, 2001; Lepsch, 2002). No mesmo viés, conforme constatou Figueiredo (1999), a associação de óxido de ferro e aluminossilicatos pode contribuir com a agregação das partículas de argila do solo, fazendo com que este tenha melhor estrutura.

Um solo bem estruturado implica em alta porcentagem de poros e elevada coesão entre partículas, o que favorece a infiltração e aumenta a resistência do solo ao carreamento de partículas pela água. Quanto mais a morfologia dos agregados do solo permite que estes se encaixem, menor o é espaço existente entre eles, e por conseguinte menor é a porosidade. Assim, estruturas menos angulosas, com menos rugosidade e tendendo ao

arredondamento, formam poros maiores, por onde a água passa preferencialmente e com mais facilidade (Kalpagé, 1974; Custódio & Llamas, 1976). Segundo Moniz & Medina (1972) e Kirkby (1978), o mesmo se verifica na escala das partículas, pois quando estas possuem arestas mais agudas o volume lacunar entre elas mantém-se maior, resultando na configuração da estrutura dos agregados.

A estrutura, associada à textura, é, em boa parte, determinante da porosidade dos solos. Esta se refere ao volume não ocupado pelos constituintes sólidos do solo, sendo os espaços majoritariamente ocupados por ar e água, e em menor quantidade por raízes e pela fauna do solo (Silva, 1999). Através dos poros é que se dá a transferência de sólidos, líquidos e gases no solo, o que confere grande importância a estes espaços (Baird, 1997; Silva, 1999).

A porosidade do solo está diretamente relacionada com a sua permeabilidade, uma vez que determina a maior ou menor capacidade de infiltração da água (Salomão, 1999). Com isto, solos arenosos, que têm maior porosidade, são, em geral, mais permeáveis que solos argilosos. Contudo, conforme colocado anteriormente, uma boa estruturação pode fazer com que solos com maior teor de argila sejam bastante porosos. A relação entre textura e porosidade foi atestada por Augustin et al. (1998) e Diniz (2002) em estudos de solos do município de Gouveia. Estes autores concluíram que a predominância de microporos em solos argilosos permite uma alta retenção de água, enquanto que solos de textura média apresentam mesoporos que são preenchidos por pequenas partículas, dificultando a infiltração e saturando-se mais rapidamente.

Embora não exista ainda uma linha oficial de demarcação, os poros do solo são passíveis de serem classificados em função do diâmetro. Para Lepsch (2002), poros com diâmetro maior que 0,05 mm são macroporos, e poros com diâmetro menor que 0,05 mm são microporos. Contudo, existem diferentes definições dessas dimensões. Para Futai (2002), os macroporos são aqueles com diâmetro entre 0,02 mm e 0,1 mm, os microporos aqueles com diâmetro menor que 0,01 mm, e os mesoporos são aqueles com diâmetro intermediário².

² As dimensões propostas por esse autor são adotadas neste trabalho uma vez que os solos por ele estudados são correlatos aos desta pesquisa e também por não haver nenhum estudo que especifique essas dimensões na área pesquisada.

Através dos macroporos a água gravitativa circula rapidamente pelo perfil do solo, uma vez que é livre de tensão. Por outro lado, a microporosidade determina uma circulação mais lenta da água, já que é em parte retida pela coalescência da capilaridade (Briggs, 1977; Lepsch, 2002).

A condução e a retenção da água ocorrem em dois níveis distintos de porosidade (Kirkby, 1978). Além da porosidade estrutural existe aquela em escala micrométrica, chamada de porosidade textural, que é formada pelos espaços “vazios” existentes entre as partículas de areia, silte e argila do solo (Castro, 2002). Quanto maior a quantidade de poros texturais formados por argila, maior será a retenção da água no solo, pois este mineral tem a propriedade de atrair as moléculas de água (Costa, 1975; Brady & Buckman, 1979).

A porosidade em termos estruturais também possui um papel extremamente importante no comportamento da água no solo, uma vez que ela é responsável por sua maior ou menor retenção, apresentando, assim, uma relação direta com a infiltração (Kirkby, 1978; Silva, 1999). Contudo, os variados diâmetros dos poros assumem maior importância que a soma de todos os espaços vazios, uma vez que a maior ou menor retenção depende da predominância de um ou outro tamanho de poro (Beven & German, 1982).

O volume total de vazios no solo tem sua importância ressaltada quando se trata da densidade aparente do solo, que é dada pela proporção do peso das partículas do solo com relação ao volume total do solo (partículas + poros) (Briggs, 1977). Desse modo, para partículas de mesma massa, quanto menos espaços porosos no solo, maior a densidade aparente. Assim, de maneira geral, pode-se dizer que a densidade apresenta uma relação inversamente proporcional com a taxa de infiltração (Salomão, 1999). Contudo, esta relação pode ser intensificada de modo a afetar negativamente a infiltração. Isto se dá especialmente pela compactação do solo, que pode ocorrer tanto pela ação das gotas de chuva quanto pelo pisoteio e por práticas agrícolas (Brandão et al., 2002). Nesses casos, o que ocorre é o preenchimento dos poros por partículas, que se desprendem com a ruptura dos agregados (Tackett & Pearson, 1964; Kirkby, 1978).

A evolução do processo acima citado pode levar ao encrostamento do topo do solo, selando a superfície e dificultando a infiltração da água (Kalpagé, 1974; Custodio & Llamas, 1976). Bortolozzo & Sans (2001) colocam que apesar dessa superfície compactada ser de pequena espessura, seus efeitos nas propriedades físicas do solo proporcionam mudanças nas taxas de infiltração. A diminuição destes efeitos é dada principalmente por fatores biológicos: a vegetação atua tanto pela interceptação das gotas de chuva quanto pela inclusão de raízes no interior do solo; a fauna do solo é ativa na produção de macroporos (Dias, 2001); e a matéria orgânica, que é material residual da fauna e da flora, tem a grande importância de proporcionar estabilidade aos agregados do solo, o que diminui a soltura de partículas, favorecendo assim a porosidade e por consequência a infiltração.

2.3 - Métodos Utilizados na Avaliação do Comportamento do Fluxo Subsuperficial

Kirkby (1978) afirma que a dificuldade em medir o fluxo subsuperficial em uma vertente está em medir diretamente o verdadeiro caminho da água no solo, pois nesses casos grande parte dos instrumentos utilizados tendem a perturbar justamente aquilo que se quer mensurar. A maioria dos estudos para avaliação do fluxo subsuperficial da água no solo se restringe a utilizar apenas um método de investigação. Contudo, o uso de técnicas indiretas e não invasivas associado ao método de traçadores pode prover um entendimento mais compreensivo do fluxo da água (Scanlon et al., 1997), além de evitar, em parte, certas situações perturbadoras supracitadas.

Dos vários métodos disponíveis para a avaliação da infiltração, serão aqui descritos aqueles utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, que incluem a técnica de traçadores colorimétricos.

2.3.1 - A Tensiometria na Coleta de Dados Sobre o Comportamento da Água no Solo

A tensiometria é uma técnica direta e não-destrutiva utilizada para a mensuração do potencial de água no solo. Através desta técnica é possível obter informações sobre a energia potencial matricial do solo, que é a tensão com que a água é retida na matriz do

solo (Cassel & Klute, 1986; Fernandes et al., 1989; Tamari et al., 1991; Bezerra & Rodrigues, 2006).

Trabalhos realizados na área de estudo desta pesquisa, tais como os de Moreira (1987), Ádamo (2001) e Portilho (2000; 2003), demonstraram ser possível obter resultados satisfatórios a respeito da movimentação da água no solo por meio da tensiometria.

Estudos realizados também em outras áreas envolvendo os métodos tensiométricos fizeram uso dos resultados de forma comparativa a outros métodos (Villagra et al., 1988; Neto, 1994; Hayashi et al., 1997; Teixeira et al., 2005), e atestaram a eficácia da tensiometria.

Para Thomas & Phillips (1991), mesmo apesar de suas deficiências – como possíveis erros de leitura em função, por exemplo, de descalibragem do equipamento tensiométrico – a leitura de tensiômetros é bastante eficiente durante um evento de fluxo de água, seja ele gerado por chuva ou artificialmente aplicado. Segundo estes autores, a medida instantânea é valiosa pois oferece uma melhor idéia do que está realmente ocorrendo individualmente para cada tensiômetro naquele momento específico do evento de fluxo da água.

2.3.2 – Os Métodos Geofísicos Utilizados e suas Aplicações

A Geofísica, segundo definição de Gandolfo (1999: 3), pode ser definida como *uma ciência fundamentada principalmente na Geologia e na Física, assim como na Matemática, Química e Informática, que têm por objetivo o estudo da Terra*. Esta ciência torna-se fundamental uma vez que é pequena a acessibilidade ao interior terrestre, fazendo-se necessária sua investigação por métodos indiretos de prospecção não invasiva à superfície.

Como exemplo de alguns métodos geofísicos, tem-se a gravimetria, a sísmica de refração e de reflexão, a radiometria (cintilometria e espectometria), a magnetometria e os métodos eletrorresistivos e eletromagnéticos, estes últimos utilizados nesta pesquisa.

A Geofísica pura busca o conhecimento da Terra em escala global, enquanto seu outro ramo, a Geofísica aplicada, tem seu estudo restrito a *pequenas profundidades e seu objetivo voltado para questões de ordem econômica, social, acadêmica e tecnológica* (op. cit.). Desse modo, no estudo das coberturas superficiais, em que as profundidades são da ordem de poucos metros, a Geofísica aplicada assume grande importância (Steeple, 1991; Greenhouse, 1991).

As medições geofísicas respondem às propriedades do meio e as análises de seus resultados estão condicionadas à existência de diferenças neste meio. Assim, os contrastes ou anomalias encontrados são o maior foco da investigação geofísica.

Ao se aplicar a Geofísica no estudo das coberturas superficiais, o tamanho das partículas do solo e a distribuição do seu conteúdo de água irão interferir no comportamento dos sinais geofísicos emitidos, sejam eles elétricos (medidos por eletrorresistividade) ou eletromagnéticos (medidos por georadar). A água e os íons nela dissolvidos têm destaque nesta interferência, uma vez que aumenta o mecanismo de condução elétrica, influenciando na sua resposta eletromagnética (Davis & Anna *apud* Aranha, 2003).

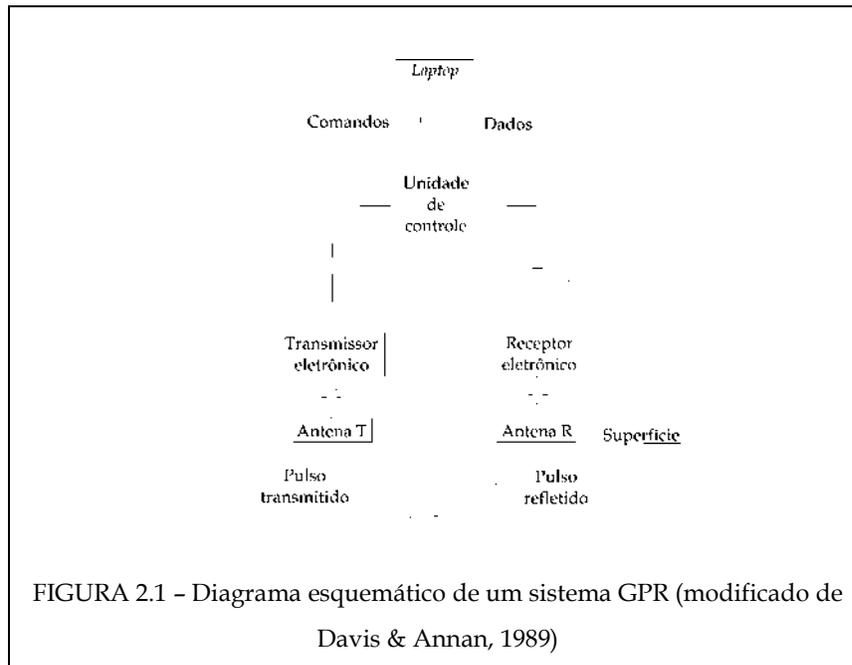
2.3.2.1 - O Método Georadar

O georadar, também denominado radar de penetração no solo (ou *ground penetration radar* - GPR), teve o início do desenvolvimento de sua tecnologia na década de 80, e desde então vêm sendo ampliadas suas aplicações nos mais diversos campos geoambientais, como a Geologia básica (Rodrigues & Porsani, 1997; Penna, 2006), Hidrogeologia (Harari, 1996), Arqueologia (Aranha, 2006), Pedologia (Annan & Davis, 1976; Davis & Annan, 1992; Gruber & Ludwig, 1996) e exploração mineral (Souza Jr. & Porsani, 2001; Botelho et al., 1997).

Nos estudos geomorfológicos destacam-se os trabalhos de Neves et al. (1997), Aranha et al. (1998), Ferreira (2002), Ucha et al. (1999), Bacellar (2000) e Aranha (2003). No campo pedológico, podem ser destacados os estudos de Annan & Davis (1976), Doolittle (1987), Davis & Annan (1992), Collins et al. (1990), Doolittle & Collins (1995), Gruber & Ludwig (1996), Overmeeren et al. (1997), Aranha et al. (1998), Aquino (2000),

e Moreira & Dourado (2003). Especificamente com relação ao estudo de fluxos subsuperficiais, estes últimos autores fornecem uma contribuição especial a esta pesquisa ao afirmarem que o GPR é uma ferramenta adequada ao monitoramento de plumas em subsuperfície, por meio de medidas multitemporais, ou medidas 4D (x, y, z, t).

O funcionamento do método GPR para investigações da cobertura superficial se dá pelo emprego de ondas eletromagnéticas (ondas de rádio) de alta frequência, que varia de 10 a 3.000 MHz. Uma antena transmissora colocada à superfície emite repetidamente pulsos de ondas eletromagnéticas (EM). A onda após refletir nas descontinuidades da subsuperfície é captada por uma antena receptora, também colocada à superfície (FIG. 2.1). Os sinais recebidos são registrados, amplificados, digitalizados e armazenados em um computador portátil (*laptop*), anexo ao sistema, e são posteriormente processados. O resultado se apresenta em forma de radargramas, que são imagens de alta resolução da subsuperfície.



A escolha da frequência da onda EM é feita tendo em vista a melhor relação entre penetração e resolução. Ondas de baixa frequência penetram mais profundamente, mas produzem baixa resolução vertical, enquanto que ondas de alta frequência têm menor profundidade de penetração vertical, mas melhor resolução (TAB. 2.1).

Contudo, a propagação das ondas EM depende também das propriedades elétricas dos materiais da subsuperfície, as quais têm relação direta com seu conteúdo de água, e assim, quanto mais saturado o solo, maior é a atenuação da onda (Davis & Annan, 1989).

TABELA 2.1

Frequência central da antena x profundidade de penetração da onda na subsuperfície

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000 MHz	1
500 MHz	1,5
400 MHz	2
200 MHz	4
100 MHz	25
50 MHz	30
25 MHz	40
10 MHz	50

Modificado de Penna, 2006 *apud* Porsani, 1999.

2.3.2.2 - O Método de Eletrorresistividade

Para se investigar a variação lateral e vertical das propriedades elétricas de uma área utiliza-se do método de eletrorresistividade na forma de *caminhamento elétrico*. É um método que investiga as variações de resistividade elétrica com a profundidade e lateralmente através de medidas realizadas na superfície (uma descrição detalhada do método é apresentada no item 3.2.5).

Assim como o GPR, o caminhamento elétrico é um método não destrutivo do solo, que encontra inúmeras aplicações em estudos geo-ambientais, tais como identificação do nível d'água, mapeamento de contatos litológicos, estudos estratigráficos e avanço de plumas de contaminação. Este método tem tido bastante aplicação em estudos de fluxo de água na zona não saturada do solo, a exemplo de Hagrey & Michaelson (1999) e Morais (2007).

Segundo estudo de White (1994), os levantamentos de eletrorresistividade se mostraram eficientes para o monitoramento de velocidade e direção de fluxos subterrâneos. Neves & Luiz (2003), com base em Barker & Moore (1998), também

atestaram o bom funcionamento da eletrorresistividade no acompanhamento multitemporal da percolação de solução aquosa salina. Estes autores identificaram a velocidade do fluxo subterrâneo através da identificação, nos perfis de imageamento elétrico, de zonas de reduzidos valores de resistividade, devido à passagem da pluma condutora.

2.3.3 - O Uso de Traçadores na Avaliação do Fluxo Subsuperficial

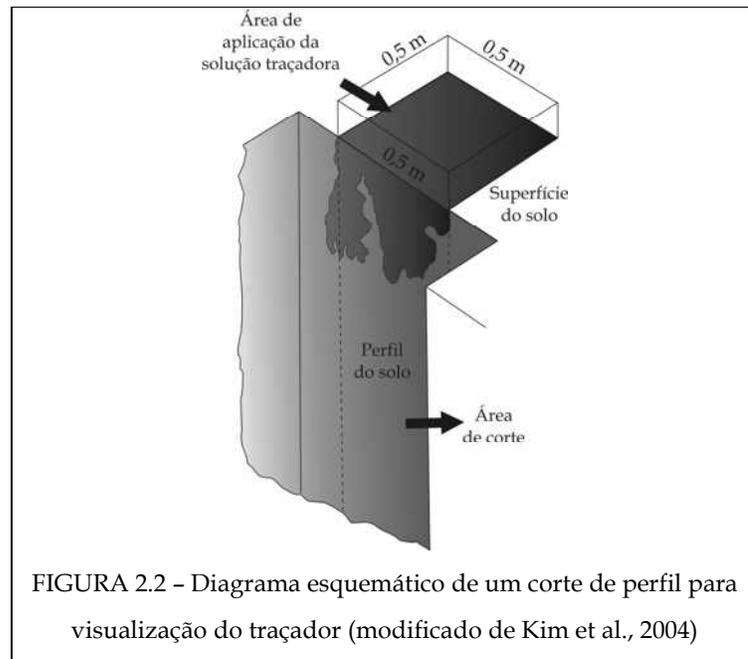
Uma das maneiras de se avaliar o comportamento do fluxo hídrico na subsuperfície é pelo uso de traçadores, uma vez que seu emprego possibilita acompanhar o movimento da água no meio poroso, o que, em muitos casos, propicia a obtenção de informações além das fornecidas pelos métodos convencionais (Roldão & Lopes, 1988; Scanlon et al., 1997).

Um traçador pode ser definido, no caso específico de fluxos subterrâneos, como uma matéria ou energia carregada pela água que fornece informações concernentes à direção e/ou velocidade da água (Davis et al., 1980). *As técnicas envolvendo o uso de traçadores consistem em injetar, em determinados pontos do maciço, uma substância que permita marcar e definir a massa d'água que se desloca através de poros ou fraturas* (Roldão & Lopes, 1988).

Segundo Drumond (2004), várias substâncias podem ser classificadas como traçadoras, a exemplo de isótopos radioativos (como o Carbono 14), cátions (como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), ânions (como Cl^- , SO_4^- , CO_3^{2-} e NO_3^-), sais (NaCl e KCl) e corantes (como Brilliant Blue FCF, Fast Green FCF, Yellow FF, Violet of Paris e Congo Red). O uso dos traçadores corantes (ou colorimétricos), que são substâncias artificiais, tem se tornado uma prática comum em pesquisas que buscam o entendimento dos fluxos na zona não saturada do solo (Flury & Flühler, 1994; Forrer, 1997; Aeby, 1998; Honauer, 2002; Flury & Wai, 2003; Kim et al., 2004).

Segundo Flury & Wai (2003), uma das formas de se colocar o corante em contato com a zona vadosa é dissolvendo-o em água, formando assim uma solução aquosa a ser aplicada à superfície. A solução colorida, ao se infiltrar e percolar em profundidade, assume o padrão normal do fluxo na área investigada, e é revelada quando se procede a abertura de trincheiras no local, onde se pode observar o tingimento do solo pelo

colorimétrico (FIG. 2.2). Para posterior análise de detalhes, recomenda-se o registro fotográfico dos perfis tingidos, a partir do qual se podem estabelecer padrões das áreas tingidas, e a partir destes os tipos e os processos de fluxo dos perfis em questão (Weiler, 2001; Honauer, 2002; Kulli et al., 2003) (FIG. 2.3).



	Tipo de fluxo	Processos de fluxo	Feições do solo	Padrão característico da área tingida
1	Fluxo por macroporos com baixa interação		Macroporos em uma matriz saturada ou com baixa permeabilidade	
2	Fluxo por macroporos com interação mista (alta e baixas)		Macroporos em uma matriz heterogênea ou macroporos com fluxo por macroporos variável	
3	Fluxo por macroporos com alta interação		Macroporos em uma matriz permeável	
4	Fluxo pela matriz heterogêneo e formação de dígitos		Solo espacialmente heterogêneo, repelência de água ou instabilidade de fluxo em solos de textura grossa ou com variações texturais	
5	Fluxo pela matriz homogêneo		Solo permeável	

FIGURA 2.3 - Padrão de coloração do solo em resposta aos tipos e processos de fluxo e às feições do solo (Weiler, 2001)

Dentre as diversas opções disponíveis, é colocada a questão da escolha por um determinado traçador, que deve ser feita tendo-se em vista os objetivos a serem alcançados, e buscando-se aquele mais próximo do ideal para o tipo de investigação realizada (Flury & Wai, 2003). Morais (2007) destaca algumas características essenciais a um traçador:

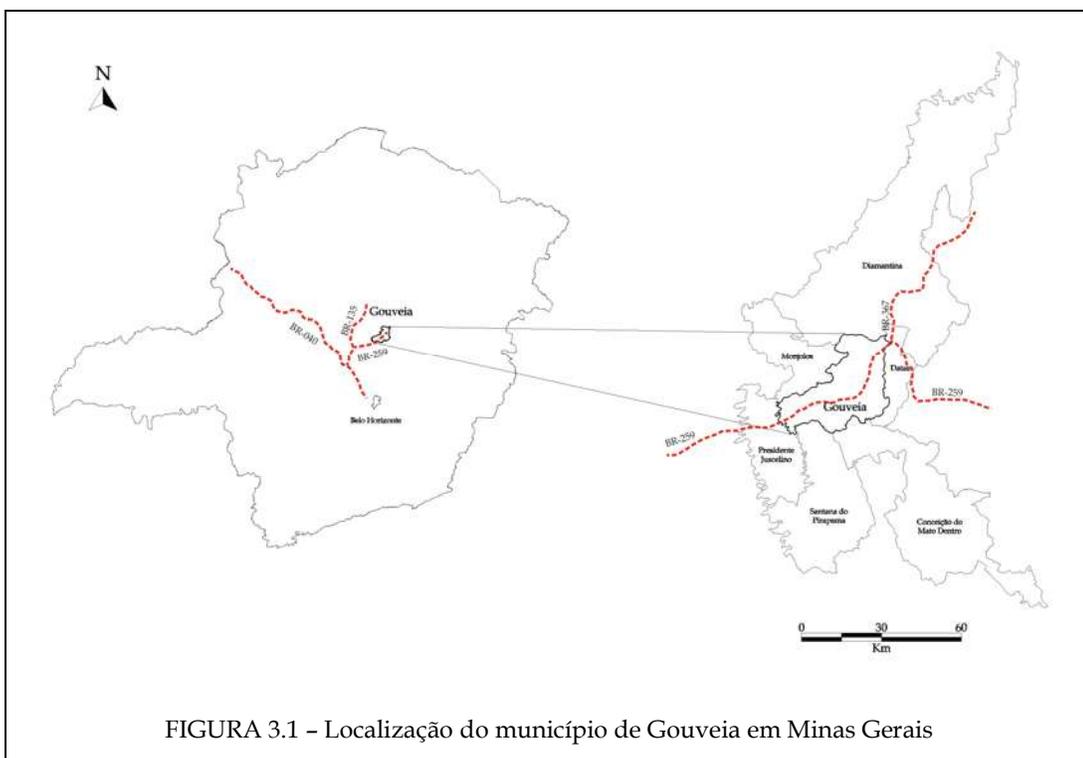
- seu comportamento, para o processo a ser investigado, deve ser igual ao da água e ser pouco adsorvido pelo solo;
- ter tempo de degradação maior que o estimado para o desenvolvimento da pesquisa;
- apresentar boa solubilidade em água, além de boa dispersão;
- permitir análise quantitativa com alta sensibilidade;
- apresentar baixa toxicidade;
- ter baixos custos de aquisição, aplicação e análise e
- após aplicado, sua concentração no meio deve ser menor que a aplicada ou esperada como resposta.

Ao se usar um traçador colorimétrico em estudos de fluxos subsuperficiais, Morais (2007) ressalta que se deve estar atento a duas questões: a primeira é que a abertura de trincheiras no ponto amostrado torna o método destrutivo, impossibilitando novas investigações no mesmo local (Flury et al., 1994); a segunda é a adsorção do corante pelo solo, que pode causar desbotamento e levar a interpretações errôneas sobre a distribuição do fluxo pelos horizontes do solo (Ketelsen & Meyer-Windel, 1999; Kasteel et al., 2002). Segundo esses autores, a argila é o principal componente do solo responsável pela adsorção do Brilliant Blue, e a matéria orgânica o componente que além de não adsorver inibe a adsorção. Assim, cabe tomar cuidado ao precisar centimetricamente o alcance vertical ou horizontal da pluma azul, lembrando que água não mais colorida pode ter percolado no perfil além do que se vê.

O cloreto de sódio (NaCl) destaca-se como um dos mais utilizados traçadores salinos, uma vez que as alterações que ele provoca no meio – em especial na condutividade elétrica e na alcalinidade da água – apresentam fácil monitoramento multitemporal, podendo ser avaliados tanto por métodos destrutivos (tradagem, abertura de trincheiras) quanto por métodos não destrutivos (caminhamento elétrico, georadar).

3.1 - Localização do Município de Gouveia

O município de Gouveia localiza-se no Alto Vale do Jequitinhonha, na porção meridional da Serra do Espinhaço, estando seus limites municipais entre as latitudes 18°25' (7964 UTM) e 18°38' (7940 UTM) e as longitudes 43°42' (636 UTM) e 43°50' (623 UTM). A cidade dista cerca de 250 km a norte de Belo Horizonte e 30 km a sul da histórica cidade de Diamantina, e seu acesso principal é feito pela BR 259 (FIG. 3.1).



3.1.1 - Localização da Vertente Investigada

As estações experimentais deste estudo encontram-se em uma vertente da margem esquerda do córrego do Quebra, situado na zona rural de Gouveia, a aproximadamente 6 km da sede municipal (FIG. 3.2).

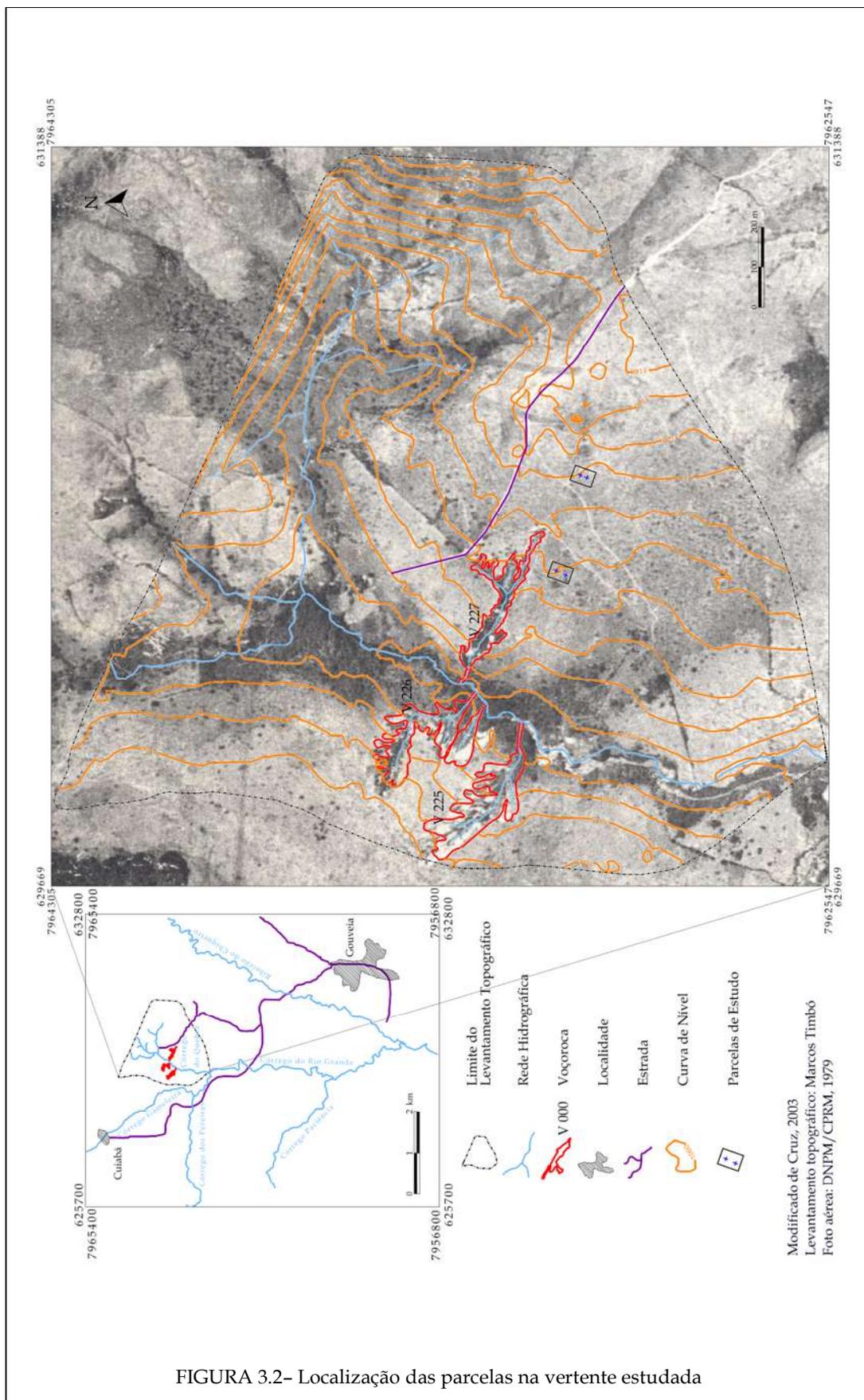


FIGURA 3.2- Localização das parcelas na vertente estudada

3.2 - Rede Hidrográfica

A rede hidrográfica que drena o município de Gouveia é formada, principalmente, por afluentes do rio Paraúna, pertencente à bacia do rio das Velhas, formadora da bacia do rio São Francisco.

A bacia do córrego do Quebra situa-se a noroeste da sede municipal de Gouveia. O córrego nasce na Serra do Bicho e, em seguida, percorre o restante do seu trecho na porção deprimida do relevo até desaguar na margem esquerda do córrego Rio Grande (FIG. 3.3). Este, por sua vez, é um dos afluentes do ribeirão do Chiqueiro, pertencente à bacia do ribeirão Areia, que é contribuinte do rio Paraúna.

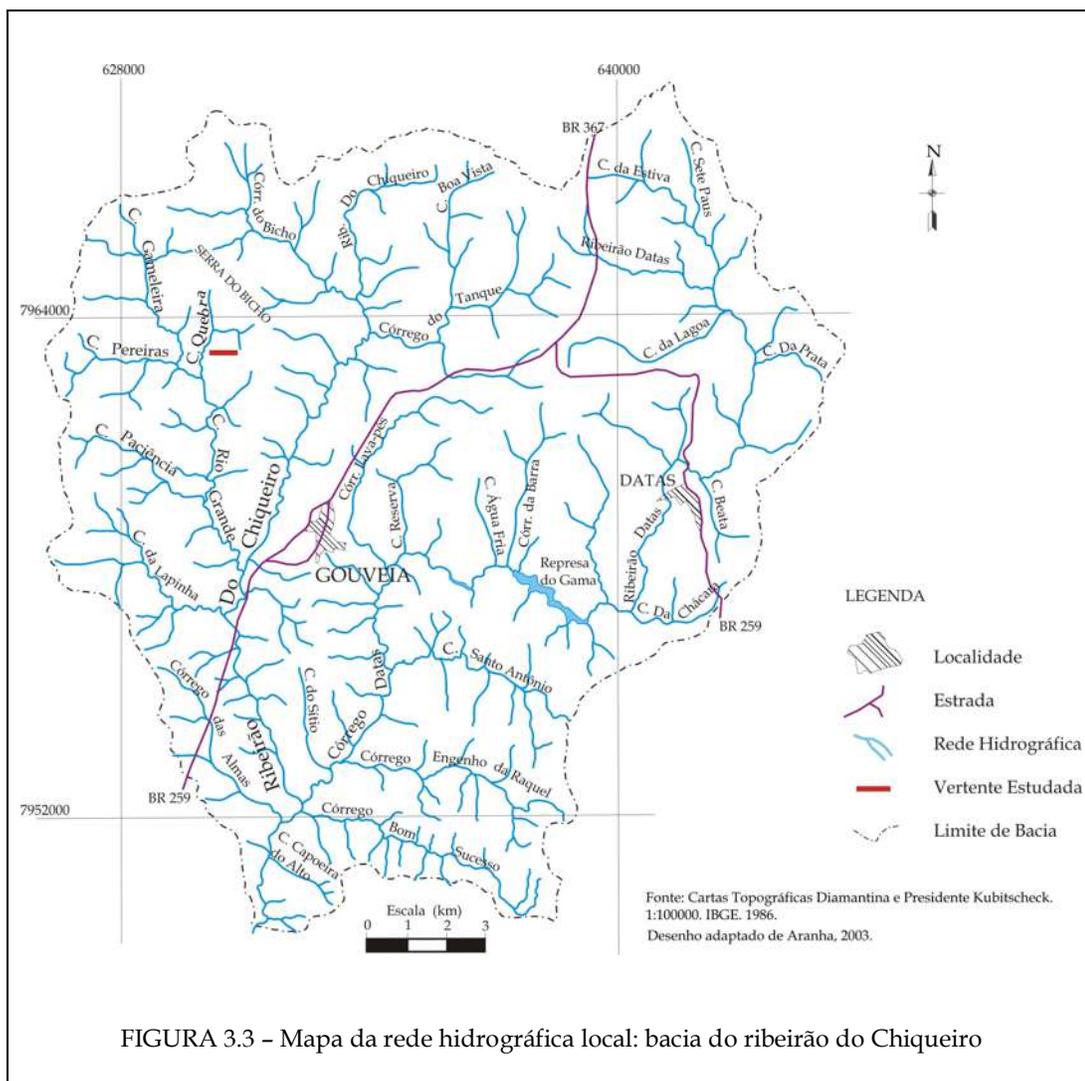


FIGURA 3.3 - Mapa da rede hidrográfica local: bacia do ribeirão do Chiqueiro

A bacia do córrego do Quebra pode ser classificada como de 2ª ordem, segundo a proposição de Horton (1945, *in* Strahler & Strahler, 1973). Seu padrão fluvial é do tipo meandrante, e na quase totalidade do curso é rico em barras e leques aluviais (Portilho, 2003).

3.3 - Caracterização Climática

O clima da região de Gouveia é influenciado pela presença da serra do Espinhaço. Esta influencia a formação de nuvens, a pluviosidade e a temperatura no seu entorno. Devido a sua grande altitude, um clima serrano com temperaturas mais baixas faz com que as temperaturas da área de estudo também tendam a ser não muito elevadas.

Por suas características, o clima da região de Gouveia enquadra-se como mesotérmico, Cwb na classificação de Köppen (*in* Ayoade, 1991), em que são registradas duas estações bem definidas: verão quente e chuvoso, e inverno ameno e seco. Contudo, como bem coloca Gouveia (2002), pela influência da altitude da serra do Espinhaço na amenização da temperatura, é mais apropriado classificar o clima do município como Tropical Sub-Úmido - CA'w de Thornthwaite (Trewartha, 1954, *apud* Gouveia, 2002).

A rede brasileira de coleta de dados meteorológicos não possui estação em Gouveia. Contudo, existe, na Estação de Tratamento de Água (ETA) da COPASA do município, um pluviômetro vinculado a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), localizado a cerca de 4 Km, em linha reta, da vertente estudada (FOTO 3.1). Desse modo, os outros dados meteorológicos deste município podem ser inferidos da Estação Convencional de Diamantina, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Segundo análise de Gouveia (2002), os municípios em questão têm o mesmo padrão climatológico.



FOTO 3.1 - Pluviômetro vinculado ao sistema da ANEEL em Gouveia

A precipitação média anual varia em torno de 1.400 mm, e concentra-se essencialmente de outubro a março, quando se somam cerca de 1.200 mm de chuva (GRAF. 3.1). Este período é também o mais quente, com a temperatura máxima podendo chegar a 28 °C em fevereiro, e a média por volta de 19°C.

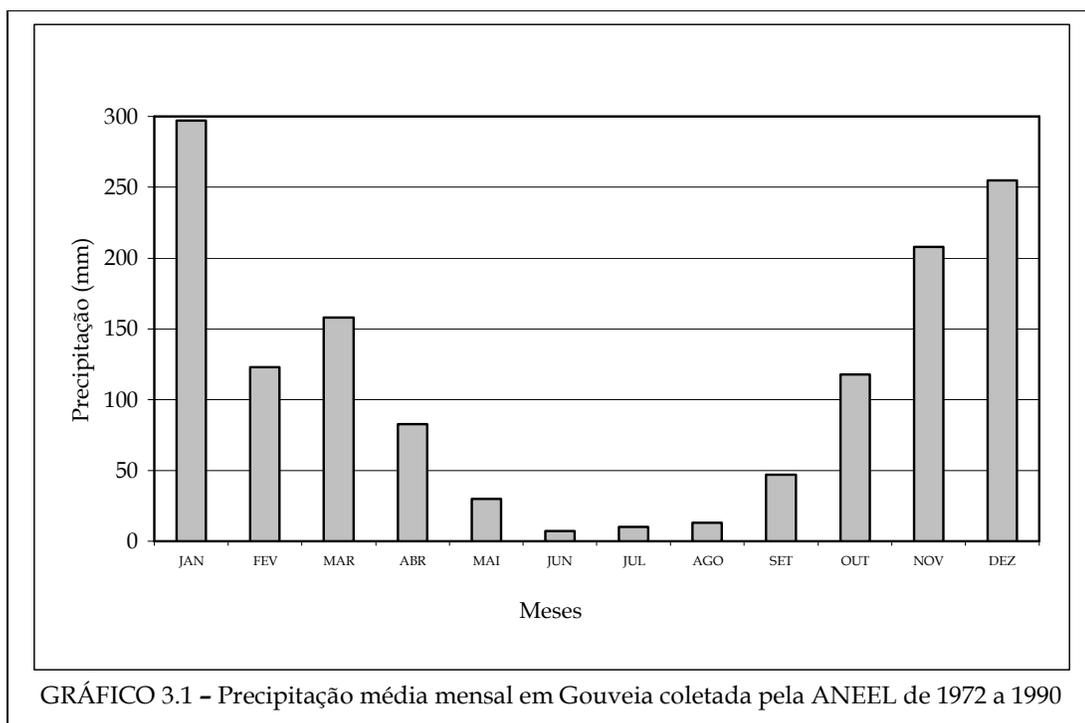
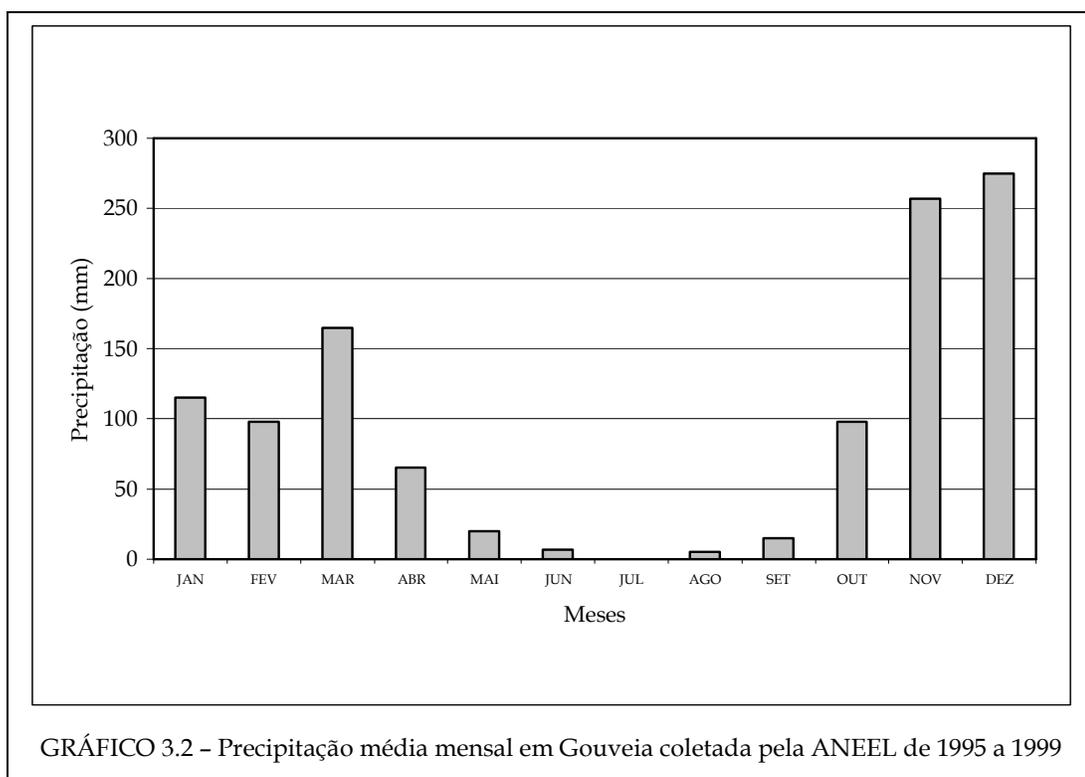


GRÁFICO 3.1 - Precipitação média mensal em Gouveia coletada pela ANEEL de 1972 a 1990

O período de maior estiagem, que coincide com o mais frio, vai de maio a setembro, e mais pronunciadamente de junho a agosto, quando a soma da precipitação em média não ultrapassa 33 mm. A média de temperatura do mês mais frio - julho - é de 18 °C, podendo-se registrar temperaturas muito mais baixas (cerca de 5 °C) durante a madrugada e nas altitudes mais elevadas (Bueno, 1997).

Ainda com relação às chuvas, vale destacar que, de acordo com análise comparativa feita por Gouveia (2002) entre as séries históricas de 1972/1990 e 1995/1999 para o município de Gouveia, a precipitação diminuiu muito no último período. A média anual da estação chuvosa caiu de 1.243,3 mm para apenas 460,6 mm (uma redução muito próxima da registrada também em Diamantina), mas isto pode representar um apenas um comportamento cíclico normal do clima (GRAF. 3.2).



Segundo Gouveia (2002), na área deprimida onde se encontra a vertente estudada, a nebulosidade ocorre com menor intensidade e frequência, o que a deixa mais exposta à radiação solar que seu entorno, de maiores altitudes, fazendo com que temperaturas mais elevadas sejam registradas no interior da Depressão.

3.4 - Características da Vegetação Local

O município de Gouveia tem sua cobertura vegetal original inserida no ecossistema do Cerrado. Na região estudada, esta formação vegetacional é condicionada tanto pela constituição geomorfológica, pela litologia, pelo clima e pelas condições edáficas, como pela interferência antrópica no meio, que associados compoem uma conformação diferenciada do Cerrado no município.

Nas elevadas bordas da Depressão de Gouveia, onde predominam os quartzitos em relevo mais acidentado, a vegetação é rarefeita e em sua maioria graminosa, com formações de Campo Rupestre e Campo de Altitude, com arbustos esparsos crescendo em solo raso e espécies pioneiras colonizando rochas expostas.

Nas áreas deprimidas, onde ocorrem predominantemente granitos e xistos, encontra-se o Cerrado e o Cerradão, com suas típicas espécies arbóreas retorcidas. Estas tendem a se adensar e a ter maior porte à medida que se aproximam dos fundos dos vales, e à beira dos cursos d'água são formadas Matas de Galeria. Também aproveitando-se da maior umidade, uma vegetação mais densa e de maior porte tende a se instalar no interior das voçorocas em estabilização, que por sua vez servem de corredores ecológicos de refúgio da fauna e flora locais (Augustin, 1999).

A influência do clima na caracterização da paisagem de Gouveia mostra-se relevante uma vez que a variação de altitude desde as bordas quartzíticas até a área da Depressão chega a 500 metros em alguns pontos (Portilho, 2003), o que interfere nas condições de temperatura e precipitação, resultando em diferenciações vegetacionais.

Contudo, o que mais diferencia a vegetação em Gouveia é uso antrópico do solo. Em função da principal atividade rural da região, a pecuária extensiva, e também da agricultura de subsistência, o Cerrado original já foi em grande parte retirado e substituído. Desse modo, as práticas agrícolas com manejo inadequado até mesmo permitem classificar, atualmente, o degradado Cerrado local como Campo Sujo (CETEC, 1983 *apud* Barbosa, 2004).

A vertente estudada encontra-se dentro de uma propriedade rural com predomínio de pastagens. Contudo, espécies do Cerrado são encontradas em meio às gramíneas. Na alta vertente a vegetação é mais rasteira e escassa, e na média vertente são mais comuns espécies arbóreas em meio a uma maior densidade de gramíneas (FOTOS 3.2 e 3.3).



FOTO 3.2 - Aspecto da vegetação na alta porção da vertente estudada



FOTO 3.3 - Aspecto da vegetação na média porção da vertente estudada

3.5 - Inserção Geológica Regional

O município de Gouveia situa-se na porção meridional da serra do Espinhaço, a qual se estende por cerca de 300 km desde a porção central de Minas Gerais até o norte da

Bahia. Esta importante unidade geológica é constituída predominantemente por rochas do Supergrupo Espinhaço e secundariamente por rochas do Grupo Macaúbas (FIG. 3.4).

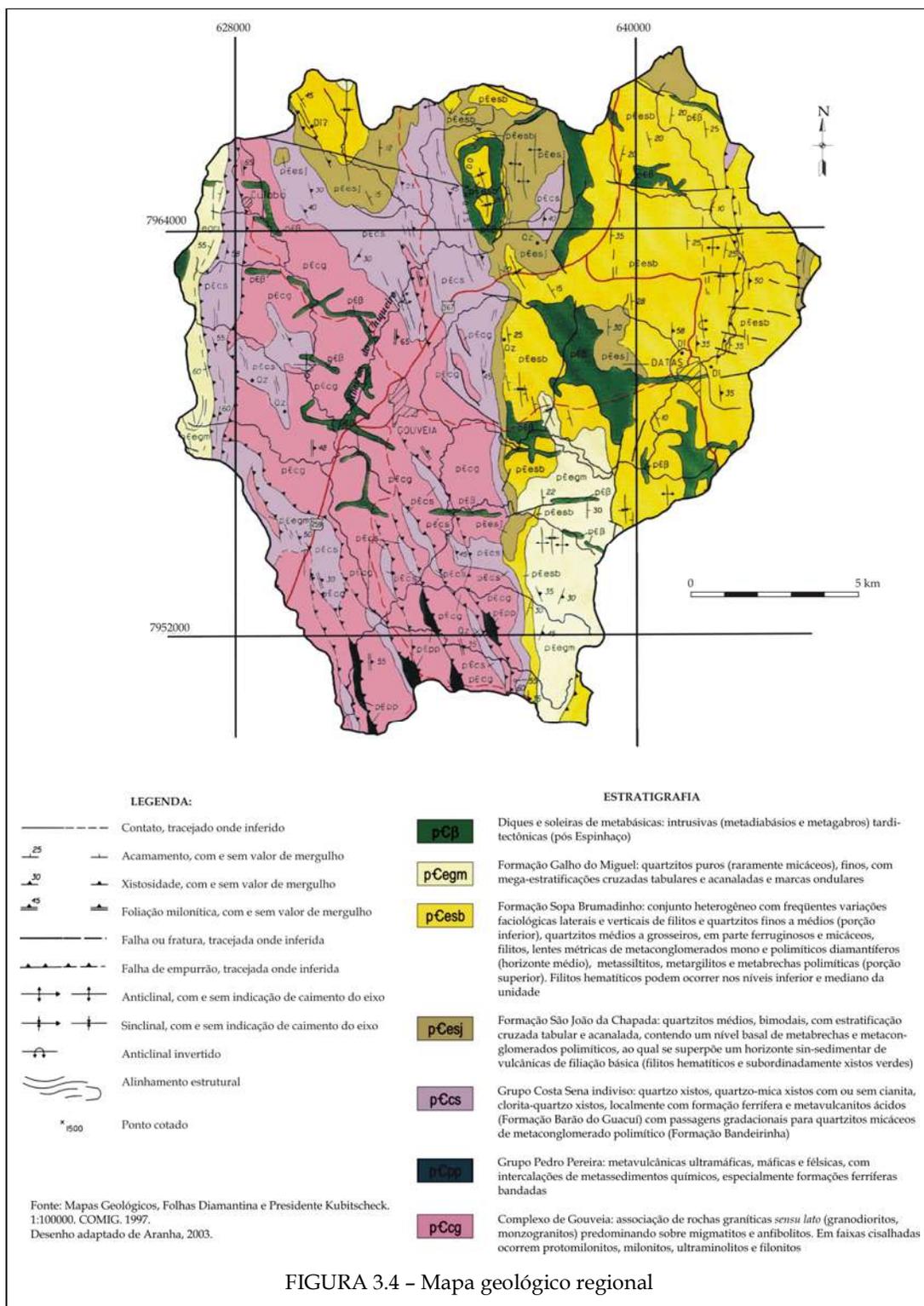


FIGURA 3.4 - Mapa geológico regional

A seqüência tectono-estratigráfica do Espinhaço Meridional compreende o Complexo Basal – datado do Arqueano, forma o exposto Complexo Gouveia –, a seqüência supracrustal do Supergrupo Rio Paraúna – também de idade arqueana, é formada pelo Grupo Costa Sena sobreposto ao Grupo Pedro Pereira – e o Supergrupo Espinhaço – de grande abrangência no Espinhaço Meridional, compreende localmente o Grupo Guinda, que, por sua vez, divide-se nas Formações São João da Chapada, Sopa Brumadinho e Galho do Miguel.

Datadas do Proterozóico superior, e portanto posteriores à formação do Espinhaço, aparecem também na área intrusões de rochas metabásicas que formam diques e soleiras que apresentam, nas proximidades da área de estudo, clara correlação com as direções principais dos falhamentos das rochas do Complexo Gouveia.

Este compartimento cristalino exposto, o Complexo Gouveia, encontra-se nos vales dissecados da chamada Depressão de Gouveia (Augustin, 1995), e é bordejado por escarpas tanto do Grupo Costa Sena quanto de xistos e quartzitos do Supergrupo Espinhaço.

O embasamento encontra-se localmente intrudido por diques e soleiras de rochas metabásicas, que podem ser percebidos na paisagem por uma tonalidade mais avermelhada dos solos formados a partir destas rochas, que se distinguem dos solos mais claros oriundos dos outros materiais.

3.5.1 - Geologia da Bacia do Córrego do Quebra

A geologia da bacia do córrego do Quebra compreende as litologias do Complexo Basal, do Supergrupo Rio Paraúna (Formação Barão de Guaicuí), do Supergrupo Espinhaço (Formação Galho do Miguel) e, ainda, apresenta intrusões de rochas metabásicas (Penna, 2006) (FIG. 3.5).

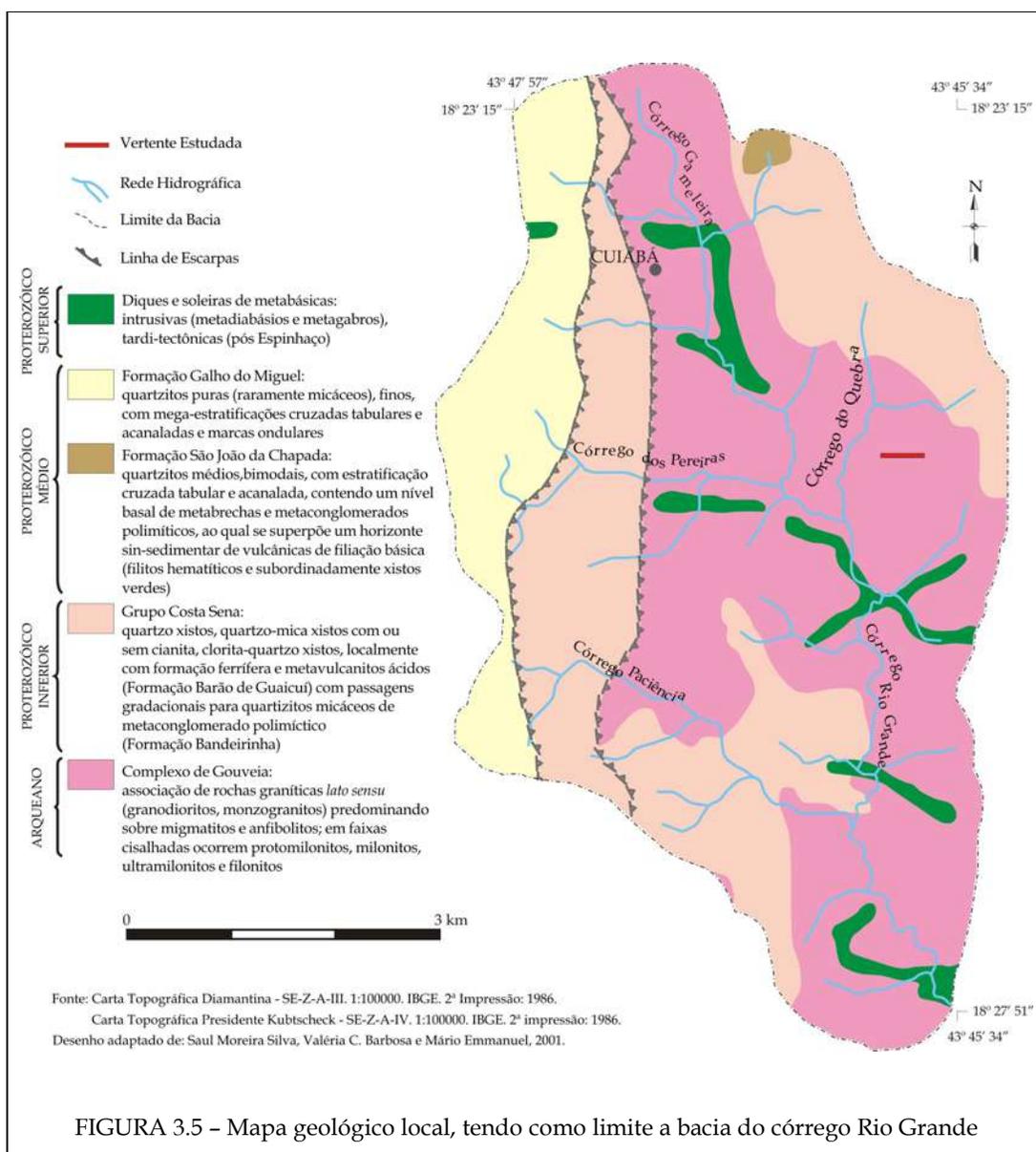


FIGURA 3.5 - Mapa geológico local, tendo como limite a bacia do córrego Rio Grande

O Complexo Basal apresenta-se na área estudada como uma faixa deprimida de direção N/S, denominada Depressão de Gouveia. Para Saadi & Valadão (1987), esta depressão foi formada pela associação de processos tectônicos e desnudacionais ocorridos ao longo do Fanerozóico. Augustin (1995) coloca que a conformação estrutural deste compartimento deprimido fez com que esta área fosse rebaixada por atuação de erosão diferencial. Assim, as rochas granito-gnáissicas do embasamento arqueano, antes recobertas pelas rochas metamórficas do Supergrupo Espinhaço, foram

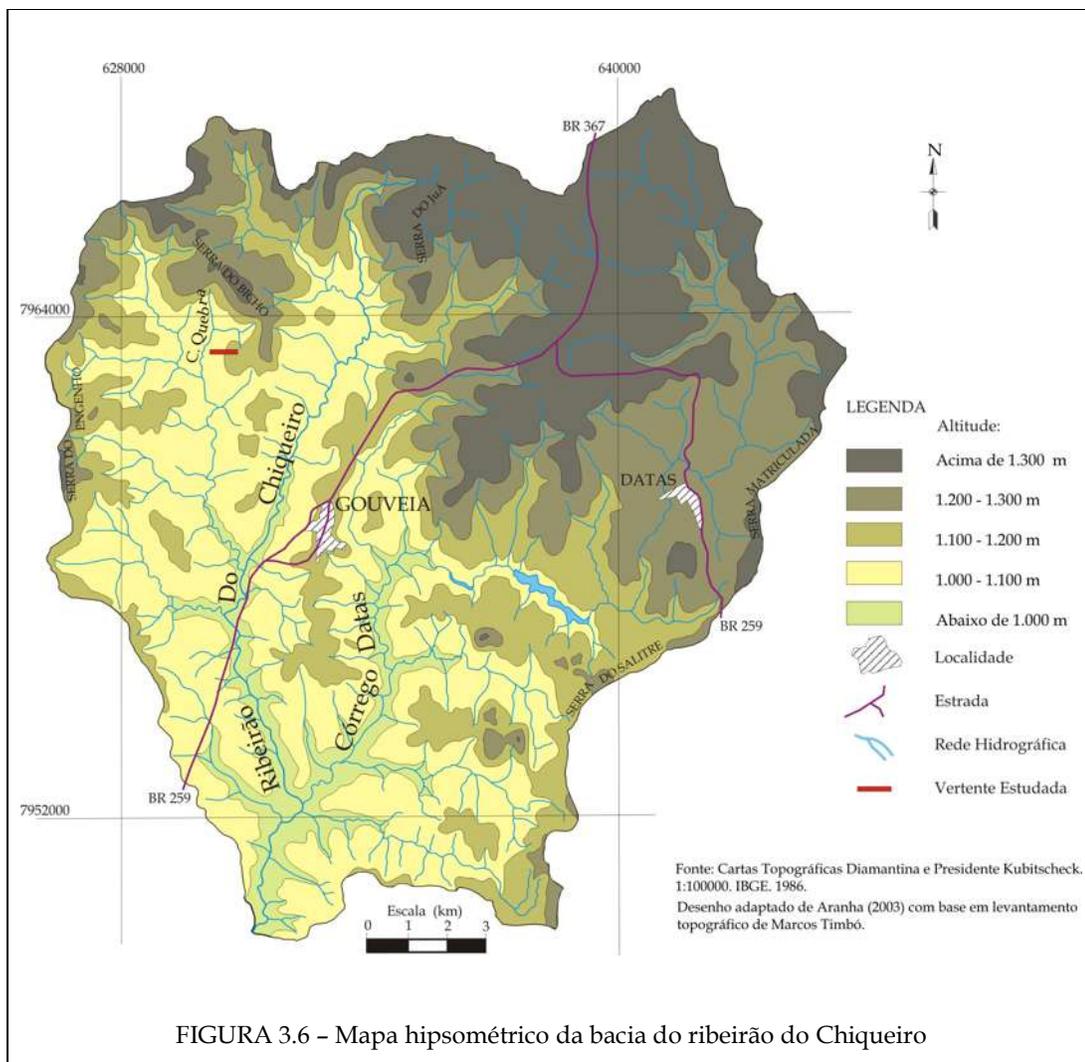
expostas nesta localidade, e se apresentam hoje bastante alteradas, constituindo saprolitos profundos.

A maior parte da área drenada pela bacia do córrego do Quebra está sobre essas rochas do embasamento do Complexo Gouveia, ou seja, dentro da porção deprimida do relevo. As rochas formadoras deste complexo são datadas do Arqueano e são predominantemente gnáissicas-migmatíticas, mas com ocorrência de rochas graníticas. Dentre outros, também ocorrem migmatitos e anfibolitos, e em faixas cisalhadas ocorrem milonitos de granito e de filito, estes últimos predominantes na vertente estudada.

Na porção norte-nordeste do córrego do Quebra, nas bordas da Depressão de Gouveia, ocorrem escarpas predominantemente quartzíticas, porém bastante alteradas, da Formação Barão de Guaicuí (Grupo Costa Sena, Supergrupo Rio Paraúna). Localmente, este é representado pela Serra do Bicho, ao sopé da qual estão as nascentes do córrego do Quebra.

3.6 - Contexto Geomorfológico Local

A conformação geomorfológica da Depressão de Gouveia remete aos processos que atuaram sobre a litoestrutura local. A exumação das rochas do embasamento, resultante de processos tectônicos associados a intemperismo e erosão diferencial (Saadi & Valadão, 1987), levou ao quadro geomorfológico atual, qual seja uma porção deprimida, de direção N/S, com cerca de 300 metros de profundidade e margeada por escarpas de até 1.450 metros de altitude (Augustin, 1995) (FIG. 3.6).



A Depressão de Gouveia apresenta predominância de colinas de longas e suaves encostas côncavo-convexas, onde predominam rochas pertencentes ao Complexo Gouveia. Neste domínio aparecem feições de anfiteatros e de erosão acelerada. Topos achatados e largos são divisores de água das bacias de drenagem da região, que são afetadas pelo intenso processo de voçorocamento das vertentes, de onde aportam sedimentos que assoreiam os cursos d'água, tornando-os pouco competentes no transporte destas cargas.

Estas colinas predominantes na Depressão de Gouveia formam uma superfície que está sendo retrabalhada pelo entalhe da rede de drenagem mais recente, que realiza o recuo das cabeceiras dos cursos d'água. Este processo corresponde ao Ciclo Paraguaçu, em que a dissecação fluvial e a formação de anfiteatros e alvéolos de deposição de espessas

cascalheiras susceptíveis a erosão permitiu a instalação de ravinas e voçorocas de grandes dimensões no relevo local (Augustin, 1995).

Diniz (2002) e Augustin & Aranha (2006) salientam que os processos de erosão acelerada são ainda mais freqüentes quando relacionados às intrusões de rochas básicas e metabásicas, muito comuns na região.

A configuração geomorfológica da Depressão de Gouveia pode ser identificada segundo a proposta de Augustin (1995), que identificou, por análise da distribuição altimétrica, quatro grandes unidades morfoestruturais na localidade: a) rochas quartzíticas situadas entre as cotas altimétricas de 1.300 e 1.450 metros, pertencentes basicamente a Formação São João da Chapada; b) rochas quartzíticas finas e muito diaclasadas encontradas entre as cotas de 1.200 e 1.300 metros, constituem remanescentes da Superfície Sul-Americana (Valadão, 1998) e pertencem à Formação Galho do Miguel; c) afloramentos de xistos entre 1.100 e 1.200 metros, pertencentes ao Grupo Costa Sena e d) rochas graníticas milonitizadas do embasamento cristalino, situadas abaixo de 1.100 metros.

Augustin (1995) afirma que o nível 'b' é bem preservado na região de Gouveia, devido aos aspectos litoestruturais e à alta permeabilidade das rochas do Supergrupo Espinhaço. O nível 'c' corresponde à Superfície Velhas e é chamado Superfície Residual Antiga, enquanto o nível 'd' seria uma "Superfície mais recente de Retrabalhamento", e corresponderia ao Ciclo Paraguaçu, que permitiu um eficiente recuo de pequenas redes de drenagem.

Aranha (2003), trabalhando em maior escala, identificou os mesmos padrões altimétricos na bacia do ribeirão do Chiqueiro, a qual pertence à bacia do córrego do Quebra. O autor destaca que no nível 'a' a grande ocorrência de falhamentos e diaclasamentos nos xistos e quartzitos desse nível acelera a desagregação pela escassa drenagem, que é controlada por fraturas. Com relação ao nível 'b', Aranha ressalta que o relevo se desenvolve sobre xistos e filitos, formando topos convexos seguidos de vertentes abruptas. O nível 'c' funciona como um divisor de águas entre as pequenas bacias existentes na região, que acompanham a estruturação geológica da área nas direções predominantes N/S e E/W. Segundo o autor, o nível 'd' apresenta colinas

convexas e policonvexas modeladas sobre granitóides do embasamento cristalino, às vezes capeados por xistos do supergrupo Paraúna.

o Pleistoceno Superior foram recorrentes sucessivas fases de entalhe de canais de pequena ordem e seu entupimento por material coluvionar, com deposição de cascalheiras de espessuras métricas. Iniciado o Holoceno, o processo de pedogênese ocorreu sobre este colúvio - marcando um ciclo de relativa estabilidade -, o que levou à formação de solos bastante desenvolvidos, os Latossolos (Augustin & Aranha, 2006).

O retorno da instabilidade caracteriza a fase atual marcada por outra retomada erosiva, intensificada pelo tipo de uso do solo na região, tendo ocorrido a substituição de grande parte da vegetação nativa por pastagem. Os processos erosivos atuantes são variados, sendo que nos períodos mais secos predominam os processos de desagregação mecânica e, nos períodos chuvosos, a erosão química e em lençol (Augustin, 1999; Salgado, 2002).

De modo geral, em vertentes com vegetação escassa a atuação da erosão laminar promove a lavagem superficial do solo, como também se instalam processos de rastejamento, deslizamento, ravinamento e voçorocamento, que deslocam grande volume de sedimentos para os níveis mais baixos do relevo, atingindo inclusive os cursos d'água (Aranha, 2003).

Bastante expressivas na paisagem, as voçorocas ocupam extensos terrenos em Gouveia, desenvolvendo-se principalmente a partir do saprolito das rochas graníticas e gnáissicas, das intrusões de rochas metabásicas e dos xistos ocorrentes na região.

3.6.1 - Aspectos Geomorfológicos da Bacia do Córrego do Quebra

A bacia do córrego do Quebra encontra-se na porção N/NW da Depressão de Gouveia e tem suas nascentes a Norte, nas escarpas quartzíticas da Serra do Bicho (Grupo Costa Sena). Geomorfologicamente, assim como em toda a Depressão, nas porções mais baixas do relevo abrangido pela área da bacia, predominam colinas côncavo-convexas (FOTO 3.4).

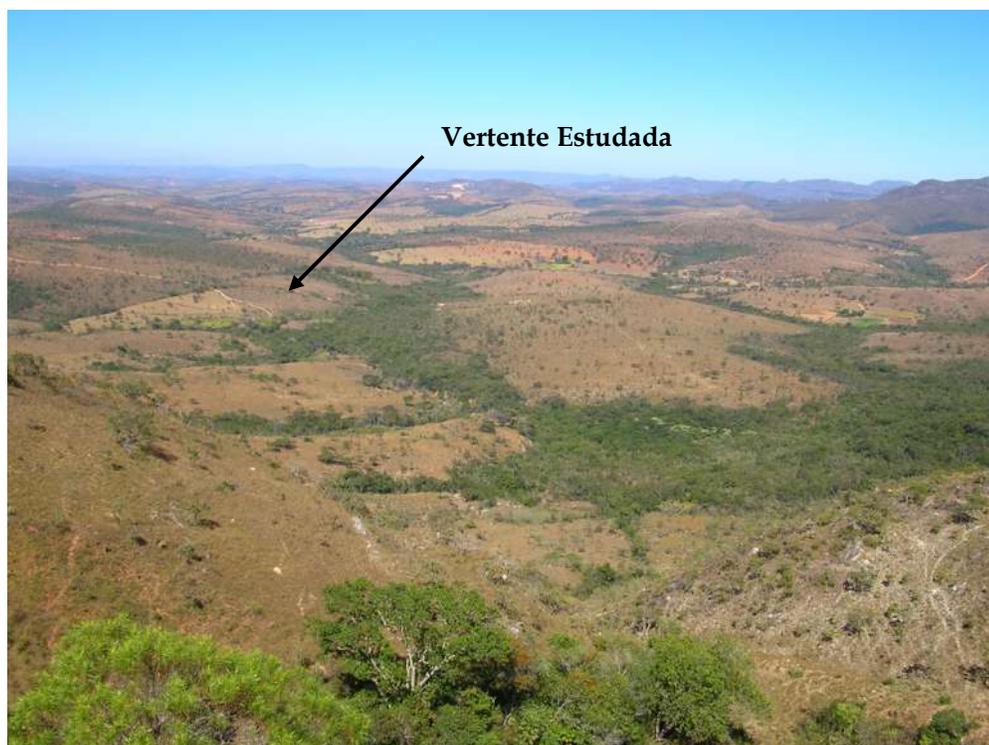


FOTO 3.4 - Visão geral do relevo na área de estudo e entorno

Segundo Barbosa (2004), a drenagem do córrego do Quebra entalhou vales profundos, com desnível de até 150 metros, e seu curso principal parece que se encaixou em um sistema de falha, dando origem a vertentes assimétricas e morfologicamente distintas. Sendo assim, na margem direita do córrego do Quebra a conformação das vertentes se dá por formas mais curtas (em média 300 metros) e de maior declividade, enquanto que na margem esquerda as vertentes são mais suaves e longas (em média 700 m). Tais diferenças são explicadas por Augustin (1995) como sendo resultantes de influências estruturais (falhas de empurrão E/W) ocorridas na região.

As parcelas amostradas neste estudo encontram-se em uma dessas vertentes mais longas da margem esquerda (FIG. 3.2), de declividade aproximada de 6 graus. Uma parcela encontra-se na porção superior da vertente – alta vertente –, que se apresenta ligeiramente convexa; e a outra parcela na porção mediana – média vertente –, de conformação côncava.

Com variação regular de declive, esta vertente possui níveis altimétricos que variam de 1.150 metros nos topos a cerca de 1.030 metros no fundo de vale. Nesta vertente, a N/NW das parcelas experimentais, é encontrada uma voçoroca de grandes proporções (com área de cerca de 30.000 m²), mapeada por Aranha (2003) e então denominada V227 (FIG. 3.2).

3.7 - Características dos Solos da Região

A distribuição espacial e as características dos solos na área pesquisada são condicionadas pelo substrato rochoso, pela conformação geomorfológica, pelo clima e por condições topográficas. De acordo com o mapeamento pedológico da bacia do ribeirão do Chiqueiro, desenvolvido por Diniz (2002) e Silva (2004), são recorrentes três classes de solo na área de estudo: Latossolos, Cambissolos e Neossolos.

Os Neossolos, que constituem uma classe de solos muito pouco desenvolvidos, foram encontrados em distintos locais na região, e são de dois tipos: Neossolos Litólicos, desenvolvidos a partir das rochas do Grupo Costa Sena, nas áreas escarpadas do relevo, e Neossolos Flúvicos, que são comuns nas várzeas dos principais cursos d'água da Depressão de Gouveia.

Também dentro da porção deprimida, são encontrados os Latossolos dos tipos Vermelho e Vermelho-Amarelo, que são desenvolvidos essencialmente a partir do substrato cristalino ou a partir de material coluvionar que está sobre a rocha. De modo geral, a posição dos Latossolos na paisagem local tem relação com áreas de topo e de meia vertente de encostas alongadas e de pouca declividade (FIG. 3.7).

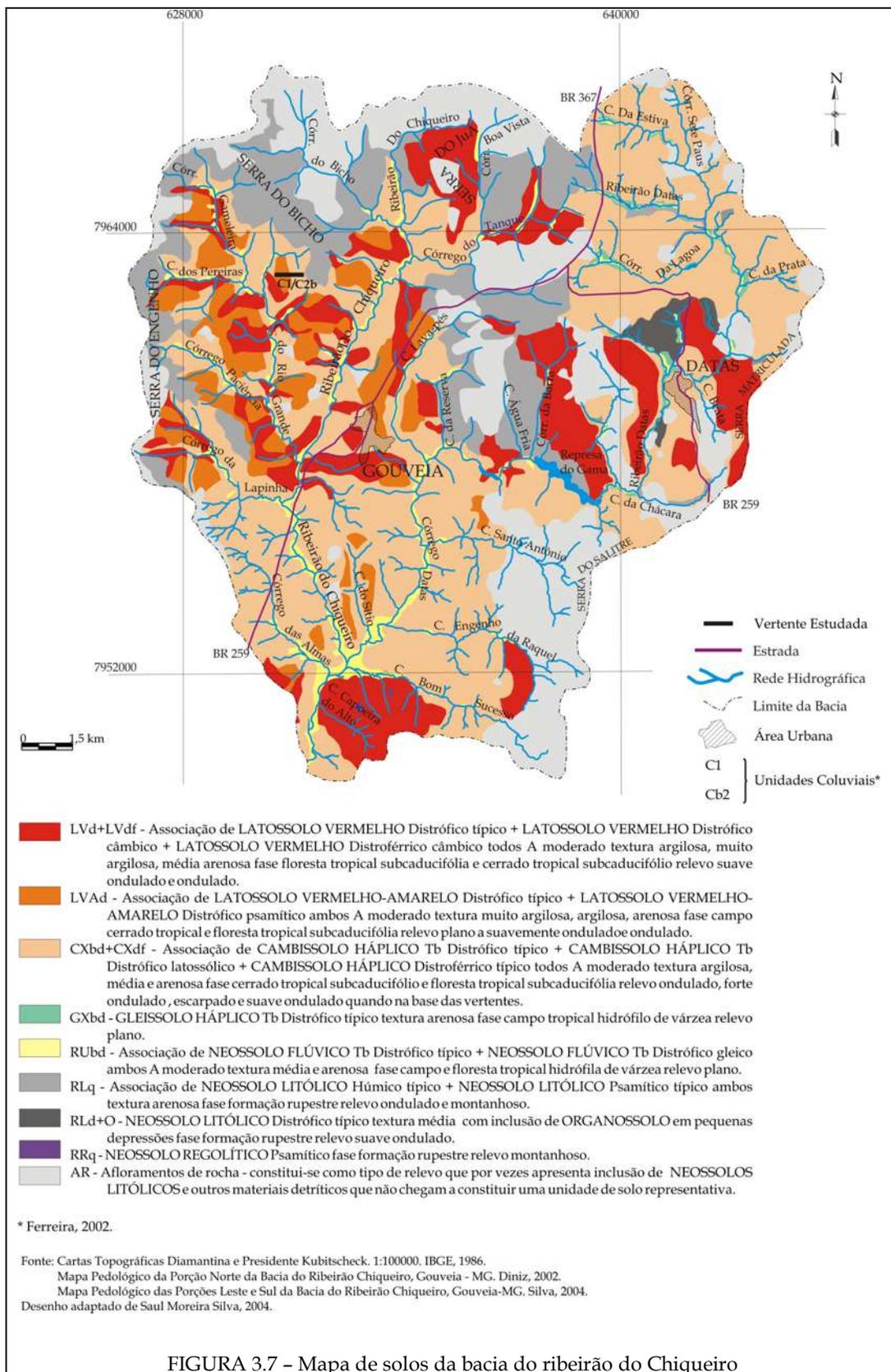


FIGURA 3.7 - Mapa de solos da bacia do ribeirão do Chiqueiro

O posicionamento e o desenvolvimento deste tipo de solo na Depressão de Gouveia estão associados a uma relativa calma tectônica, que mantinha os níveis de base locais, não permitindo uma maior erosão por recuo das cabeceiras de drenagem (Saadi, 1995). Contudo, ciclos erosivos promovidos por um lento e contínuo soerguimento epirogenético (Saadi & Valadão, 1987) e ocorridos na transição do Pleistoceno para o Holoceno resultaram no retrabalhamento das superfícies da Depressão, principalmente através da instalação de grandes feições erosivas, que têm contribuído com a retirada de materiais, tendendo a exumar as encostas e permitindo, assim, a renovação dos solos e do relevo (Augustin, 1995).

Sobre esta “superfície mais recente de retrabalhamento” encontram-se os Cambissolos da área estudada que, segundo Diniz (2002), apresentam grande predisposição à erosão devido à maior proporção de silte e à pouca profundidade dos seus horizontes A e B, principalmente em vertentes mais curtas.

Conforme exposto anteriormente, o Ciclo Paraguaçu de erosão parece ter desencadeado o rejuvenescimento do solo e do relevo de Gouveia. Porém, outros fatores contribuem com a susceptibilidade destes solos à erosão. As características edáficas dos solos da área – os Cambissolos possuem forte predisposição à erosão acelerada, e por seu turno os LATOSSOLOS VERMELHOS-AMARELOS têm grande tendência à erosão em lençol¹ – se somam à concentração da pluviosidade no curto período de verão e às práticas agrícolas inadequadas. Esta associação é considerada por Augustin (1999) como aceleradora do processo erosivo na Depressão de Gouveia.

3.7.1 - Características dos Solos da Vertente Estudada

Segundo trabalho realizado por Ferreira (2002), em que foram mapeadas as formações superficiais da bacia do córrego Rio Grande, a “vertente longa” da margem esquerda do córrego do Quebra é dividida em Unidades Coluviais (C1, C2a e C2b) e em Terraços Fluviais (T1 e T2).

¹ Segundo Oliveira, Diniz & Augustin (2003), isto se deve ao alto grau de argila dispersa nesse solo, o que favorece a formação de uma crosta enrijecida à superfície, favorecendo o fluxo laminar das águas pluviais.

As parcelas experimentais da presente pesquisa encontram-se nas porções média e alta desta vertente, e têm cobertura do tipo C1 e C2b, respectivamente (FIG. 12).

Na média vertente, recobrimo a porção côncava do relevo, a Unidade Coluvial C1 é geralmente argilo-arenosa, de coloração vermelha e com forte pedogênese na camada superior. Sobre esta cobertura são desenvolvidos, segundo levantamento pedológico realizado por Diniz (2002), LATOSSOLOS VERMELHOS-AMARELOS Distróficos típicos.

A Unidade Coluvial C2b, que aparece na convexidade da alta vertente, apresenta-se menos espessa que a C1 e resulta em material pedogenético predominantemente argiloso, analisado e classificado por Rocha (2004) como CAMBISSOLO Latossólico (FIG. 3.8).

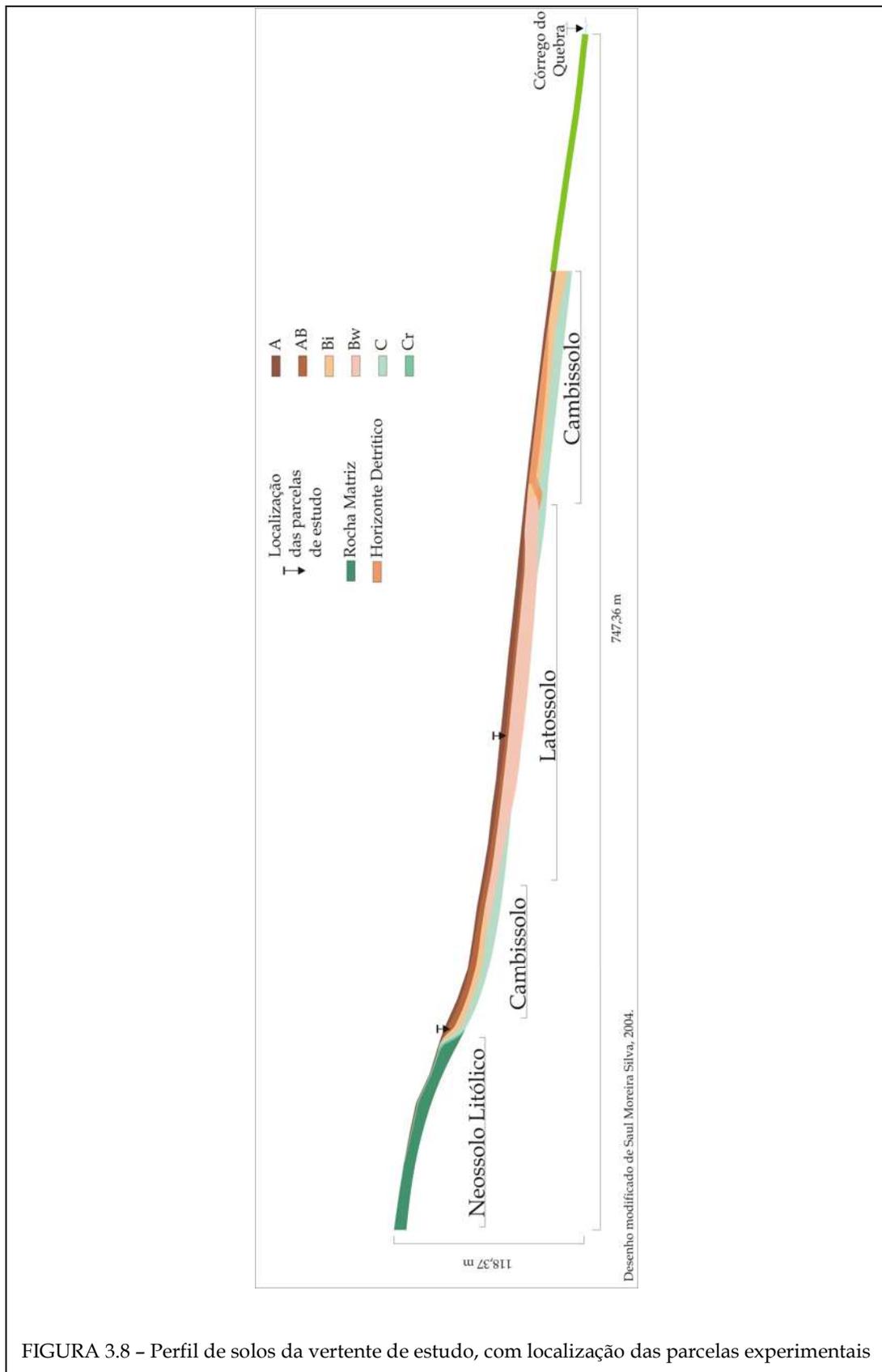


FIGURA 3.8 - Perfil de solos da vertente de estudo, com localização das parcelas experimentais

4.1 - Introdução à Metodologia: Escolha de Parâmetros

4.1.1 - Revisão Bibliográfica e Escolha da Área de Estudo

Ao se fazer uma pesquisa em que se propõe estudar o comportamento da água no solo, deve-se definir, tendo em vista os objetivos propostos, o tempo e os recursos financeiros, as escalas espacial e temporal para a realização dos experimentos. Para isto, recorreu-se ao suporte teórico mais abrangente e às contribuições de trabalhos previamente desenvolvidos na mesma área investigada.

Teses de doutorado, dissertações de mestrado, monografias e trabalhos geológicos de conclusão de curso e outras obras referentes ao tema e à área foram consultados. Dentre estes estudos, foram investigados mais detalhadamente aqueles realizados no município de Gouveia, e ainda mais sistematicamente os desenvolvidos na mesma vertente escolhida para esta pesquisa.

Desse modo, os dados obtidos previamente tornaram-se extremamente correlacionáveis e indispensáveis aos dados desta pesquisa e a seus resultados. Conforme mencionado anteriormente, a bacia do córrego do Quebra é de interesse de projetos do IGC/UFMG que buscam entender a dinâmica geo-ambiental da região de Gouveia. A escolha da vertente pelos pesquisadores precedentes e atuais está em conformidade com a metodologia de Boulet et al. (1982), segundo a qual o ideal é a análise de vertentes em bacias de primeira ordem, podendo os dados serem extrapolados para a região.

Assim, com base nos resultados alcançados ao longo de mais de vinte anos, a vertente escolhida para esta pesquisa tem se mostrado como uma das mais representativas da região em termos dos fenômenos a serem abordados. Nesta vertente ocorrem os componentes ambientais mais recorrentes na área: vegetação original em grande parte substituída por pastagem, drenagens de pequena ordem, condições lito-pedológicas e geomorfológicas a partir das quais se desenvolvem anfiteatros, susceptíveis à erosão

considerada, e onde predomina uma associação de Latossolos e Cambissolos, em geral com alto grau de lixiviação.

4.1.2 - Escalas Espaciais Investigadas

No estudo do comportamento da água no solo, diversas variáveis ambientais têm influência em diferentes escalas. Assim como tratou Barbosa (2004) nesta mesma área de estudo, a macro-escala corresponde à unidade da vertente, a meso-escala à área métrica das parcelas experimentais e a micro-escala corresponde às sub-parcelas em forma de cruz, dentro das quais as medidas chegam ao nível dos centímetros.

Os resultados obtidos nas micro e meso-escalas só foram extrapolados para a macro-escala definida para esta pesquisa, considerando que *aqueles fatores e subprocessos definidos como os mais importantes em escala de detalhe não podem exercer, na escala da bacia e mesmo da vertente, tanta influência sobre o processo analisado* (Barbosa, 2004: 25).

Na definição da meso-escala, optou-se pela utilização de parcelas preexistentes na vertente. Estas foram em um primeiro momento delimitadas por Portilho (2003) e reutilizadas e ampliadas por Barbosa (2004). Três parcelas de 100 m² - uma na alta e duas na média vertente - foram utilizadas¹. Esta dimensão, de 10 metros de largura por 10 metros de comprimento, é considerada eficiente em termos de precisão para estudos do processo erosivo (Hudson, 1971). Portilho (2003) coloca que esta área gera dados mais homogêneos que os obtidos em parcelas menores e de formatos longitudinais.

Para definição dos locais de delimitação das parcelas, Portilho (2003) primeiramente subdividiu a vertente em sítios geomorfológicos. Estes consistem em unidades da vertente que apresentam certa uniformidade geomorfológica e onde características ambientais podem ser consideradas constantes (Augustin, 1979).

¹ Inicialmente esperava-se trabalhar apenas em duas parcelas - uma na alta e outra na média vertente - mas devido a necessidades ocorridas em campo, optou-se por deslocar uma estação experimental em cruz para a primeira parcela lateralmente vizinha.

Os sítios geomorfológicos são delimitados por descontinuidades de gradientes (rupturas de declive), e para chegar a tal delimitação Portilho (2003) se baseou em procedimentos descritos por Young *in* Augustin (1979)².

Diferentemente dos estudos prévios desenvolvidos nesta mesma área, na presente pesquisa não foram coletados dados na baixa vertente, pois a maior densidade de vegetação arbórea nesta porção do relevo não permitiu que fosse viável a obtenção dos dados geofísicos de GPR. Contudo, espera-se que as diferenças pedológicas, da conformação geomorfológica e da densidade vegetacional entre estas duas porções da vertente correspondam aos seus respectivos padrões de infiltração e sejam representativos da vertente.

4.1.3 - Escala Temporal Investigada

A distribuição da pluviosidade ao longo do ano na região de estudo é um importante condicionante dos fatores que influenciam na atuação da água no solo. A umidade do solo correlaciona-se à densidade da cobertura vegetal, que por sua vez exerce influência na infiltração da água e na sua capacidade de erosão, fazendo variar também a micro-topografia ao longo do ano (Barbosa, 2004).

Assim, tendo em vista que a chuva é a principal desencadeadora dos processos que atuam no local e que a distribuição anual da sua capacidade erosiva não é uniforme na área estudada (Barbosa & Augustin, 2001), e também levando em conta que o solo pode sofrer mudanças em sua dinâmica ao longo do ano (Kubiěna, 1986), definiram-se como períodos de amostragem para esta pesquisa o início e o fim do período chuvoso. Com isto, espera-se obter diferentes resultados ao se comparar os meses de outubro/novembro - quando a vegetação enfraquecida e o solo no seu mínimo de umidade passam a receber as primeiras chuvas -, e abril/maio - quando a vegetação está renovada, o solo está no seu máximo de umidade acumulada e as chuvas praticamente cessam.

² Resumidamente, estes consistem em medir a declividade da vertente por meio de balizas e clinômetro Suunto de leitura direta, em distâncias regulares de 20 metros, do topo para a base da vertente.

Depois de estabelecidos os períodos maiores de amostragem, definiram-se os “sub-períodos” em que seriam coletados os dados geofísicos de eletrorresistividade e georadar. Para se ter uma amostragem temporal do evento de percolação da água em profundidade, optou-se por intervalos entre as medidas. O intervalo maior, desde a aplicação da água à superfície até a última medida, foi de cinco semanas. A decisão por este intervalo deu-se na expectativa de que com mais tempo para a descida da água, obter-se-iam dados da pluma em maior profundidade ao final do tempo decorrido (Morais, 2007).

Na semana inicial foram feitas as medidas base (referência para as outras), assim como as primeiras medidas. Nas duas semanas seguintes os levantamentos foram novamente realizados. Na quarta semana não se coletou dados; na quinta semana foram feitas as últimas medidas, que foram seguidas da abertura das trincheiras. Um melhor detalhamento dos períodos de coleta de dados pode ser visto nos QUADROS 4.1 e 4.2.

QUADRO 4.1

Síntese da distribuição diária das coletas dos dados em outubro e novembro de 2006

	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia
1ª semana	25/out	GPR e Eletro base; solução traçadora jogada nas parcelas em cruz; 1as medidas de GPR e Eletro após jogada a solução traçadora; dados de vegetação e cobertura de solo 26/out	Medidas de GPR e Eletro 27/out	Medidas de GPR e Eletro 28/out
2ª semana	1/nov	Medidas de GPR e Eletro 2/nov	3/nov	4/nov
3ª semana	8/nov	9/nov	Medidas de GPR e Eletro 10/nov	11/nov
4ª semana	15/nov	16/nov	17/nov	18/nov
5ª semana	22/nov	Medidas de GPR e Eletro; início da abertura das trincheiras 23/nov	Término da abertura das trincheiras; coleta de solo para análise 24/nov	25/nov

QUADRO 4.2

Síntese da distribuição diária das coletas dos dados em abril e maio de 2007

	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia
1ª semana	GPR base 11/abr	Eletro base; solução traçadora jogada nas parcelas em cruz; 1as medidas de GPR e Eletro após jogada a solução traçadora; dados de vegetação e cobertura de solo 12/abr	Medidas de GPR e Eletro; medidas com o tensiômetro 13/abr	Medidas de GPR e Eletro; medidas com o tensiômetro 14/abr
2ª semana	18/abr	19/abr	Medidas de GPR e Eletro 20/abr	21/abr
3ª semana	25/abr	26/abr	Medidas de GPR e Eletro 27/abr	28/abr
4ª semana	2/mai	3/mai	4/mai	5/mai
5ª semana	9/mai	10/mai	Medidas de GPR e Eletro; início da abertura das trincheiras 11/mai	Término da abertura das trincheiras 12/mai

4.2 - Atividades Desenvolvidas em Campo

Para a realização desta pesquisa, várias etapas de campo foram cumpridas. Dentro das limitações impostas (recursos financeiros, distância da área de estudos, tempo disponível, funcionamento dos equipamentos e condições climáticas), procurou-se repetir os mesmos procedimentos metodológicos da 1ª campanha de campo (outubro/novembro de 2006) na 2ª campanha (abril/maio de 2007)³, conforme apresentado anteriormente nos QUADROS 4.1 e 4.2.

Os procedimentos realizados e que são detalhados a seguir foram: medição de densidade da cobertura vegetal e da cobertura de superfície, instalação das estações experimentais em cruz, aplicação da solução aquosa traçadora, obtenção dos perfis

³ Com exceção da coleta de solo para análise em laboratório, que foi feita apenas na 1ª campanha.

geofísicos, realização de medidas de tensiometria, abertura de trincheiras e coleta de solo para análise.

Primeiramente, dentro das parcelas, ao longo do lineamento definido para a obtenção dos dados de subsuperfície, foram realizados perfis geofísicos base, ou seja, medidas no solo em estado natural, que servem de referência para a comparação com os perfis seguintes. Logo após foram montadas duas estações experimentais em cruz sobre o lineamento: uma na alta e outra na média vertente, para cada campanha de campo (quatro, no total da pesquisa).

Dentro da área dos braços de cada cruz foi aplicada uma solução aquosa contendo cloreto de sódio e o corante azul (com função de traçador). Ao longo desta mesma área foram obtidos os perfis geofísicos através de radar e de eletrorresistivímetro, em intervalos de tempo previamente definidos, antes e após a injeção do líquido, para se acompanhar a percolação deste em profundidade.

Para as medidas de tensiometria foram delimitadas áreas bem próximas de cada cruz, dentro das quais foram instalados tensiômetros em quatro profundidades.

Ao fim de todas as medições, na 5ª semana de cada campanha, foi realizada a abertura de trincheiras para observação *in situ* do corante azul, assim como para seu registro fotográfico para análise e processamento posterior. Esta abertura também serviu, no mês de novembro, ao propósito da coleta de solo para análise textural em laboratório.

O método adotado para as medições de densidade da cobertura vegetal e da cobertura de superfície não interferiu diretamente nas outras medidas, e assim essas puderam ser feitas de maneira independente, sem ter relação temporal com a aplicação da solução aquosa.

4.2.1 - Medição da Densidade de Cobertura Vegetal

A densidade de cobertura vegetal foi medida por meio de uma técnica de amostragem já realizada nestas mesmas parcelas em estudos prévios (Barbosa, 2004; Portilho, 2003). Este método, segundo Barbosa (2004), é descrito por Matteucci & Colma (1982) e

consiste em contabilizar as partes dos vegetais que interceptam a linha de um transecto (FOTO 4.1).



FOTO 4.1 - Medição da cobertura vegetal em transectos

Quatro linhas de transecto foram instaladas nas laterais das parcelas: duas horizontais e duas verticais, com 10 metros cada. Cada linha constituiu-se de um fio de barbante de algodão fixado por estacas e amarrado acima da vegetação. Desse modo, a projeção horizontal da vegetação sobre a superfície deve ser medida como a parte do vegetal (raiz e/ou caule e/ou folhagem) que intercepta a linha do transecto (no caso, o barbante), não se esquecendo de desconsiderar espaços vazios entre os vegetais. Com o uso de uma trena, são obtidos valores centimétricos que são tratados pela equação:

$$\% CV = \frac{\sum CV (cm)}{T (cm)} \times 100, \text{ sendo } CV = \text{cobertura vegetal e } T = \text{tamanho do transecto.}$$

Através das medições e dos cálculos, chegou-se à porcentagem estimada de cobertura vegetal para a área das parcelas, tendo sido quantificados quatro estratos de vegetação: gramíneo, herbáceo, arbustivo e arbóreo. Este procedimento foi feito ao início do período chuvoso e repetido ao final, uma vez que a variável cobertura vegetal é considerada dinâmica, podendo apresentar fortes contrastes sazonais (Thornes, 1990).

4.2.2 - Medição da Cobertura de Superfície

O método de medição da porcentagem de cobertura de superfície em muito se assemelha ao de cobertura vegetal (FOTO 4.2). Assim, os dados foram obtidos nas mesmas linhas de transecto utilizadas para as medições de vegetação. Do mesmo modo que Barbosa (2004), considerou-se para esta pesquisa a cobertura de superfície como sendo

o material constituinte do topo do horizonte superficial e os sedimentos encontrados sobre a superfície do solo. Este material corresponde, assim, à crosta (camada compactada), aos fragmentos de rocha transportados, aos agregados e ao material pedológico que se encontra solto na superfície. (Barbosa, 2004: 33).

Os três tipos de cobertura de superfície identificados e quantificados na área das parcelas foram: crosta, grânulos (*sedimentos desagregados na superfície do solo, constituídos por pequenos agregados de argila e/ou silte e/ou areia, oriundos de atividade biológica ou geoquímica (loc. cit.)*) e cascalhos (*que neste caso são fragmentos de quartzo médios e angulosos transportados a curta distância (loc. cit.)*).



FOTO 4.2 - Medição da cobertura de superfície

Apesar de se saber, por estudo prévio (Barbosa, 2002), que a cobertura de superfície teria pouca variabilidade para o período de monitoramento desta pesquisa, estes dados foram levantados nas mesmas épocas de amostragem da cobertura vegetal, e como tal foram calculadas suas porcentagens para a área das parcelas.

4.2.3 - Instalação das Estações em Cruz

Dentro dos sítios geomorfológicos e dentro das parcelas de 100 m², foram instaladas as estações experimentais em cruz. Todas as estações em cruz possuem as mesmas dimensões: do centro da cruz à extremidade de cada braço tem-se uma extensão de 2 metros, o que somam 4 metros de uma ponta à outra. Assim, têm-se dois segmentos de 4 m x 0,20 m que se cruzam no centro, gerando uma área interna de 1,56 m². Para que se pudesse injetar o líquido traçador exatamente dentro desta área, foi construída uma estrutura em madeira, que funcionou como paredes delimitantes desses 1,56 m² (FOTO 4.3).



FOTO 4.3 - Estação em cruz montada com a estrutura em madeira e com o líquido traçador aplicado

Para que se possa aplicar o líquido traçador em quantidade e concentração desejada, deve-se ter uma área de dimensões conhecidas. Com o objetivo de melhor mensurar a direção preferencial do fluxo subsuperficial da água, fez-se a escolha por áreas (estações) em forma de cruz, na expectativa de se obter resultados tanto no sentido do escoamento preferencial da vertente, quanto paralelamente a este sentido (FOTO 4.3).

Para se evitar ao máximo as perdas por escoamento superficial e para forçar o líquido aplicado a infiltrar, foram escavados pequenos sulcos superficiais, com a profundidade média de 1 cm, onde a estrutura em madeira se encaixou. Com o mesmo propósito, além da 1ª medida foi necessária também a colocação de pequenos volumes de terra nas bordas da estrutura.

4.2.4 - Aplicação da Solução Salina e Colorimétrica

A aplicação da solução composta de água, cloreto de sódio e corante azul teve um objetivo maior que foi a observação da pluma percolando no solo.

Para investigar esta percolação através dos métodos geofísicos adotados, a água por si só já apresentaria bons resultados, mas optou-se pela adição do NaCl para incrementar o contraste nos imageamentos da subsuperfície, uma vez que este aumenta a condutividade elétrica do solo (Barker & Moore, 1998). Assim, para cada estação em cruz foram aplicados 2 kg de cloreto de sódio diluídos em 110 litros de água⁴.

Contudo, a composição 'água + sal' por si só não apresenta resultados perceptíveis a olho nu, e para que se investigasse a pluma por meio da abertura de trincheiras, fez-se uso do traçador colorimétrico Brilliant Blue FCF (C. I. 42090). Segundo Flury et al. (1994), a concentração mínima para se obter bons resultados deve estar entre 1 e 4 gramas por litro. A concentração utilizada no presente estudo foi de 4,25 g/l, muito próxima dos 4 g/l utilizados nas pesquisas de Flury & Flühler (1994), Petersen et al. (2001) e Morais (2007), e dos 5 g/l utilizados por Wai et al. (2004) e por Kim et al. (2004).

A quantidade de água aplicada por área representa um valor pluviométrico médio dos dois meses em que se executou o ensaio⁵, totalizando 110 litros irrigados em cada estação em cruz, por meio de um regador manual, conforme uma das proposições de Flury et al. (1994) (FOTO 4.4). Alguns pesquisadores, como Kim et al. (2004) e Morais

⁴ Para as pesquisas de abril/maio de 2007 aumentou-se a concentração de sal, com vistas a aumentar a condutividade do solo e assim obter ainda melhores resultados nos perfis geofísicos.

⁵ Para este cálculo foram utilizados os dados climatológicos de Gouveia obtidos no período de 1995 a 1999 pela ANEEL.

(2007), procedem à cobertura da área de experimento após a aplicação do traçador, como forma de evitar a evaporação e a diluição da solução colorida, respectivamente pelo sol/vento e pela chuva. Nesta pesquisa, contudo, optou-se por deixar as parcelas abertas, para que as condições fossem o mais próximo possível do natural.



FOTO 4.4 - Irrigação da solução traçadora azul em uma estação em cruz

4.2.5 - Obtenção de Perfis de Eletrorresistividade

Para auxiliar na interpretação do comportamento da água em subsuperfície, foram obtidos perfis geofísicos de eletrorresistividade. A técnica utilizada foi de caminhamento elétrico, obtendo-se informações de vários níveis de profundidade, para diversas posições em superfície. O método consiste na aplicação de corrente elétrica ao solo, por um arranjo de fios conectados a eletrodos enterrados no solo.

Conforme colocado anteriormente, para se obter maior condutividade do solo, foi aplicado, para cada lineamento elétrico, 1 kg de cloreto de sódio diluído em 55 litros de água. Diferentemente de outros autores (Neves & Luiz, 2003; Moraes, Bacellar & Aranha, 2007), que aplicaram a solução salina pontualmente, no presente estudo a mesma foi aplicada em áreas. Com isto, são obtidas respostas contínuas ao longo de um segmento da vertente, e não apenas uma informação pontual. Assim, as linhas dos caminhamentos elétricos foram colocadas perpendicularmente ao caimento da vertente, dentro da área das estações em cruz (FOTO 4.5).



FOTO 4.5 - Disposição dos eletrodos dentro da caixa delimitadora da área a receber a solução aquosa (levantamento base). As setas indicam os eletrodos fincados no solo

O método do caminhamento elétrico é um tipo de aquisição geofísica 2D (x, z) e como foram obtidos perfis em épocas diferentes para o mesmo local, tem-se então uma aquisição 3D ($x, z, e t$; onde t é a variação temporal). Cada perfil de eletrorresistividade obtido tem um comprimento de 8 metros. A área retangular onde se aplicou a solução salina sob os eletrodos tem 4 metros e está centralizada na linha. Assim, o centro da área coincide com o centro dos perfis geoeletricos, sendo suas extremidades as posições 2 e 6.

Antes de se aplicar a solução salina, foi feito um levantamento base em cada estação, para se obter a distribuição normal da resistividade ao longo de cada linha investigada sem a solução salina. Uma vez aplicada a solução, novas medidas foram feitas (FOTO 4.6) nos intervalos de tempo apresentados nos QUADROS 1 e 2.



FOTO 4.6 - Medida de eletrorresistividade realizada após a injeção da solução traçadora, as setas indicam os eletrodos.

O equipamento utilizado foi o resistímetro ABEM I. E. Terrameter (FOTO 4.7), que emite uma corrente elétrica contínua de baixa frequência (4 Hz) por intermédio de dois eletrodos, "A" e "B". Com a injeção da corrente no solo ocorre sua "distribuição" na subsuperfície, e é gerada uma diferença de potencial no terreno que é medida por outro par de eletrodos, "M" e "N". Ao se afastar os eletrodos, aumenta-se a profundidade da leitura em subsuperfície.



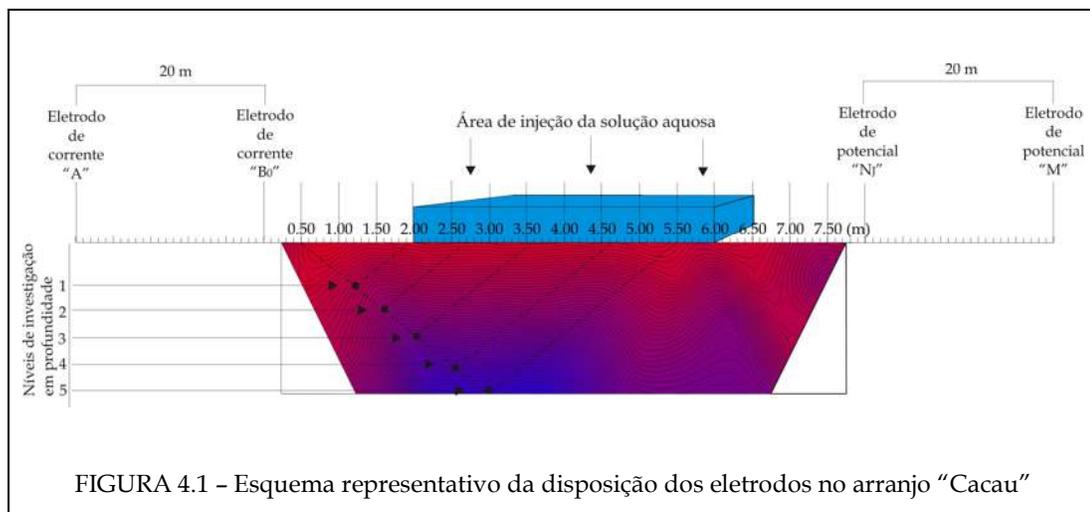
FOTO 4.7 - Operação das unidades de controle (voltímetro e potenciômetro) na obtenção de medidas - Resistivímetro ABEM

Para a realização do caminhamento elétrico foram posicionados 19 eletrodos metálicos de aço inox enterrados no solo. Todas as medidas foram realizadas com o arranjo pólo-pólo do tipo “Cacau” (Nery & Aranha, 1995), em que os eletrodos são dispostos no solo, ficando fixos os eletrodos extremos da linha, o “A” (corrente) e o “M” (potencial). Ao todo, foram obtidos cinco níveis de investigação.

Por este arranjo, os eletrodos podem ser colocados a uma distância “muito grande” em relação a “B” (corrente) e “N” (potencial), fazendo com que se tenha uma situação do tipo monopolo. A distância do eletrodo de corrente “A” até a posição inicial do outro eletrodo de corrente “B”, como também a distância do eletrodo “N” em sua posição final (“J”) até o eletrodo “M”, foram de 20 m. As distâncias entre os eletrodos “B” e “N”, e o máximo de afastamento entre eles, foram de 0,5 m e 2,5 m, respectivamente.

Após a definição destas distâncias, os eletrodos foram colocados em suas posições no solo. O ponto de observação para as estações é considerado como o ponto médio entre os eletrodos “B” e “N”. Na primeira medida o eletrodo de corrente está na posição 0 e o

de potencial na posição 1. Após a realização da medida 0-1, o eletrodo 1 é desligado do resistivímetro e é conectado ao eletrodo da posição 2; a leitura é então realizada. Esta operação se repete até completar cinco níveis para cada posição do eletrodo “B”, ou seja, medida 0-1; 0-2; 0-3; 0-4 e finalmente 0-5. Ao atingir este limite, o eletrodo de potencial na posição 1 tem sua função trocada para ser o eletrodo de corrente “B”, e conecta-se então o carretel que estava ligado anteriormente ao eletrodo “B”, colocando-o na primeira posição posterior ao fim do primeiro lanço. A seguir as leituras são realizadas iniciando o processo com o eletrodo “B” na posição 1 e o primeiro eletrodo de potencial na posição 2. A operação é repetida, lanço por lanço, até o eletrodo “N” atingir a posição “J” (FIG. 4.1).



Segundo Koefoed (1979), a resistividade obtida a partir das medidas é um valor aparente, e pode ser calculada através da equação:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}, \text{ onde}$$

K é o fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos “A”, “B”, “M” e “N”, ΔV é a diferença de potencial obtida entre os eletrodos e I é a corrente elétrica. Assim, as medidas de $K \cdot \Delta V / I$ são coletadas em campo e posteriormente calculadas as resistividades aparentes dos cinco níveis investigados. Os resultados obtidos em campo são posteriormente processados numa planilha eletrônica.

Após o processamento, os dados são plotados em forma de gráficos (usando planilhas) e, em seguida, em forma de seções (por meio dos *softwares* Surfer® e Res2dinv®). Primeiramente, as seções geradas são do tipo *pseudo-depth section*, e em um segundo momento, estas passam por um processo de inversão de seus valores, para que se obtenha maior fidelidade quanto à distribuição real da resistividade do solo. Finalmente, as seções são interpretadas em função das variações das resistividades apresentadas, correlacionando-as com características geomorfo-pedológicas da área.

4.2.6 - Obtenção de Perfis por Georadar

Para a obtenção dos perfis geofísicos por imageamento eletromagnético da subsuperfície, foi utilizado o Ground Penetration Radar (GPR), modelo RAMAC, fabricado pela MALÅ GeoScience (FOTO 4.8).

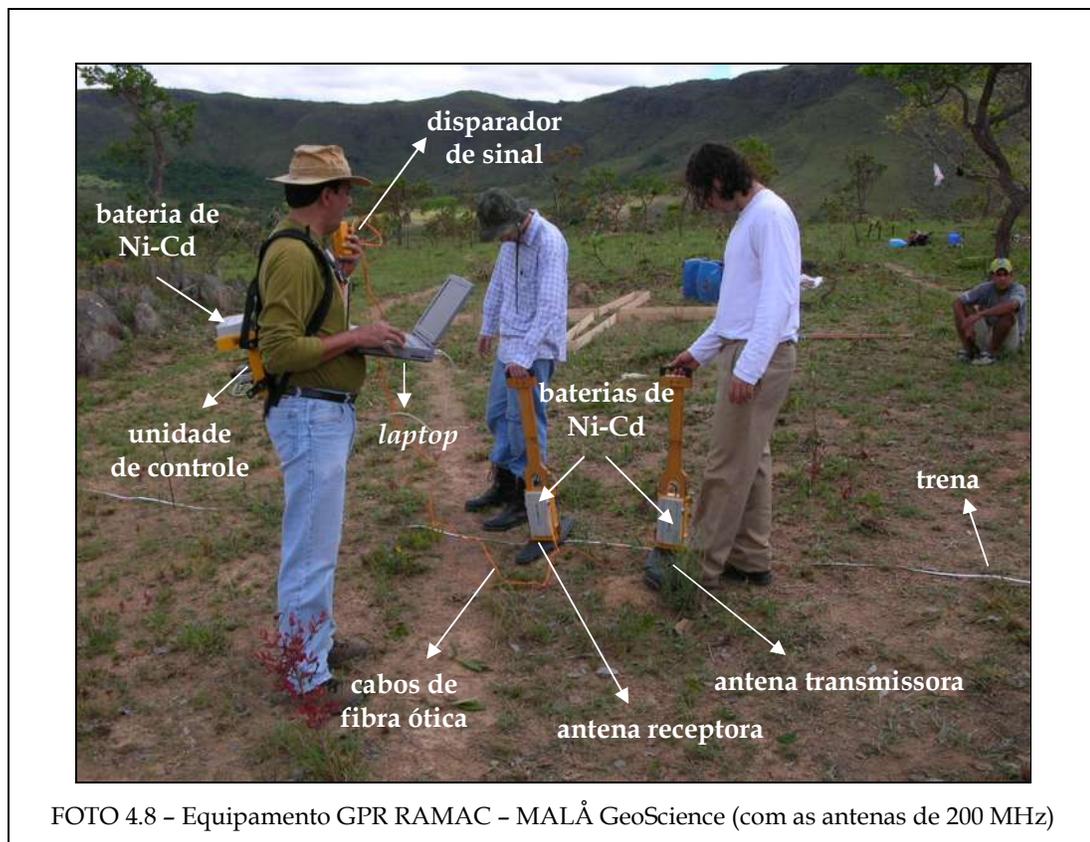


FOTO 4.8 - Equipamento GPR RAMAC - MALÅ GeoScience (com as antenas de 200 MHz)

Os perfis de georadar foram obtidos ao longo dos braços de cada cruz, obtendo-se, assim, perfis no sentido da linha de maior declividade da vertente, e perfis perpendiculares a este sentido.

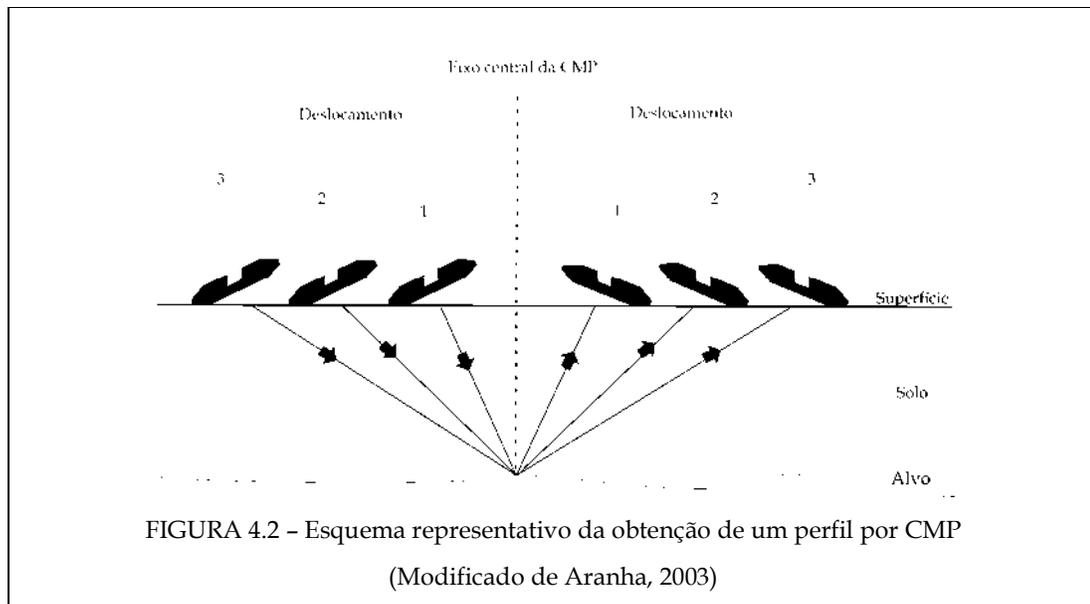
Assim como nos levantamentos de eletrorresistividade, antes de se aplicar a solução aquosa foi feito um levantamento base em cada estação em cruz, para se obter a distribuição normal da resposta do solo ao longo das linhas. Uma vez aplicada a solução, novas medidas foram feitas, nos intervalos de tempo apresentados nos QUADROS 1 e 2.

A escolha da frequência da onda EM deve ser feita tendo em vista a melhor relação entre penetração e resolução. Ondas de baixa frequência penetram mais profundamente, mas produzem baixa resolução vertical, enquanto que ondas de alta frequência têm menor profundidade de penetração vertical, mas melhor resolução. Isto posto, as antenas escolhidas foram as de frequência central de 100 MHz, 200 MHz e 1000 MHz (1 GHz)⁶. Com as antenas de 1 GHz buscou-se obter detalhes dos primeiros 100 cm abaixo da superfície; com as antenas de 200 MHz buscou-se alcançar uma profundidade maior, de cerca de 4 m, e com as antenas de 100 MHz foram obtidos os perfis de velocidade.

Segundo testes realizados previamente na área (Neves et al, 1997), detectou-se que a melhor configuração para a obtenção de perfis de velocidade de onda na subsuperfície é a técnica CMP (*Common Mid Point*, ou ponto médio comum). Assim, para o levantamento destas velocidades, foram obtidos perfis com as antenas de 100 MHz, que, por terem menor frequência, garantem maior profundidade de penetração.

A técnica CMP consiste em deslocar as antenas conjuntamente, afastando uma da outra em relação a um ponto fixo central, ao longo da linha de levantamento (FIG. 4.2). Estes levantamentos CMP foram realizados a partir do ponto central de cada cruz, ao longo do braço perpendicular ao caimento da vertente. As antenas foram afastadas de 10 em 10 cm sobre uma trena posta sobre a superfície do terreno.

⁶ Em uma única medição foi usada a antena de 400 MHz, mas por não apresentar bons resultados, esta foi substituída pela antena de 200 MHz.



Para o levantamento com as antenas de 200 MHz e 1 GHz, o arranjo utilizado foi o *common offset*, em que as antenas transmissora e receptora são transportadas ao longo da linha – marcada por trena – mantendo-se uma distância constante entre elas (FOTO 4.9). A cada posição em que se estaciona o par de antenas, emite-se a onda e assim são adquiridos dados em posições individuais, que posicionados lado a lado formam o radargrama da linha de levantamento. Neste modo de aquisição descontínuo, utilizou-se um espaçamento de 60 cm entre as antenas, e o intervalo de aquisição foi de 0,10 m.



O método para o levantamento com as antenas de 1 GHz também é do tipo *common offset*, mas com a diferença de que as antenas transmissora e receptora são acopladas em uma única unidade, sendo o espaçamento entre elas fixo em 11 cm (FOTO 4.10).

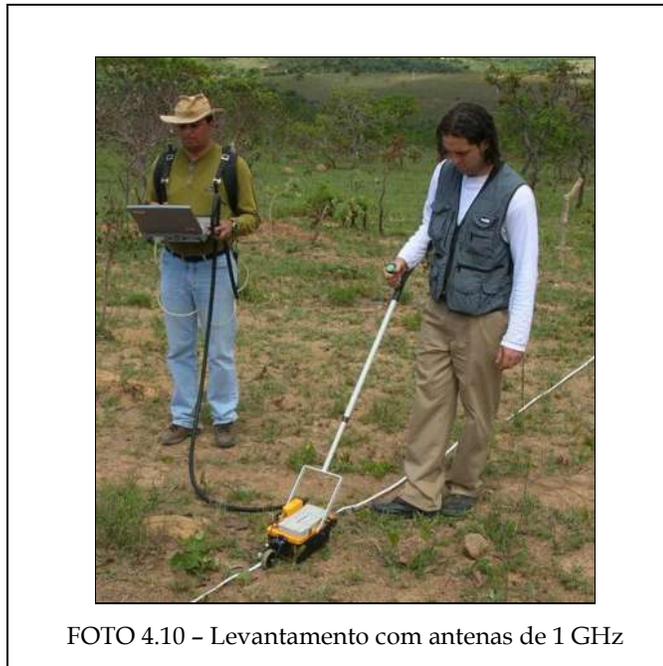


FOTO 4.10 - Levantamento com antenas de 1 GHz

Os radargramas obtidos são imediatamente visualizados no laptop, onde são gravados. Posteriormente, em etapa de gabinete, ocorre o processamento dos dados, por meio do software GRADIX®. Este se inicia pela edição dos dados, que compreende sua organização e correção. Em seguida passa-se ao processamento básico, que *envolve manipulações fundamentais aplicadas aos dados para torná-los mais aceitáveis para a interpretação inicial e para a avaliação dos dados* (Aranha, 2003: 55). Nesta etapa, aplicam-se as funções de declipping, filtragem, marcação do tempo zero e ganhos temporais. *De acordo com os objetivos ou com os interesses na imagem que se deseja realçar para facilitar a interpretação* (op. cit.: 56), realiza-se o processamento avançado, que compreende a deconvolução, a migração, a análise de velocidade, a correção estática e a conversão em profundidade.

A última etapa consiste na interpretação dos radargramas processados, e *deve ter como baliza os objetivos que levaram à utilização do radar no estudo [...] e o modo como as estruturas da subsuperfície possam aparecer nas seções* (op. cit: 57).

4.2.7 - Medidas de Tensiometria

Com vistas a medir a movimentação da solução no solo em cada período chuvoso, tanto em outubro⁷ quanto em abril foram instalados tensiômetros⁸ no interior das parcelas, entre dois braços das estações em cruz (FOTO 4.11).



FOTO 4.11 - Perfuração do solo com trado próprio para instalação dos tensiômetros, bem próximo à cruz

De fácil construção e boa relação custo-benefício, existe uma variedade de configurações de aparelhos de tensiometria, embora todos apresentem três peças básicas interligadas: uma cápsula porosa de cerâmica, um tubo plástico e um manômetro (Kirkby, 1978; Hubbel & Sisson, 1996).

⁷ Devido ao atraso na aquisição do equipamento de tensiometria, os dados de outubro não foram coletados em 2006. Os mesmos foram então obtidos em outubro de 2007, pois acredita-se que, mesmo apesar das possíveis diferenças anuais de pluviosidade, é importante que se saiba a variação desses dados do início do período chuvoso, quando o solo está pouco úmido, para o do fim do período de chuvas.

⁸ Portilho (2003) realizou medidas semelhantes nas mesmas parcelas, porém mais sistematicamente.

O princípio de funcionamento do aparelho é bastante simples: introduz-se o tensiômetro no solo, com a ponta porosa para baixo, e enche-se o tubo com água. O que se segue é o contato da água do interior do tensiômetro com a água do solo, através da cápsula de cerâmica, passando a existir uma tendência de equilíbrio entre os dois meios (Gavande, 1972; Hillel, 1982). Inicialmente, as águas contidas nestes dois meios encontram-se sob diferentes condições de pressão: a água do solo quase sempre se apresenta sob pressão subatmosférica, ou seja, tensionada, e a água dentro do tensiômetro está sob pressão atmosférica (1 atm). O contato dos dois meios faz com que a matriz do solo, com potenciais matriciais negativos, succione a água do tubo, passando pela cápsula porosa, até que a tensão no interior do aparelho se iguale à tensão do solo (Brady & Buckman, 1979; Klar, 1988). Uma vez que o manômetro é conectado ao sistema, ele mede esta tensão gerada naquele momento dentro do tubo.

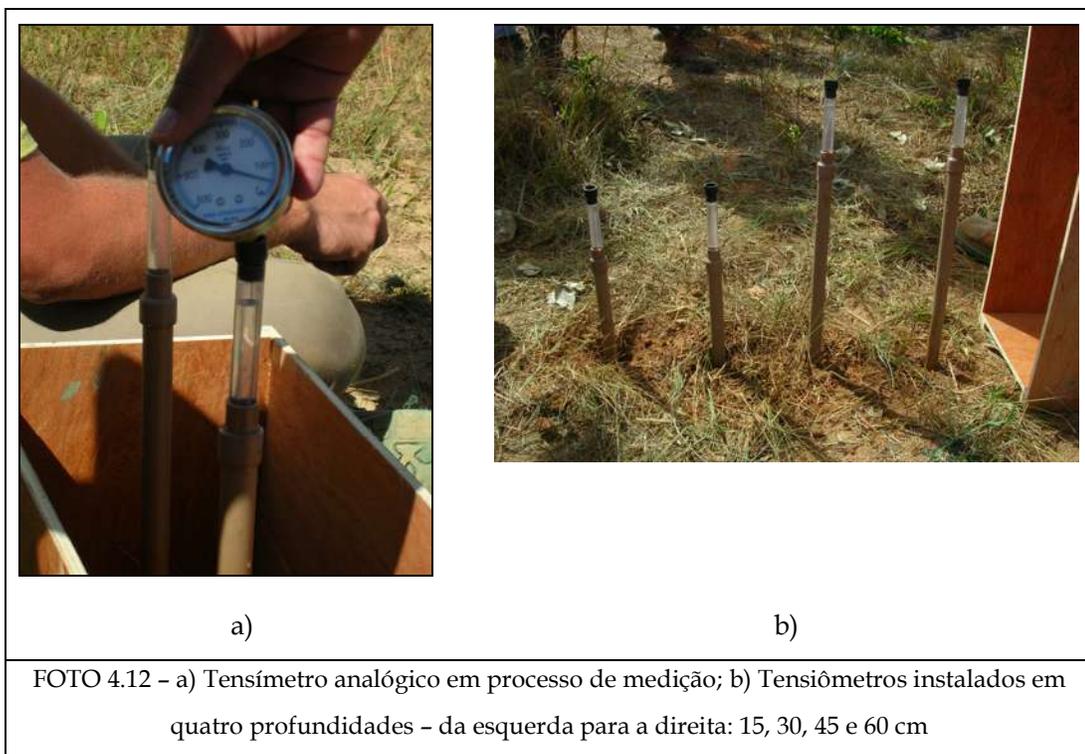
Durante a mensuração da tensiometria, deve-se estar atento ao acúmulo de bolhas no corpo do tensiômetro, formadas por gases dissolvidos na água e por vapor d'água. Conhecido como cavitação, este fenômeno de vaporização dentro do circuito hidráulico pode atrapalhar a transmissão da pressão da cápsula para o manômetro (Tamari et al., 1993). Para a minimização deste problema deve-se utilizar água desaerada, mas quando isto não for possível, deve-se recorrer ao processo de refluxagem, que consiste em readicionar água ao sistema. De acordo com Hubbel & Sisson (1998), este acréscimo de água também corrige a falta de água no aparelho, o que atrapalha a precisão das leituras. Estes autores afirmam, ainda, que reduzir o volume de ar dentro do tensiômetro e instalar a cápsula bem rente ao solo são medidas que melhoram a resposta e o tempo das leituras.

O equipamento de tensiometria utilizado é um tensiômetro de punção, fabricado pela SONDATERRA[®], consiste em tubos plásticos independentes que têm, em uma de suas pontas, cápsulas porosas de cerâmica. Os tubos são de PVC, têm 1/2 polegada de diâmetro e comprimentos variados. As cápsulas têm 3/4 de polegada de diâmetro, devem atingir as profundidades escolhidas e ficar bem justas ao solo. A outra extremidade de cada tubo é aberta, e é por onde se adiciona água ao sistema.

Após ser completado com água, cada tubo é vedado com rolha de silicone. Ao ser absorvida pelo solo através da cápsula porosa a água deixa um espaço que gera uma

pressão dentro do tubo. Esta pressão é medida através de um manômetro (ou tensímetro) analógico, que é um aparelho dotado de agulha capaz de perfurar a rolha de borracha e fazer a medida da tensão, em Milibar (FOTO 4.12a).

De acordo com Fernandes et al. (1989), a escolha da profundidade na qual os tensiômetros serão instalados deve se dar em função dos objetivos e das características dos solos em estudo. Ainda segundo esses autores, em solos com perfis relativamente homogêneos, ou com descontinuidades pouco significativas, como é o caso dos solos deste estudo, as profundidades de instrumentação podem ser constantes. Desse modo, tanto na alta quanto na média vertente, após perfuração com trado próprio, os tensiômetros foram instalados em quatro profundidades – 15, 30, 45 e 60 cm –, visando alcançar os diferentes horizontes do solo, dos quais já se tinha conhecimento pelas descrições de Portilho (2003) e Rocha (2004) (FOTO 4.12b).



Na tentativa de padronizar o solo antes das medidas e relacionar com os dados de infiltração das estações em cruz, aplicou-se, nas áreas definidas para os tensiômetros, água em quantidade proporcional à aplicada nas áreas das estações em cruz.

Os dados tensiométricos foram então coletados, em cada período, em dois dias consecutivos, de uma em uma hora (assim como realizado por Bueno, 1997), sendo que a cada medida foi realizada a reposição de água de cada tensiômetro, para minimizar os efeitos da cavitação.

4.2.8 - Abertura das Trincheiras para Observação do Traçador Azul

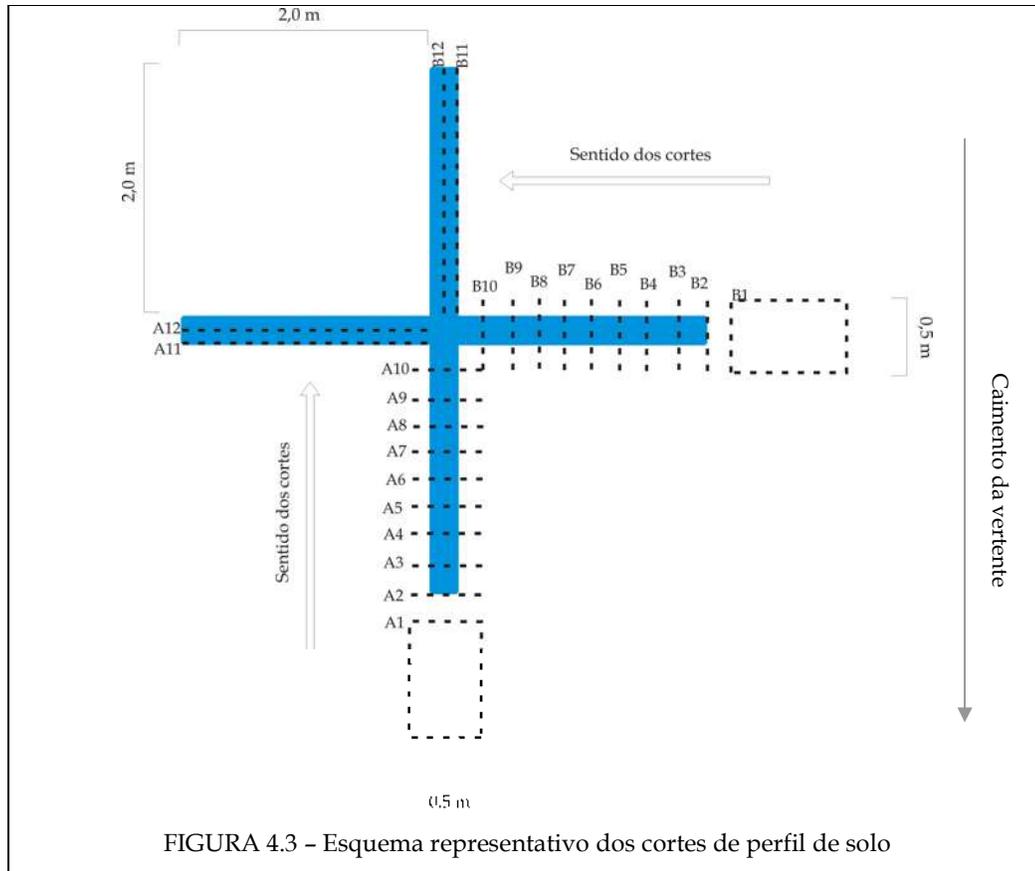
Uma vez terminadas as medições geofísicas sobre as estações em cruz, procedeu-se à abertura de trincheiras para que se observasse a pluma colorida no perfil do solo.

A abertura dos perfis foi iniciada nas extremidades de dois braços de cada cruz, conforme demonstrado na FIGURA 4.3. O primeiro corte de cada braço foi aberto a cerca de 20 cm de distância da borda da cruz (FOTO 4.13). Os cortes seguintes foram feitos de 20 em 20 cm, aproximadamente⁹. Em cada uma das duas cruzes de outubro/novembro de 2006, foram abertos, no total, 24 perfis, 12 em cada sentido; no mês de maio de 2007 obteve-se o total de 26 perfis, devido à melhor precisão na segmentação das trincheiras.



FOTO 4.13 - Início da abertura das trincheiras: perfis A1 e B1

⁹ O uso de ferramentas maiores na escavação – enxada, pá, picareta, alavanca – compromete a precisão centimétrica.



Assim, de acordo com a FIG. 4.3, tem-se que:

- os cortes de A1 a A10 são chamados de pequenos perpendiculares;
- os cortes de B1 a B10 são chamados de pequenos paralelos;
- os cortes A11 e A12 são chamados grandes perpendiculares e
- os cortes B11 e B12 são chamados de grandes paralelos.

A escolha pelo braço central da cruz deu-se na tentativa de se observar o fluxo acumulado ao longo do caimento da vertente; nos cortes laterais espera-se observar como o fluxo comporta-se perpendicularmente ao caimento da vertente.

Em cada perfil aberto foi posicionada em sua parede interna uma régua de madeira seccionada de 10 em 10 cm, para que e em seguida fosse feito o registro fotográfico com máquina digital com resolução de 4 mega pixels. A régua utilizada para os perfis menores tem dimensão de 0,5 m de comprimento por 1,0 m de altura (FOTO 4.14); a régua utilizada para os perfis maiores tem dimensão de 2,0 m de comprimento por 1,0 m de altura (FOTO 4.15).



FOTO 4.14 - Trincheira menor aberta para observação do fluxo marcado pelo corante azul



FOTO 4.15 - Trincheira maior aberta para observação do fluxo marcado pelo corante azul

Posteriormente, para que se pudesse avaliar correta e quantitativamente a variação do fluxo, foram feitas correções geométricas do ângulo de obtenção das fotografias, por meio do *software* Corel Draw[®], através da ferramenta “perspectiva”. Em seguida, sobre

cada foto foi aplicada uma quadrícula centimetrada, a partir da qual foi feita a medição do alcance da pluma azul.

4.2.9 - Amostragem de Solo

Na coleta e descrição dos solos foram obtidas informações referentes a: cor, textura, pegajosidade, cerosidade, consistência e plasticidade segundo metodologia de Lemos & Santos (2002).

Para estes procedimentos foram abertas duas trincheiras, uma na alta e outra na média vertente, ambas situadas dentro das parcelas experimentais. Amostras foram coletadas nos principais horizontes dos solos e sua análise textural – que define a proporção de areia, silte e argila em cada amostra de solo – foi realizada no Laboratório de Geomorfologia do IGC/UFMG, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

Várias propriedades físicas e químicas destes mesmos solos foram investigadas sistematicamente em laboratório por outros pesquisadores (Diniz, 2002; Portilho, 2003; Rocha, 2004)¹⁰, tais como textura, porosidade, teor de matéria orgânica e de outros elementos, acidez e saturação por bases, todas de acordo com a orientação técnica da EMBRAPA (1997).

4.3 - Tratamento dos Dados

Os diversos procedimentos metodológicos utilizados geraram dados muito diferentes entre si. Cada um desses dados foi processado de modo diferenciado, e por vezes em *softwares* específicos, conforme descrito nos itens relativos a cada metodologia ao longo do trabalho.

Os dados obtidos nesta pesquisa foram tratados sob as perspectivas quantitativa, qualitativa e espaço-temporal. Ao se analisar os dados, são buscadas as relações: i) de uma mesma porção da vertente nos dois períodos analisados (por exemplo,

¹⁰ Os autores cederam seus dados para serem trabalhados nesta pesquisa.

comparação da alta vertente do início do período chuvoso com a alta vertente do final do período chuvoso) e ii) duas porções da vertente num mesmo período (por exemplo, comparação da alta vertente com a média vertente no início do período chuvoso).

No capítulo 5 desta pesquisa, os dados são primeiramente apresentados e em seguida discutidos, levando-se em conta as possíveis inter-relações entre as variáveis analisadas.

5.1 - Vegetação e Solo

5.1.1 - Parcela da Alta Vertente

A cobertura vegetal da alta vertente é mais rasteira (altura média de 35 cm) e escassa (média de 25,75% de cobertura), apresentando-se como essencialmente gramínea, com coberturas arbustiva, herbácea e serrapilheira bem menos expressivas. Apesar da presença de alguns esparsos exemplares arbóreos, típicos do Cerrado, nenhum destes foi interceptado pelos transectos de medição da vegetação da parcela (FOTO 5.1).



As medidas da cobertura do tipo gramínea, realizadas no final do período chuvoso, apresentaram valores consideravelmente maiores que as medidas do início do período de chuvas. Os valores de cobertura arbustiva e serrapilheira mantiveram-se praticamente constantes e os de cobertura herbácea aumentaram em quase 3 vezes. No

total, a porcentagem de cobertura vegetal no final do período chuvoso apresentou-se cerca de 1,6 vezes maior que no início do período (TAB. 5.1).

TABELA 5.1
Cobertura vegetal da alta vertente

Cobertura (%)	Início do período chuvoso	Fim do período chuvoso
Arbórea	0,0	0,0
Arbustiva	2,2	2,1
Herbácea	1,5	4,3
Gramínea	13,8	23,4
Serrapilheira	2,1	2,1
Total	19,6	31,9

Em termos de cobertura de superfície as mais abundantes são aquelas constituídas por grânulos orgânicos e por capa argilo-siltosa, e em porcentagens bem inferiores, a cobertura por cascalhos. A redução da porcentagem de grânulos orgânicos, que caiu pela metade, tem destaque do início para o final do período chuvoso. Também é notável o fato da cobertura por capa argilo-siltosa ter aumentado de 33,1 para 42,2% nesse mesmo período (TAB. 5.2).

TABELA 5.2
Cobertura de superfície da alta vertente

Cobertura (%)	Início do período chuvoso	Fim do Período chuvoso
Grânulos orgânicos	43,6	20,8
Capa argilo-siltosa	33,1	42,2
Cascalhos	9,2	0,1
Total	85,9	63,1

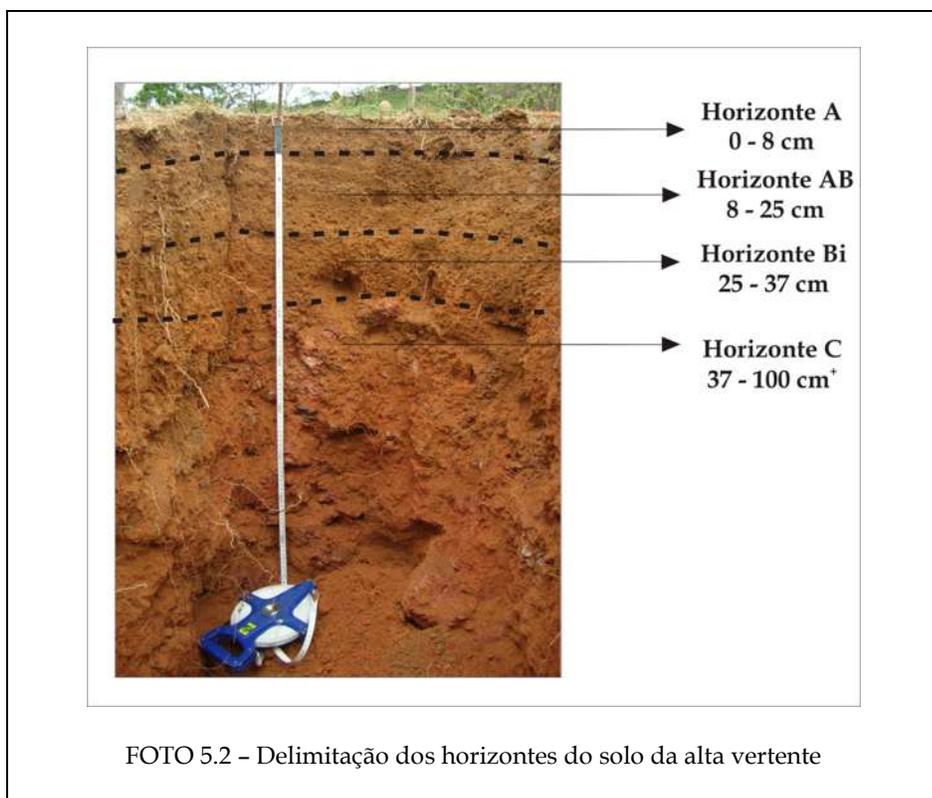
O solo da alta vertente é classificado como Cambissolo, apresentando moderado grau de desenvolvimento de seus atributos morfológicos e horizonte B incipiente (ANEXO B). A porcentagem de areia predomina nos três horizontes superficiais que constituem este solo (TABELA 5.3). De modo geral, a fração argila tende a aumentar em

profundidade em detrimento da fração areia. A fração silte apresenta um sutil aumento do horizonte A ao Bi, e volta a diminuir no horizonte C. O saprolito, com predomínio da fração argila, encontra-se muito próximo à superfície, a partir dos 37 cm de profundidade, e conserva características da rocha de origem (milonito de xisto/granito) (FOTO 5.2).

TABELA 5.3

Análise granulométrica do solo da alta vertente

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Hor. A: 0 - 8 cm	53,31	23,13	23,56
Hor. AB: 8 - 25 cm	43,66	25,59	30,75
Hor. Bi: 25 - 37 cm	37,60	32,00	30,40
Hor. C: 37 - 100 cm ⁺	32,00	29,28	38,72



5.1.2 - Parcela da Média Vertente

A cobertura vegetal da média vertente apresenta uma maior densidade de gramíneas e um número mais freqüente de espécies arbóreas do Cerrado. Mesmo assim, ela

apresenta-se composta primordialmente por gramíneas, que aumentaram ainda mais sua cobertura no decorrer do período chuvoso, passando de 53,6 para 71,5% (TAB. 5.4). Do mesmo modo as coberturas arbórea, arbustiva, herbácea e serrapilheira apresentaram maiores valores no final do período chuvoso, ainda que pouco expressivos quando comparados aos das gramíneas (FOTO 5.3).

TABELA 5.4

Cobertura vegetal da média vertente

Cobertura (%)	Início do período chuvoso	Fim do período chuvoso
Arbórea	0,9	1,0
Arbustiva	2,6	3,2
Herbácea	1,3	2,4
Gramínea	53,6	71,5
Serrapilheira	1,7	3,3
Total	60,1	81,4



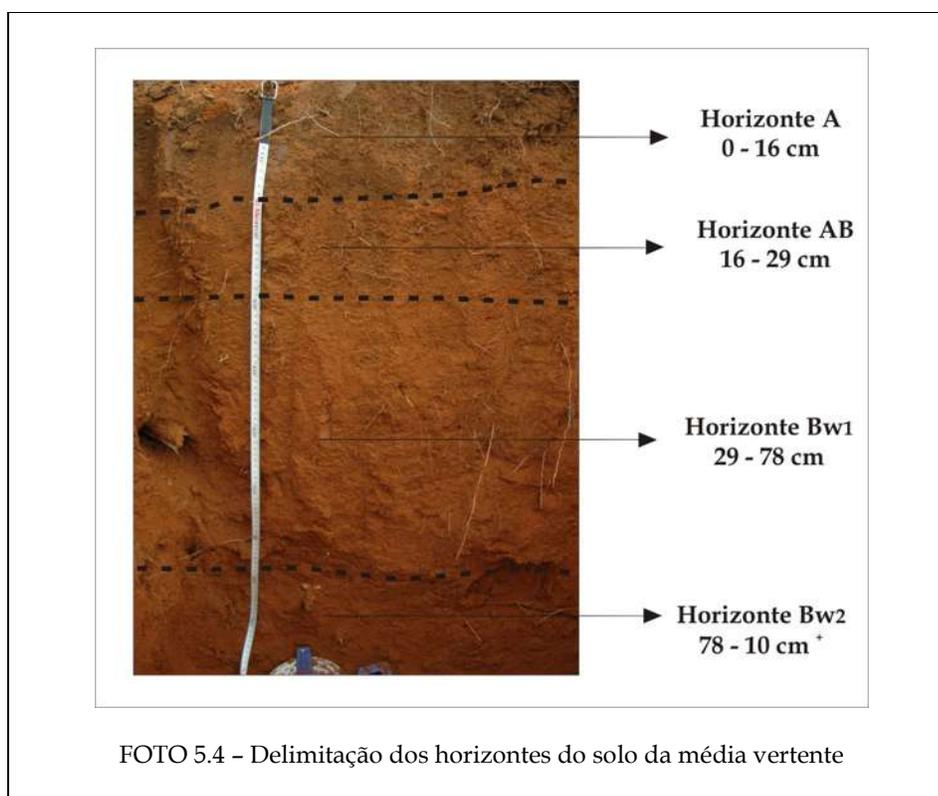
FOTO 5.3 - Aspecto da vegetação na parcela da média vertente

Os dados de cobertura de superfície da média vertente contam com valores totais semelhantes no início e no final do período chuvoso. Os dados apontam, no entanto, para uma forte redução – de mais de 5 vezes – nos valores de cobertura por capa argilo-siltosa ao final das chuvas e, opostamente, para um aumento da porcentagem de grânulos orgânicos. A presença de cascalhos foi medida como nula na média vertente, em ambos os períodos (TAB. 5.5).

TABELA 5.5
Cobertura de superfície da média vertente

Cobertura (%)	Início do período chuvoso	Fim do período chuvoso
Grânulos orgânicos	13,6	22,4
Capa argilo-siltosa	14,6	2,6
Cascalhos	0,0	0,0
Total	28,2	25,0

O solo desta porção da média vertente é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo e apresenta elevado grau de desenvolvimento de seus atributos morfológicos, denotado pela presença dos espessos horizontes Bw (ANEXO B). Somados, Bw₁ e Bw₂ ultrapassam 70 cm de espessura e alcançam profundidades superiores a 1 metro. Conforme constatou Rocha (2004), o horizonte Bw₂ ainda é encontrado a profundidades superiores a 2 m, sem que haja indícios de horizonte C (FOTO 5.4).



Como pode ser visto na TABELA 5.6, a análise textural aponta duas tendências marcantes: a fração areia diminui muito do horizonte A para o Bw₂ – quase 2,5 vezes menor –, enquanto a fração argila aumenta consideravelmente em profundidade – cerca de 1,5 vezes. A porcentagem de silte apresenta uma pequena diminuição do horizonte A ao Bw₁, mas passa a ter seus maiores valores em Bw₂.

TABELA 5.6

Análise granulométrica do solo da média vertente

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Hor. A: 0 - 16 cm	46,30	23,80	29,90
Hor. AB: 16 - 29 cm	43,30	21,80	34,90
Hor. Bw ₁ : 29 - 78 cm	37,60	20,30	42,10
Hor. Bw ₂ : 78 - 100 cm ⁺	19,00	33,00	43,00

5.1.3 - Discussão dos Dados de Solo

O Cambissolo da alta vertente apresenta maior teor de silte e uma macroporosidade significativa tanto no nível estrutural quanto no nível textural, o que deveria significar uma maior percolação da água no perfil. Contudo, o selamento da superfície pela alta porcentagem de capa argilo-siltosa, as elevadas densidade real e aparente (Portilho, 2003) e a maior tensão desse solo limitam o movimento do fluxo. Por meio da análise da micromorfologia, infere-se que a água passe mais rapidamente pelos horizontes A e AB, que têm poros maiores e agregação incipiente, mas que tenha diminuído o ritmo de percolação no horizonte Bi, que tem poros menores e é menos estruturado.

No Latossolo da média vertente é a microporosidade que se apresenta mais significativa nos níveis estrutural e textural. A análise micromorfológica leva a crer que a água passa mais livremente pelo horizonte A, mas que é em parte retida no horizonte AB, que possui poros pequenos e desconectados. Essa microporosidade associada aos maiores teores de argila resulta em alta retenção da água por capilaridade e adsorção (Costa, 1975; Tsytoich, 1986). Provavelmente, ao chegar ao horizonte Bw₁ a água deve retomar uma percolação mais eficiente, uma vez que este horizonte apresenta uma rede de poros bem conectados e boa estrutura.

Outra possível explicação para a baixa infiltração na média vertente é o entupimento dos poros por argila dispersa (Kirkby, 1978; Brady & Buckman, 1979), muitas vezes carregada das porções mais elevadas da vertente (Diniz, 2002; Barbosa, 2004). Isso ocorre principalmente ao final do período chuvoso, quando o menor selamento por capa argilo-siltosa deixa os poros mais susceptíveis a serem obstruídos pelos grânulos orgânicos com alto teor de argila, que estão soltos à superfície e em maior porcentagem nesse período.

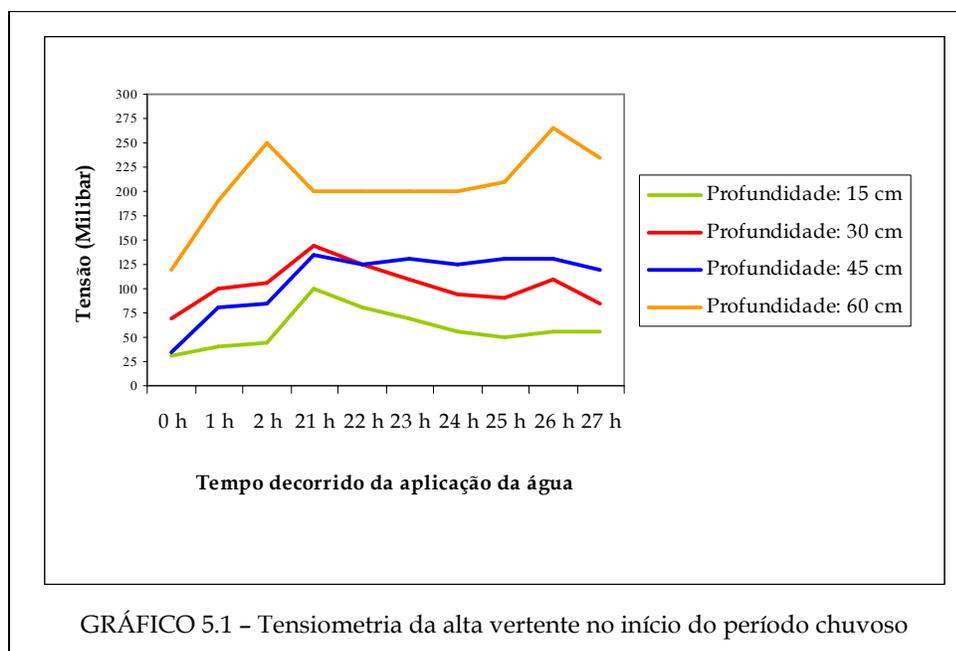
5.2 - Tensiometria

A análise dos dados tensiométricos aponta para interpretações um tanto peculiares quando comparadas à de outros trabalhos, como de Ádamo (2001) e Portilho (2003) em pesquisas na mesma área. Estes autores realizaram coletas muito mais extensas e com

muitos mais pontos de amostragem para chegar a um banco de dados representativo sobre o comportamento hidrológico das vertentes por eles estudadas em condições normais de pluviosidade. Na presente pesquisa, o foco foi dado à tentativa de registrar a percolação da água artificialmente aplicada, conforme metodologia proposta por Thomas & Phillips (1991).

Ressalta-se que o tensiômetro usado nesta pesquisa mede diretamente a tensão da água e indiretamente a porcentagem de água no solo, sendo que valores baixos indicam solo mais úmido e valores altos indicam solo mais seco. Assim, de modo geral, a passagem da pluma seria identificada nos gráficos quando as curvas apresentam queda ou estabilidade de valores. Contudo, a interpretação dos gráficos gerados a partir da leitura dos tensiômetros aponta para um comportamento anômalo. Aparentemente os dados não apresentam muita coerência em apontar a frente úmida. Todavia, é possível fazer análises comparativas entre os gráficos das duas porções da vertente nos dois períodos analisados.

Os gráficos de tensiometria da alta vertente apresentam valores elevados tanto no início quanto no final do período chuvoso e, de modo geral, demonstram que a tensão aumenta com a profundidade (GRAF. 5.1 e 5.2).



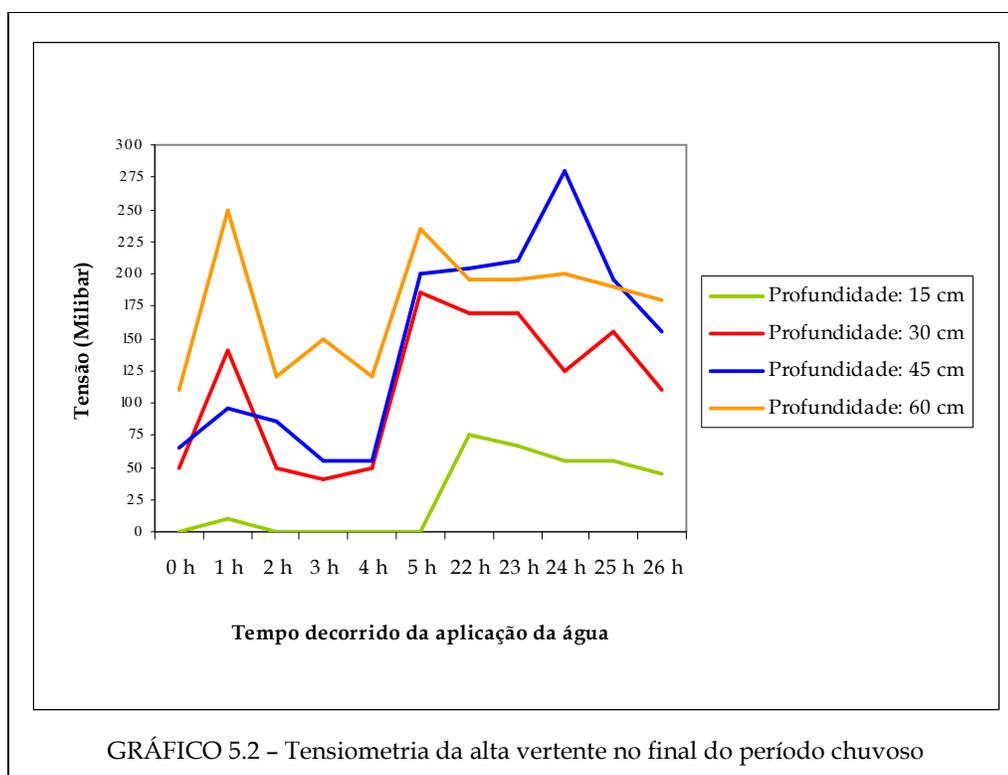


GRÁFICO 5.2 - Tensiometria da alta vertente no final do período chuvoso

Os dados de tensiometria na média vertente apresentam valores menos elevados que os da alta vertente, tanto no início quanto no final do período chuvoso, como pode ser visto nos GRÁFICOS 5.3 E 5.4. O solo dessa porção também apresenta a tendência geral de aumentar a tensão à medida que se aprofunda no perfil.

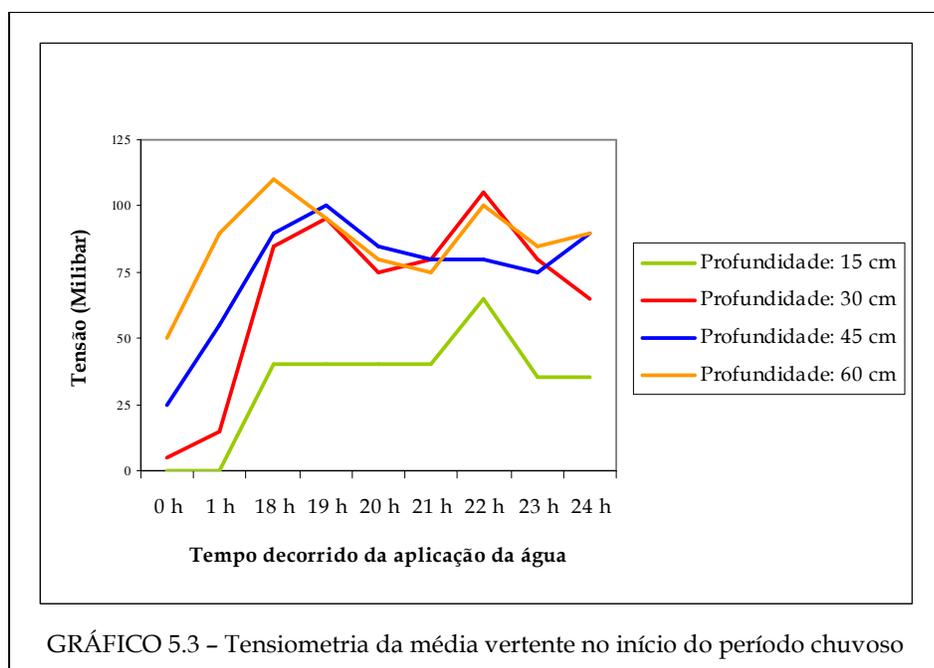
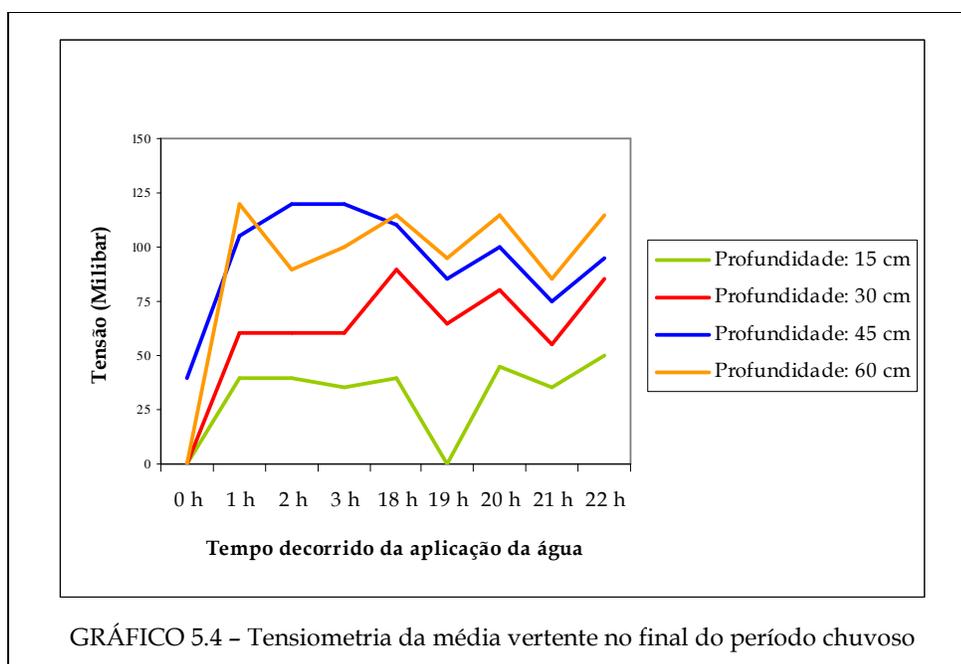


GRÁFICO 5.3 - Tensiometria da média vertente no início do período chuvoso



5.2.1 - Discussão da Tensiometria

Os dados de tensiometria das profundidades amostradas mostram que o solo da alta vertente possui maiores valores de pressão que o da média vertente, para os dois períodos analisados. Isto pode ser explicado pelo tipo de solo da alta vertente, um Cambissolo, que é pouco desenvolvido, com condições texturais (nas quais predomina o silte) e estruturais (macroporos finos formados por blocos subangulares) que favorecem o tensionamento da água (Portilho, 2003). O posicionamento em alta vertente convexa também tem influência nestes maiores valores de tensão, pois além de acarretar em forte potencial gravitacional, esta porção do relevo tende a concentrar menos água sub e superficialmente (Kirkby, 1978). Ademais, a maior cobertura do solo da alta vertente por capa argilo-siltosa também contribui para a diminuição da infiltração (Tackett & Pearson, 1964), deixando o solo menos úmido e conseqüentemente sob maior tensão (Chowdhury, 1978).

A topografia côncava da porção média da vertente também é um favorecedor da permanência da água em subsuperfície (Kirkby, 1978; Berndtsson & Larson, 1987), principalmente nos horizontes mais profundos, o que foi constatado nos testes tensiométricos realizados na vertente por Portilho (2003).

A concavidade da média vertente favorece a concentração de fluxo d'água (Fernandes, 1990), que por sua vez favorece o intemperismo e a pedogênese. Os solos desenvolvidos nessas condições em geral possuem boas condições hídricas, o que proporciona o melhor desenvolvimento da vegetação (Bertoni e Lombardi Neto, 1999). Por sua vez, a cobertura vegetal mais densa sobre o Latossolo bem desenvolvido da média vertente pode ter influência sobre os menores valores de tensão na média vertente, uma vez que ela mantém a umidade do solo mais alta. A maior presença da vegetação produz sombreamento à superfície, o que ameniza a temperatura e conseqüentemente diminui a evaporação da água do solo (Brady & Buckman, 1979; Thornes, 1990).

As diferenças de tensão entre a alta e a média vertentes são confirmadas, ainda, pelas diferenças de condutividade hidráulica dos solos. Segundo dados coletados por Portilho (2003), a média vertente apresenta maiores valores de condutividade que a alta vertente – 43,4 cm/h para a média e 35,3 cm/h para a alta – indicando que a água flui mais livre nesse solo. Contudo, os resultados desta pesquisa indicam o contrário; na parcela da alta vertente, de conformação convexa, a água percolou com mais facilidade. Esta constatação corrobora com a pesquisa de Morais (2007), que também obteve resultados de maior infiltração em relevo convexo.

A comparação dos dados tensiométricos do solo da média vertente nos dois períodos analisados sugere que a água parece ter uma percolação mais rápida nos horizontes mais superficiais do solo. Isto foi evidenciado pelo pouquíssimo empoçamento observado na superfície quando da aplicação da água, e tem respaldo também nos altos valores de condutividade hidráulica tanto deste perfil como um todo, quanto nos seus horizontes mais superficiais (Portilho, 2003). Conforme visto anteriormente, os dados de cobertura de superfície e de micromorfologia deste solo também apontam para uma maior facilidade de entrada e percolação da água em seu horizonte mais superficial.

Outra informação que se pode extrair dos gráficos de tensiometria diz respeito à tensão normal dos solos, independentemente da constatação do avanço da pluma d'água. De um modo geral, a tensão aumenta com a profundidade, e isto pode ter relação com o

também aumento em profundidade dos teores de argila, assim como com a mais baixa condutividade hidráulica dos horizontes mais profundos dos solos.

O comportamento anômalo inesperado observado na leitura dos gráficos dos tensiômetros, como bruscas baixas de pressão ou mesmo a não alteração dos valores, pode estar relacionado ao tempo necessário para que o equipamento entre em equilíbrio com o solo (Kirkby, 1978; Hayashi et al., 1997). Villagra et al. (1998) apontam para o fato de que o tempo de equilíbrio pode variar de 1 a 8 horas. Outra explicação possível é que estas variações podem indicar a presença de macroporos ou de fluxo d'água por canais no solo, o que é passível ocorrer tanto na alta quanto na média vertente (Thomas & Phillips, 1979; 1991; Yeh et al., 1986).

5.3 - Eletrorresistividade

Os perfis de eletrorresistividade foram obtidos em ambos os períodos estudados, conforme descrito no item 4.1.3. Contudo, um defeito no equipamento não observado no campo nos meses de abril e maio de 2007 impediu que os dados fossem obtidos corretamente ao final do período chuvoso, e esses perfis foram excluídos desta análise.

O processamento dos dados obtidos em campo foi realizado por meio de dois *softwares*, conforme também descrito anteriormente no item 4.1.3. Os perfis resultantes da utilização do *software* Res2dinv® apresentaram-se mais satisfatórios e foram utilizados na discussão dos resultados. Os perfis gerados por meio do *software* Surfer® estão apresentados no ANEXO C.

5.3.1 - Parcela da Alta Vertente no Início do Período Chuvoso

Antes de se aplicar a solução salina, foi obtido o perfil base de eletrorresistividade, com o solo em condições naturais de umidade. Este perfil foi obtido no dia 26/10/2006, e serviu de parâmetro para análise dos perfis seguintes. O imageamento elétrico (FIG. 5.1) mostra-se ligeiramente menos resistivo próximo à superfície, muito provavelmente devido à chuva ocorrida no dia anterior.

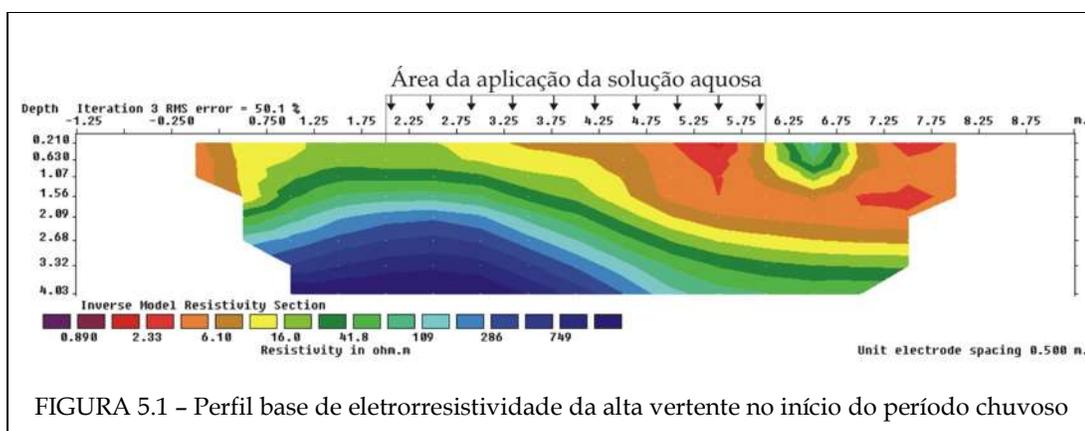


FIGURA 5.1 – Perfil base de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso

De 11:15 h às 12:30 h do dia 26/10/2006 procedeu-se à aplicação da solução salina na área definida (retângulo de 0,2 m x 4,0 m). Às 17:00 h, ou seja, 4 horas e 30 minutos após o término da aplicação, foi feita a 1ª medida. Nesta imagem já é notável o efeito da água na subsuperfície: uma faixa menos resistiva aparece na parte superior direita do perfil, mostrando o início da descida do fluxo, de maneira regular, mas com concentração do lado direito do perfil, em torno da área que já estava mais condutora no levantamento base, como pode ser verificado na FIGURA 5.2.

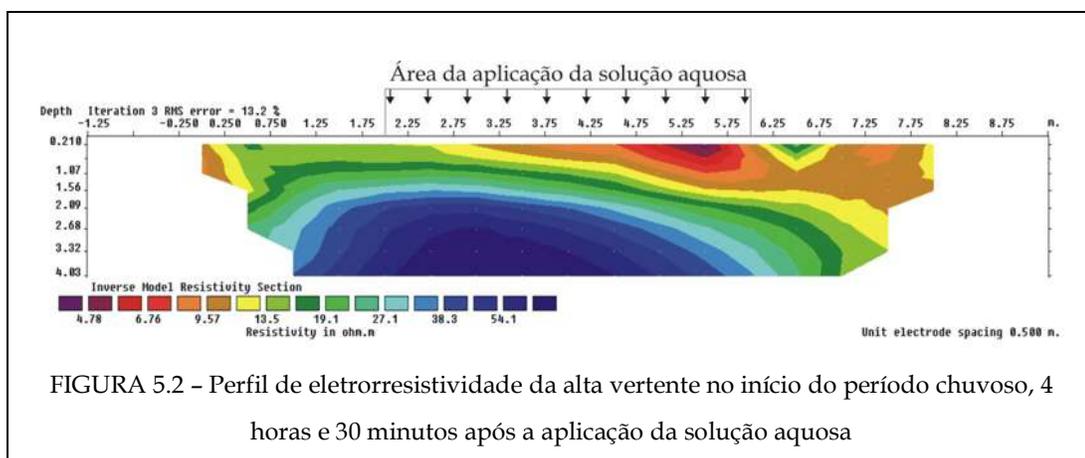
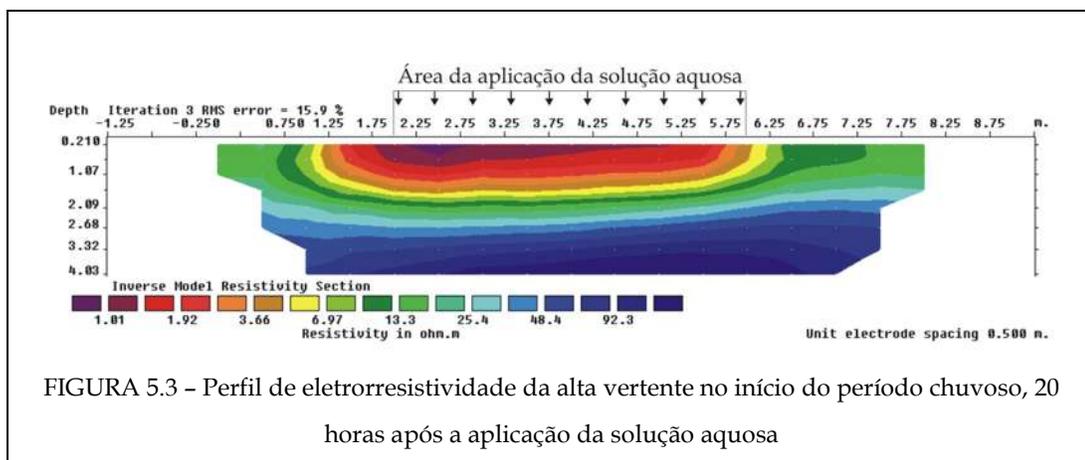
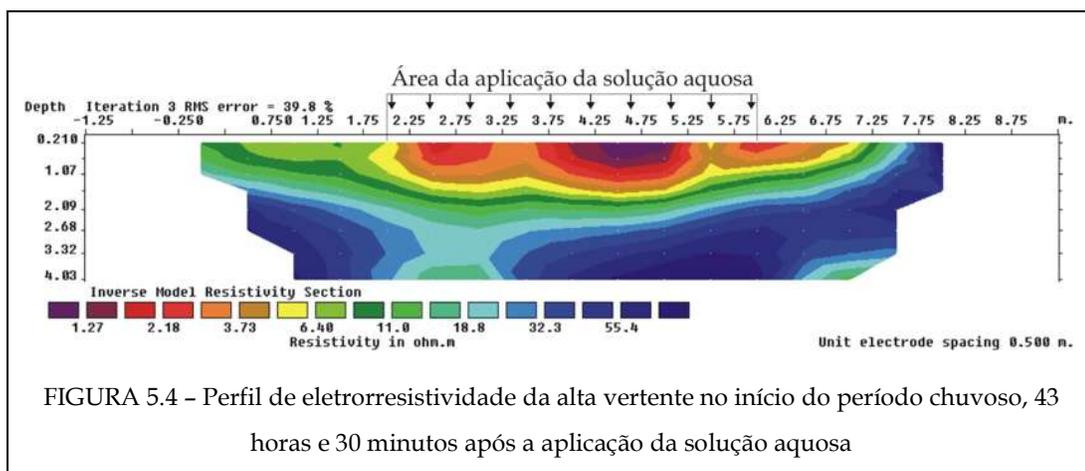


FIGURA 5.2 – Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 4 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa

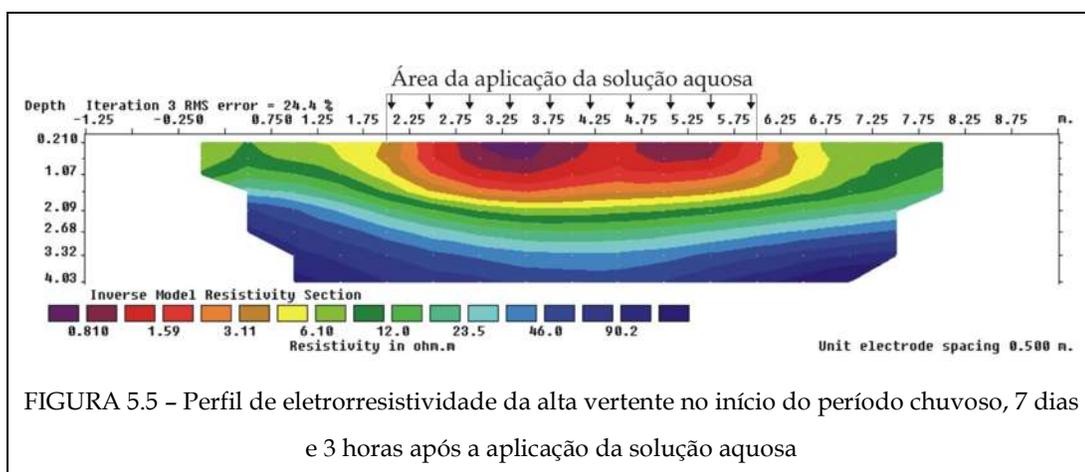
No dia seguinte, às 8:30 h, 20 horas após o término da aplicação da solução salina, foi obtida a 2ª medida. Nesta, é possível verificar um discreto alcance da pluma numa profundidade maior (FIG. 5.3). Ao se comparar com o perfil anterior, nota-se que ocorreu uma concentração dos valores da baixa resistividade na porção central do perfil, com abrangência também no lado esquerdo, ultrapassando a área de aplicação da água.



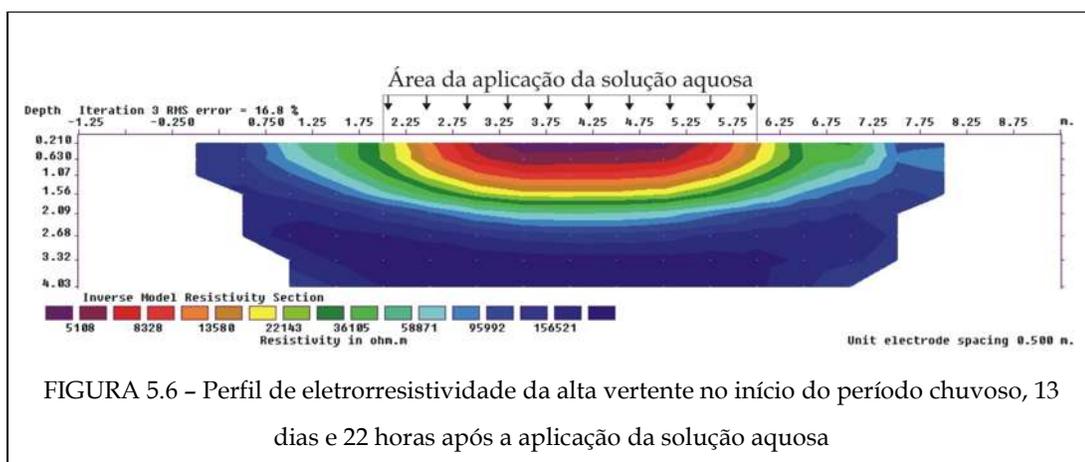
No dia 28/10/06, às 9:00 h, quase dois dias após o término da aplicação da solução salina, foi feita a 3ª medida. Os valores condutivos obtiveram maior alcance neste perfil, e certamente foram afetados pela precipitação ocorrida na madrugada do dia 27 para o dia 28, fazendo com que a pluma não ficasse homogênea (FIG. 5.4).



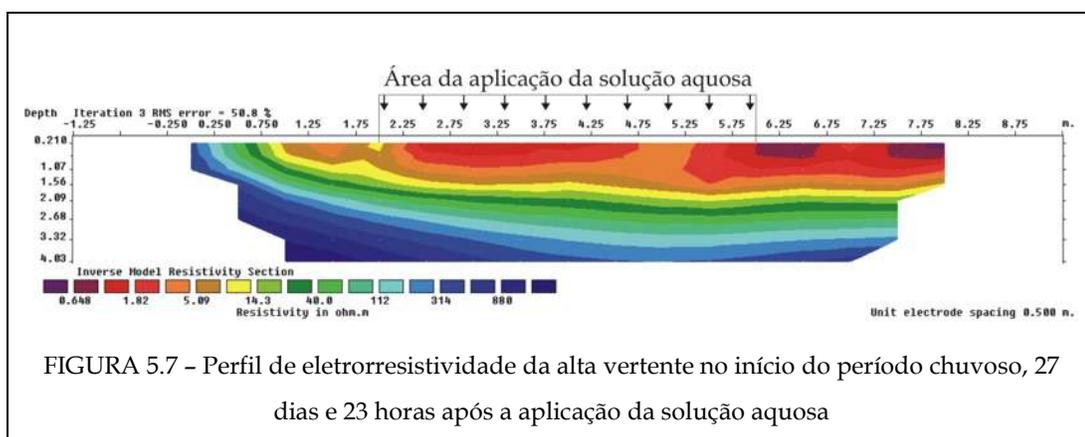
Na semana seguinte, 7 dias e 3 horas após a injeção aquosa, às 16:00 h do dia 02/11/2006, foi feita a 4ª medida, que ainda apresentou valores resistivos baixos próximos à superfície, resultantes da precipitação ocorrida nos dias anteriores à medição (29, 30 e 31/10/2006) (FIG. 5.5).



Na 5ª medida, quase duas semanas depois da aplicação da solução salina, é possível observar que os valores baixos de resistividade distribuíram-se de modo mais homogêneo e horizontalizado, preferencialmente centralizados no perfil (FIG. 5.6).

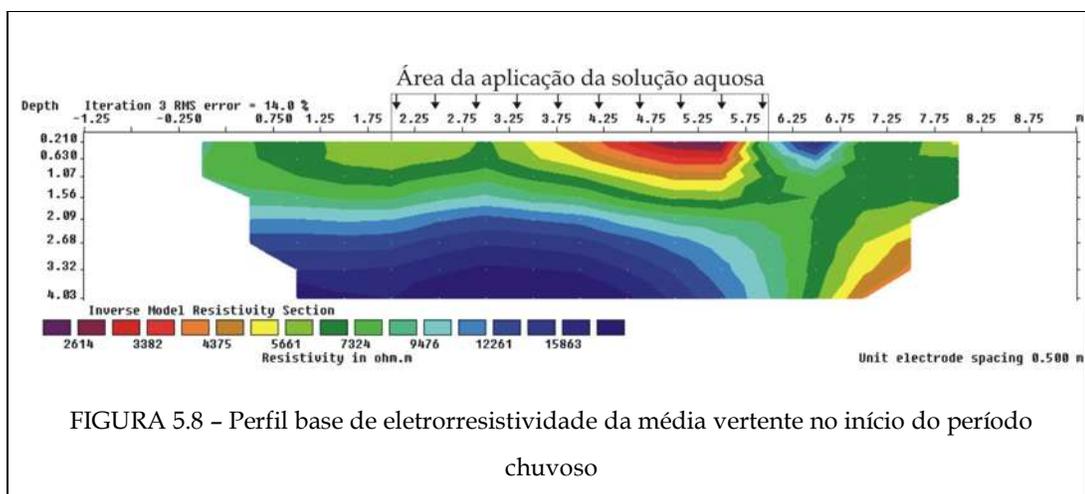


A 6ª e última medida foi feita 4 semanas após a injeção aquosa, no dia 23/11/06 às 11:30 h. O grande volume de chuva precipitado nos dias antecedentes à medição voltaram a interferir na resposta dos valores condutivos, como pode ser visto na FIGURA 5.7. Estes abrangeram quase toda a porção superior do perfil, indo muito além dos limites da área retangular onde se aplicou a água inicialmente, principalmente à direita do perfil.



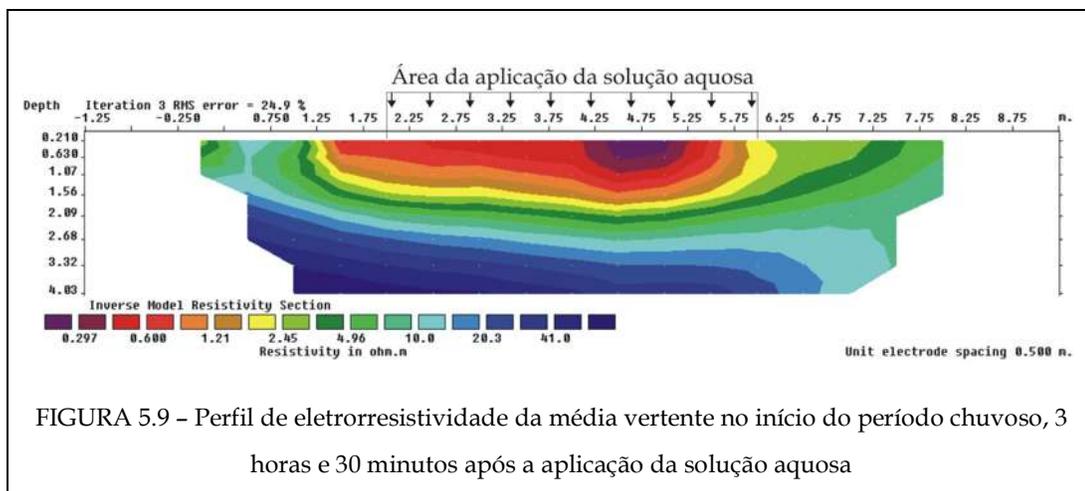
5.3.2 - Parcela da Média Vertente no Início do Período Chuvoso

Assim como na alta vertente, antes de se aplicar a solução salina, foi feito o perfil base de eletrorresistividade, com o solo em condições naturais de umidade. Este perfil também foi obtido no dia 26/10/2006, e serviu de parâmetro para análise dos perfis seguintes. O imageamento elétrico (FIG. 5.8) mostra-se ligeiramente menos resistivo próximo à superfície, em especial à direita do centro, muito provavelmente devido à chuva ocorrida no dia anterior.

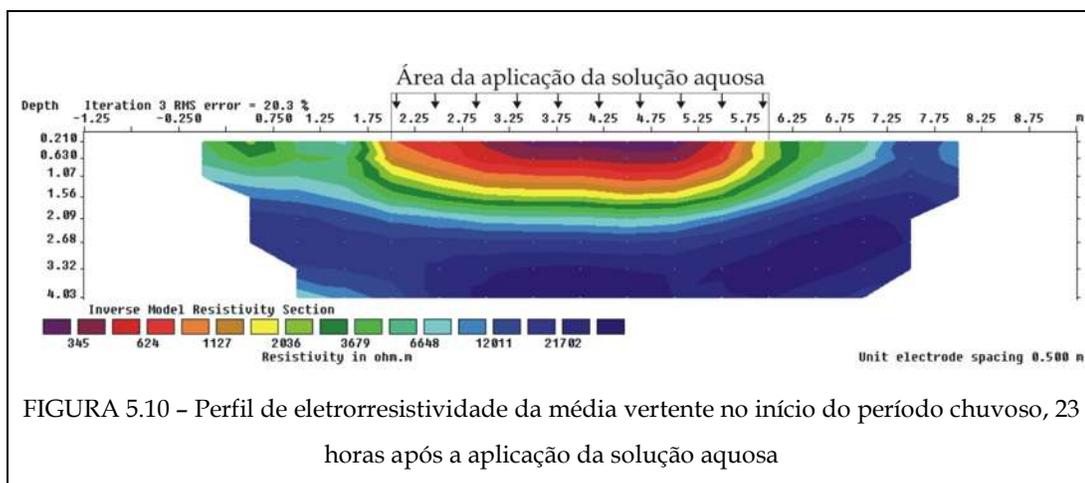


De 11:45 h às 12:30 h do dia 27/10/2006 procedeu-se a aplicação da solução salina na área definida (retângulo de 0,2 m x 4,0 m). Às 16:00 h, 3 horas e 30 minutos após o término da aplicação, foi feita a 1ª medida. Nesta imagem (FIG. 5.9) já é notável o efeito

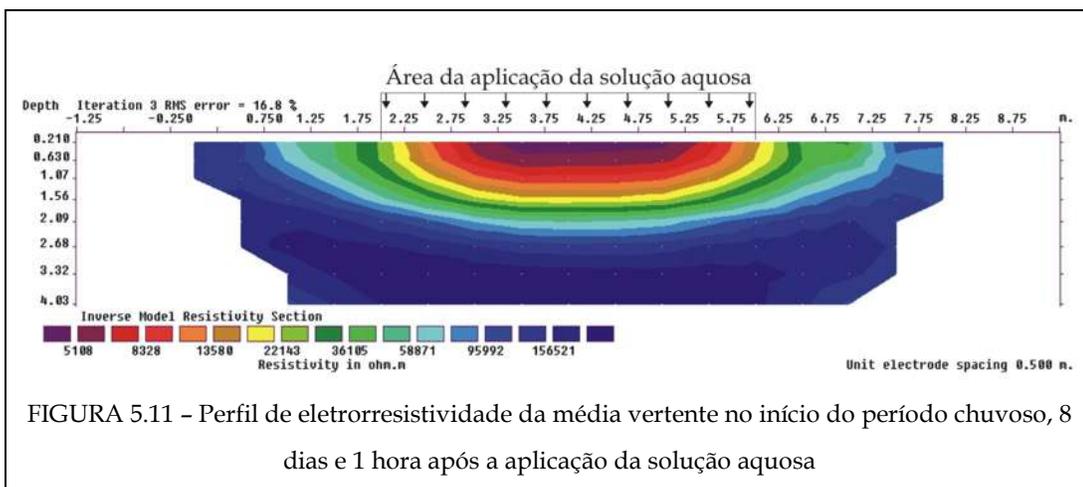
da água na subsuperfície: uma faixa menos resistiva aparece na parte superior do perfil, mostrando o início da descida do fluxo, de modo relativamente regular. Aparentemente o fluxo foi melhor registrado à esquerda do perfil, avançando além dos limites da área retangular, mas o maior alcance em profundidade deu-se mais próximo ao centro, em torno do ponto onde que se mostrava mais condutor no levantamento base.



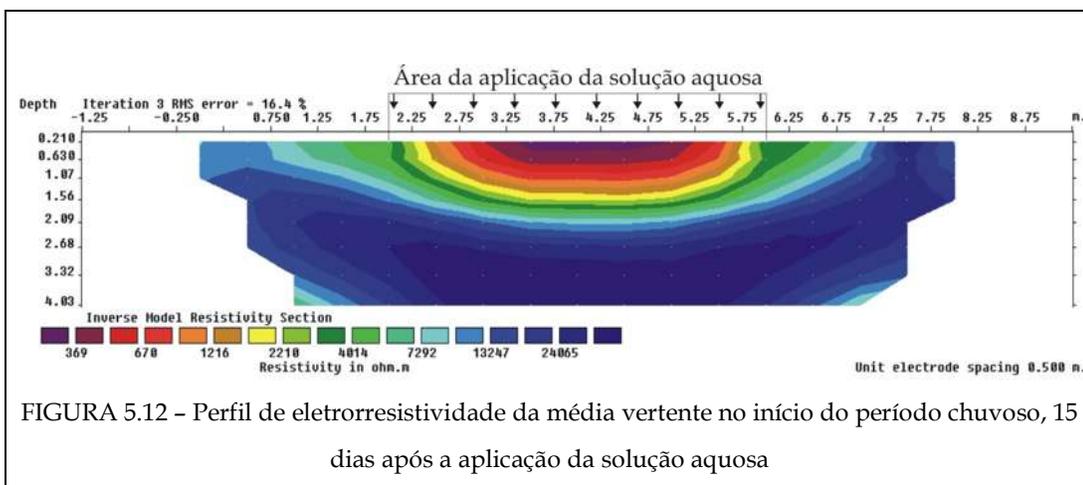
No dia seguinte, às 11:30 h, 23 horas após o término da aplicação da solução salina, foi obtida a 2a medida. Ao se comparar com o perfil anterior, nota-se que os valores condutivos estão mais concentrados na porção central do perfil e dentro dos limites da caixa retangular, e ainda com uma moderada tendência de se aprofundar mais à direita do centro (FIG. 5.10).



Na semana seguinte, 8 dias e 1 hora após a injeção aquosa, no dia 02/11/2006, às 13:30 h, foi feita a 3ª medida. Nesta, é possível observar que os valores condutivos desenham uma forma mais abaulada bem centralizada no perfil, sendo sutilmente visível a descida do fluxo em sua porção central (FIG. 5.11).



Na 4ª medida, quase duas semanas depois da aplicação da solução salina, e após alguns eventos chuvosos, os valores de alta condutividade pouco se alteraram com relação à semana anterior, apresentando uma tendência de maior centralização no perfil (FIG. 5.12).



A 5ª e última medida foi feita 4 semanas após a injeção aquosa, mas provavelmente devido ao alto volume de chuva precipitada no momento da medição,

o perfil de eletrorresistividade gerado apresentou dados incongruentes, e portanto foi excluído desta análise.

5.3.3 – Discussão dos Dados de Eletrorresistividade

Os perfis de eletrorresistividade obtidos nas duas porções da vertente registraram nitidamente a presença da água em subsuperfície. De certa forma, os eventos chuvosos interferiram na leitura da água aplicada artificialmente, uma vez que a metodologia aplicada é sensível justamente a materiais condutores, como o é a água no solo. Todavia, pode-se inferir que o que se observa de mais condutor em profundidade nos perfis seja o avanço da borda inferior da pluma aplicada no primeiro dia do experimento.

Os perfis base foram obtidos em um dia de precipitação recente. Ao se comparar os perfis base das duas posições da vertente, nota-se que o da média vertente apresenta valores de resistividade mais baixos. Esta constatação encontra respaldo na maior capacidade desta porção da vertente em receber, deixar percolar e reter água. Conforme apontado anteriormente, isto se deve essencialmente à associação da conformação côncava de seu relevo, da maior cobertura vegetal e dos maiores valores de argila e microporosidade e, especialmente, da melhor estruturação do seu solo. Opostamente, a alta vertente apresenta menor cobertura vegetal e maior cobertura de solo por capa argilo-siltosa, o que favoreceria o escoamento superficial em detrimento da infiltração.

A comparação dos perfis de eletrorresistividade das duas porções da vertente mostra uma maior homogeneidade da percolação da pluma na média vertente, com um componente vertical mais definido e centralizado. Por sua vez, a percolação é mais desordenada na alta vertente, e apresenta um maior espalhamento horizontal. Isto pode ser explicado pela macroporosidade e maior teor de areia do Cambissolo da alta vertente, contrapondo-se ao Latossolo da média, que é um solo mais bem estruturado e homogêneo. Outra explicação pode ser dada com base nos experimentos de Neto (1994): a maior produção de fluxo lateral de água ocorre no solo menos úmido, e na componente vertical no solo mais úmido, corroborando com os dados obtidos nas medições de tensão do solo.

Os perfis de eletrorresistividade apresentam-se bastante homogêneos espacialmente, não sendo possível a identificação de uma preferência mais específica de direção do fluxo. Isto provavelmente se deve ao fato de a pluma d'água ter sido aplicada homogeneamente ao longo de uma área, e não em pontos de injeção, como é mais comum nos estudos de eletrorresistividade.

Dos sete perfis obtidos na alta vertente, quatro apresentam menores valores de resistividade no lado direito do perfil, o que pode ser interpretado como uma resposta ao leve caimento da vertente para esse lado. O mesmo pôde ser percebido nos levantamentos paralelos de GPR, que coincidem com a linha de levantamento de eletrorresistividade, assim como na observação do azul nas trincheiras abertas.

A escala de profundidade indicada no eixo esquerdo das figuras não condiz muito com a profundidade real alcançada, se esta for tomada como o que se observou em coloração azul na abertura das trincheiras. A aproximação mais real da posição da pluma (no final) seria a dos valores nas cores arroxeadas, que não ultrapassam muito os 60 cm de profundidade. Contudo, era previamente sabido que o caminhamento elétrico (método de eletrorresistividade) não apresenta precisão no cálculo das profundidades, por isto o perfil de um caminhamento elétrico é chamado de "Perfil de pseudo-profundidade" (*pseudo-depth-section*), conforme colocado no item 4.2.5 desta pesquisa.

A abertura das trincheiras para observação do traçador azul revelou um baixo alcance da pluma em profundidade, o mesmo tendo sido também registrado nas medidas de eletrorresistividade. Isto aponta para o fato de que eletrorresistivímetro é tão sensível à água mais livre quanto à água retida em microporos ou adsorvida por argila.

5.4 - Georadar

Os levantamentos por georadar foram realizados em ambos os períodos estudados, conforme descrito no item 4.1.3. Os radargramas resultantes do uso das diferentes antenas utilizadas - 100, 200, 400 e 1.000 MHz - foram processados de modo a obter a melhor visualização possível da pluma.

A antena que se mostrou mais eficiente para este fim foi a de 200 MHz, tendo sido a mais utilizada nesta análise dos dados. Em alguns momentos das medições em campo, a antena de 200 MHz apresentou problemas e, nestes casos, os radargramas analisados foram aqueles obtidos com as antenas de 1.000 MHz (1 GHz).

Vários modos de visualização dos radargramas também foram testados, e no ANEXO D podem ser vistos exemplos dos tipos de resultados.

Para essa análise de resultados ressalta-se que a posição da caixa delimitadora nos radargramas vai da posição 3 à posição 7 metros, sendo 5 metros o centro do perfil e da caixa.

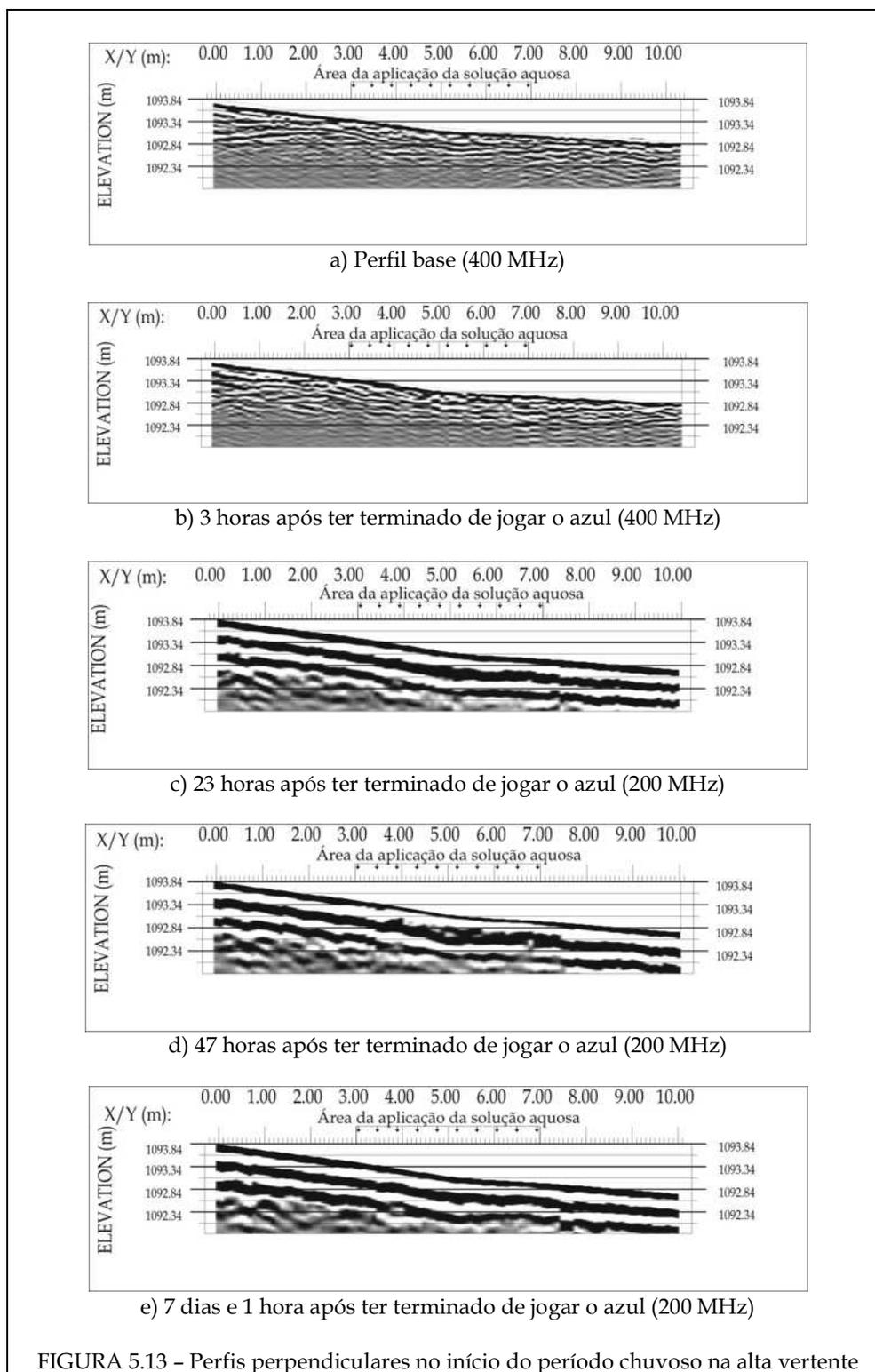
5.4.1 - Dados do Início do Período Chuvoso

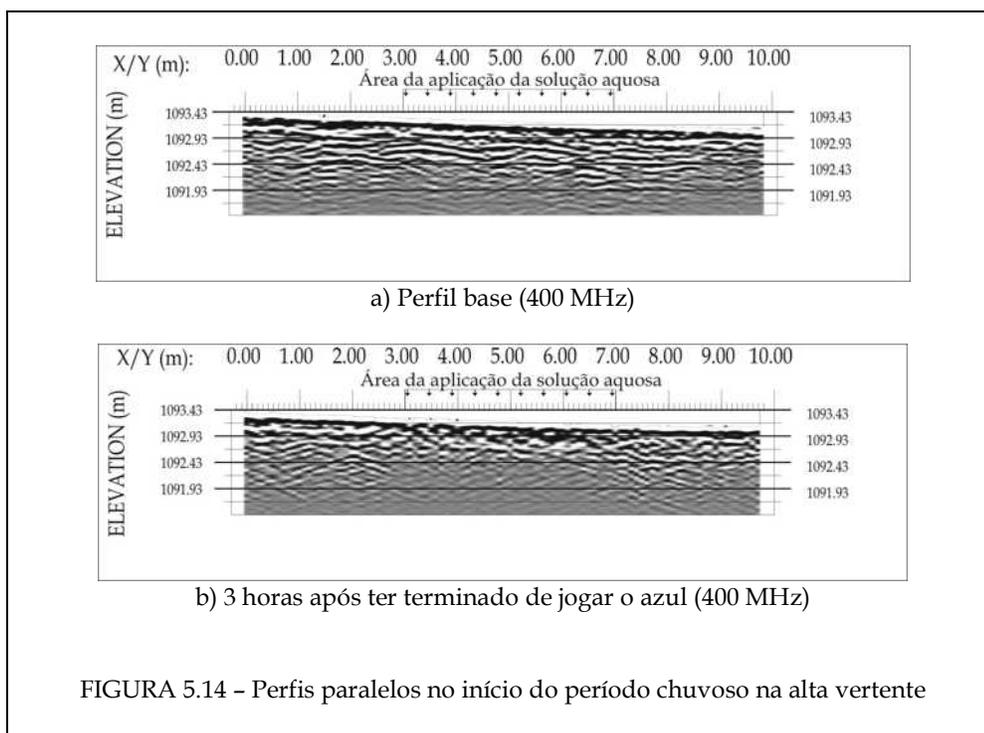
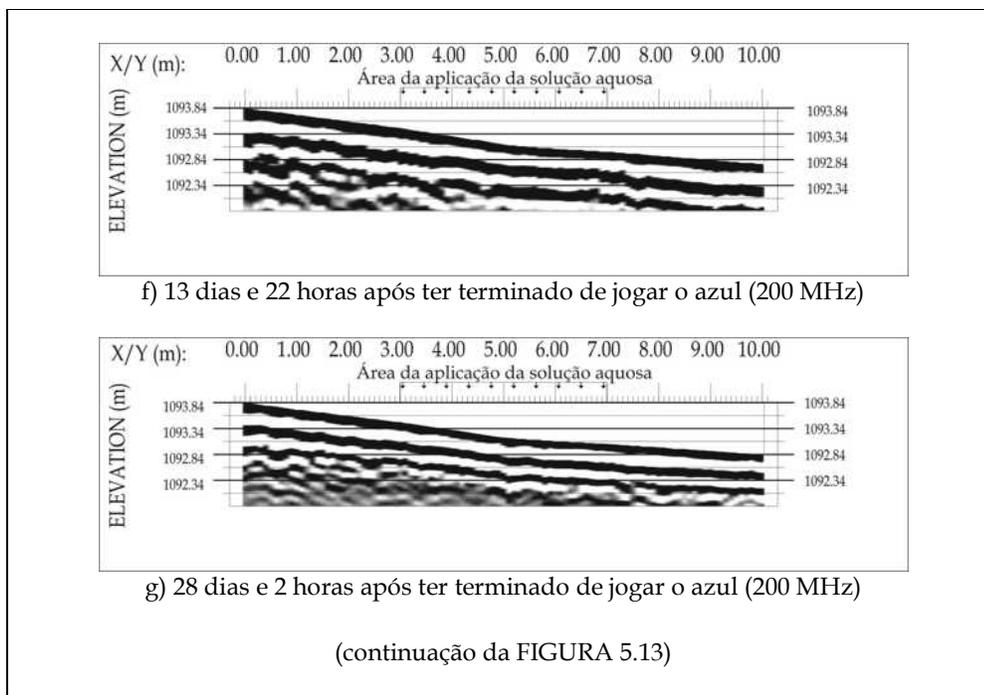
A idéia inicial era de se utilizar a antena de 400, ao invés da antena de 200 MHz. Porém no campo, após 3 medidas na alta vertente, percebeu-se que ela não seria tão eficiente em função dos ruídos que ela apresentou e, a partir de então, foi substituída pela de 200 MHz.

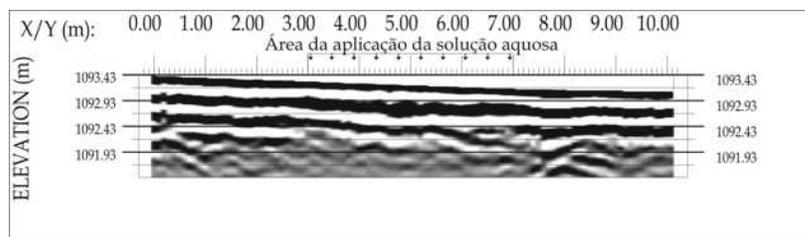
Do perfil base para os perfis obtidos poucas horas depois de aplicada a água, nota-se nos radargramas que houve uma ligeira alteração na atenuação das ondas, principalmente a onda direta, mais próximas à superfície. No dia seguinte à aplicação da água, a pluma pode ser vista a uma profundidade um pouco maior (FIG. 5.13 e 5.14 'c'). Na 47ª hora após a injeção da água, a perturbação das ondas mostra-se ligeiramente acima da posição do dia anterior (FIG. 5.13 e 5.14 'd'). Uma semana depois, ainda é bem perceptível a presença da pluma, porém esta se manteve próximo à profundidade anterior (FIG. 5.13 e 5.14 'e'). Após duas semanas, é mais perceptível o afastamento da frente, o mesmo ocorrendo na 5ª e última semana após a aplicação da água, quando ela praticamente só é perceptível na parte mais inferior dos radargramas (FIG. 5.13 e 5.14 'f' e 'g').

A comparação do comportamento da água na alta e na média vertente na medição de uma semana após a aplicação da água mostra que a pluma alcançou maior profundidade na alta. Nos perfis paralelos da alta há uma tendência ao escoamento

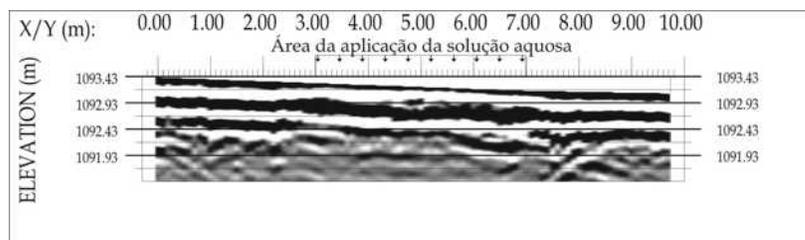
preferencial pra direita. Nos perfis perpendiculares, tanto da alta quanto da média vertente, é possível notar uma maior acumulação da água à direita, ou seja, em posição mais inferior na vertente, até mesmo após passadas cinco semanas (FIG. 5.13 e 5.14).



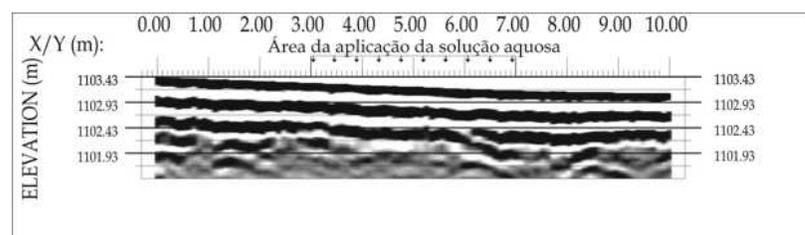




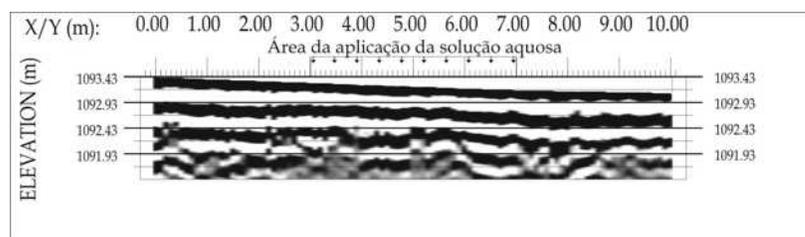
c) 23 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



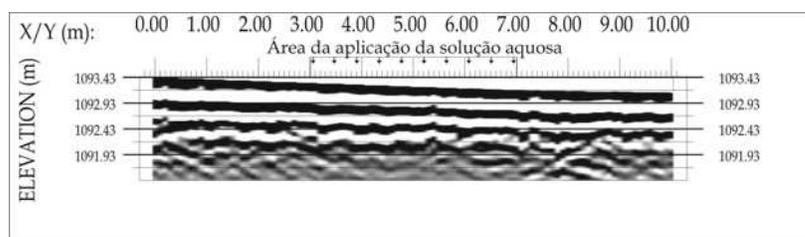
d) 47 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



e) 7 dias e 1 hora após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

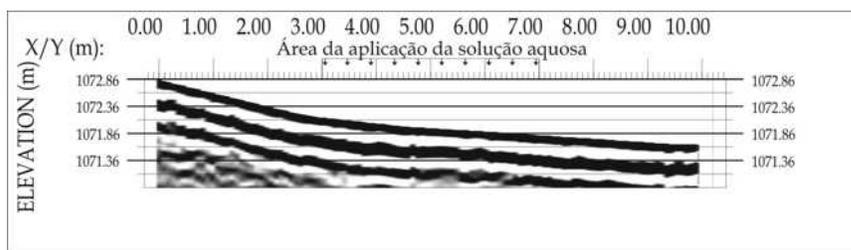


f) 13 dias e 22 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

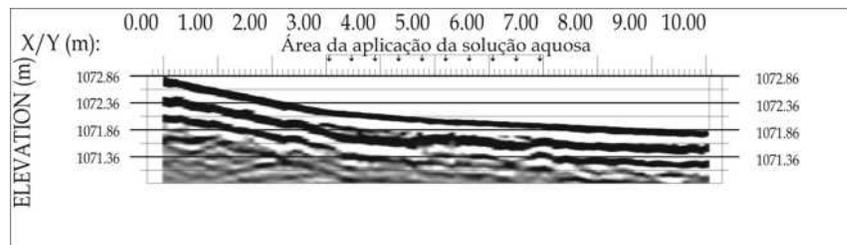


g) 28 dias e 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

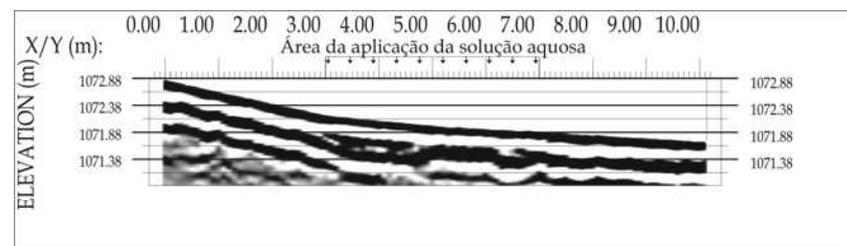
(continuação da FIGURA 5.14)



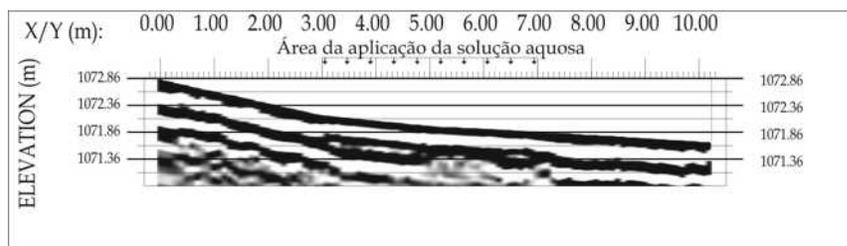
a) Perfil base (200 MHz)



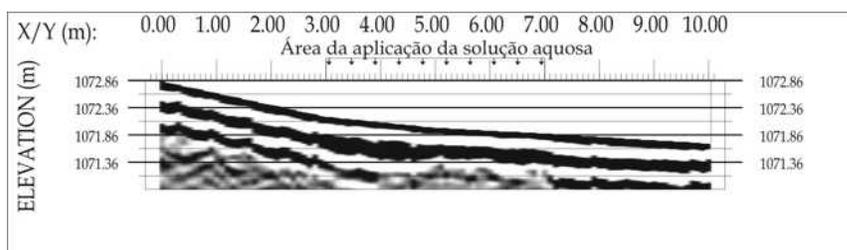
b) 1 hora após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



c) 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

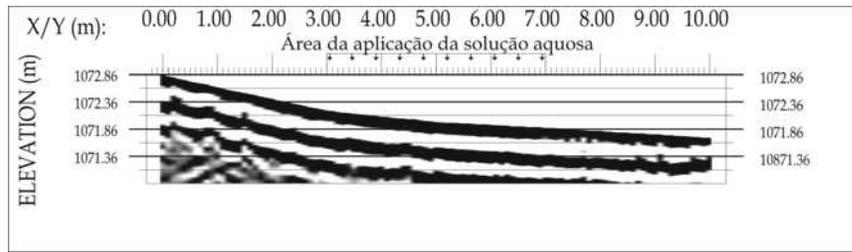


d) 21 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

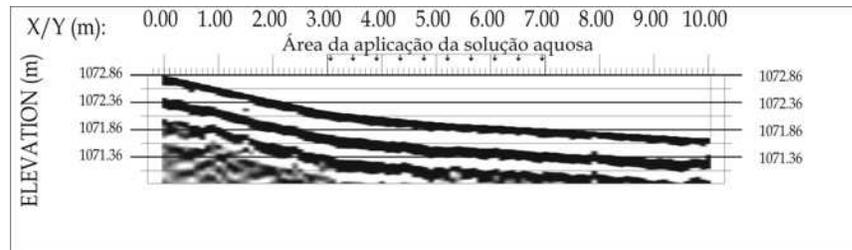


e) 8 dias e 4 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

FIGURA 5.15 - Perfis perpendiculares no início do período chuvoso na média vertente

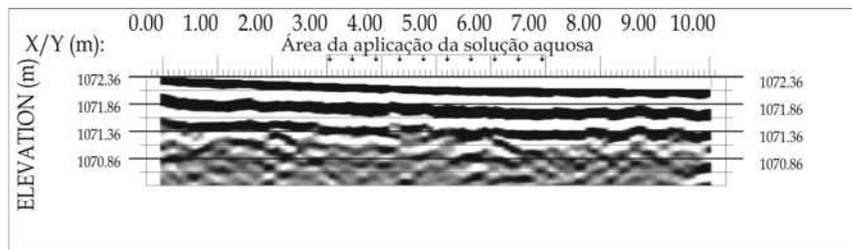


f) 15 dias e 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

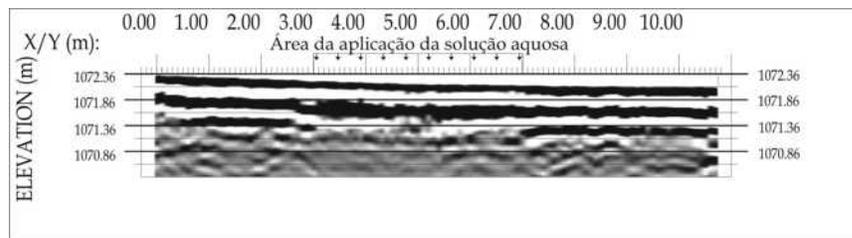


g) 29 dias e 4 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

(continuação da FIGURA 5.15)

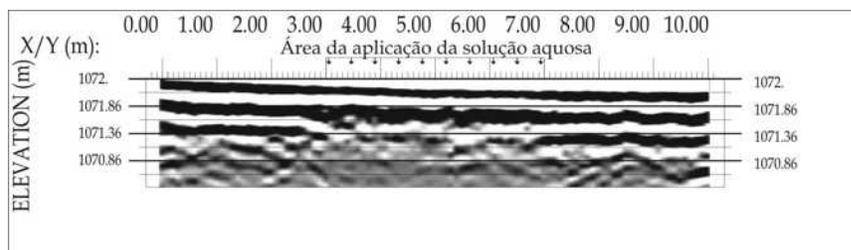


a) Perfil base (200 MHz)

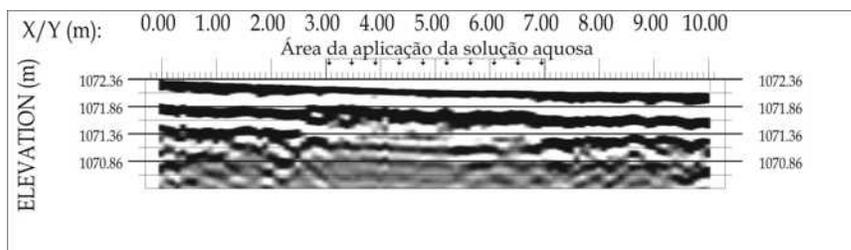


b) 1 hora após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

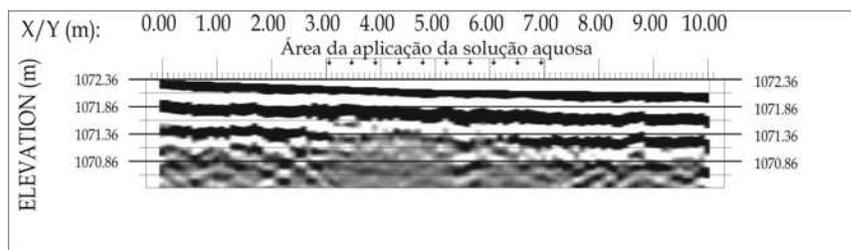
FIGURA 5.16 - Perfis paralelos no início do período chuvoso na média vertente



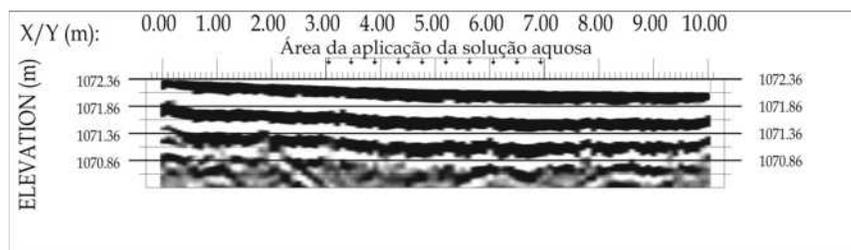
c) 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



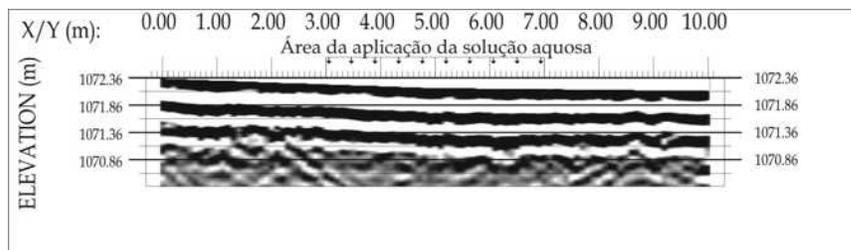
d) 21 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



e) 8 dias e 4 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



f) 15 dias e 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



g) 29 dias e 4 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

(continuação da FIGURA 5.16)

5.4.1.1 - Discussão dos Dados de GPR do Início do Período Chuvoso

O fato de que na 47^a hora após a injeção da água a perturbação das ondas ter se mostrado ligeiramente acima da posição do dia anterior tem explicação na chuva precipitada na madrugada desse 2º dia.

A diferença do comportamento da água na alta e na média vertente na medição de uma semana após a aplicação da água revela que na alta a pluma alcançou maior profundidade. Assim, como a água na média vertente demorou mais tempo para percorrer a mesma distância, conclui-se que a água, uma vez infiltrada à superfície nesta porção da vertente, tem uma percolação mais lenta que na alta vertente, onde a água desce mais rapidamente. Tal ocorrência pode ser explicada pela alta permeabilidade do Cambissolo da alta vertente, resultante da sua macroporosidade e do seu maior teor de areia. Opostamente, o Latossolo da média vertente parece apresentar maior capacidade de reter a água, por suas características de teor de argila e microporosidade.

A tendência de escoamento preferencial para o lado direito nos perfis paralelos da alta vertente deve ser uma resposta ao sutil caimento da vertente para esse lado. O mesmo foi verificado nos perfis de eletrorresistividade, que têm posição coincidente com os perfis paralelos de GPR, assim como na abertura das trincheiras, por meio do traçador azul.

5.4.2 - Dados do Final do Período Chuvoso

A aquisição de alguns perfis da alta vertente deste período foi iniciada em posição um pouco deslocada na linha de levantamento, fazendo com que o centro seja visualizado na posição 3 metros (FIG. 5.17; FIG. 5.18 'b'), mas sem prejuízo à análise dos dados.

Do perfil base para os perfis obtidos pouco tempo depois de aplicada a água, é notável a atenuação das ondas EM mais próximas à superfície. Quase 24 horas após a aplicação da água, a perturbação das ondas mostra-se ligeiramente acima da posição do dia anterior (FIG. 5.17 'd' e FIG. 5.18 'd'). Nas semanas seguintes, ainda é bem perceptível a presença da pluma, sendo clara a perturbação das ondas em profundidade. Na 5ª e

última semana após a aplicação da água, a frente encontra-se um pouco mais afastada da superfície, e sua presença em profundidade ainda é marcante.

Logo na 1ª medida após a injeção da água é possível notar que na alta vertente a água passa rapidamente pelas primeiras camadas do solo, alcançando maior profundidade que a pluma na média vertente, e em menor tempo (FIG. 5.17 'b' e FIG. 5.18 'b'). Nos perfis paralelos da alta (FIG. 5.18) há uma leve tendência ao escoamento preferencial para a direita; nos perpendiculares (FIG. 5.17), é possível identificar uma maior acumulação da água à direita, ou seja, em posição mais baixa na vertente, até mesmo após passadas cinco semanas da aplicação da água.

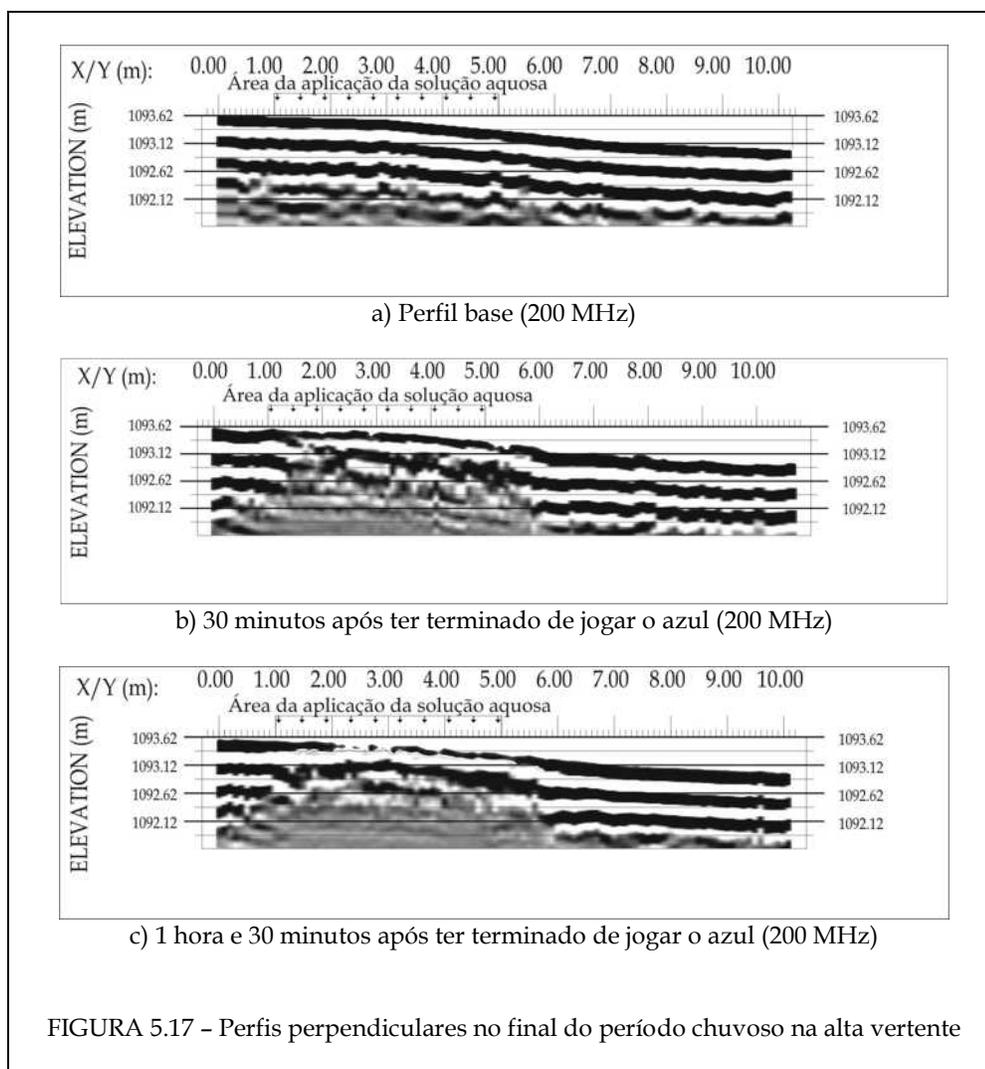
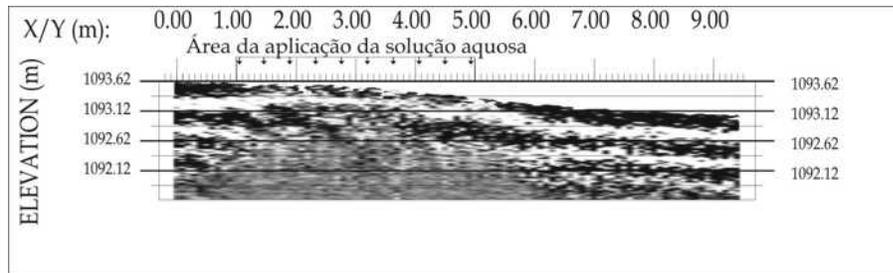
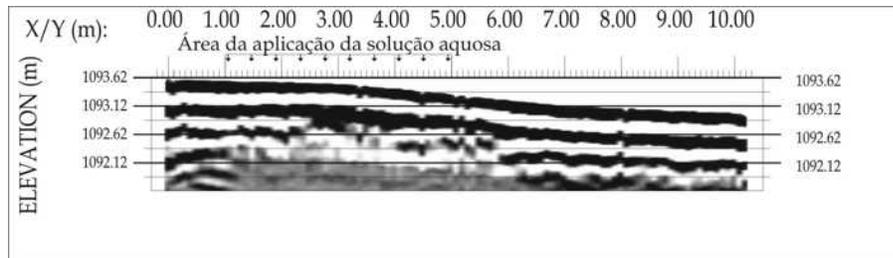


FIGURA 5.17 - Perfis perpendiculares no final do período chuvoso na alta vertente

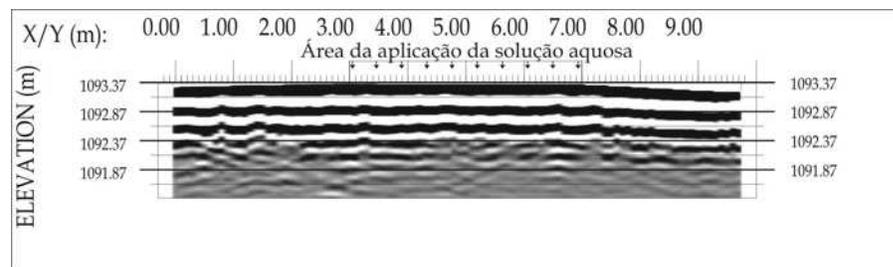


d) 23 horas e 15 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

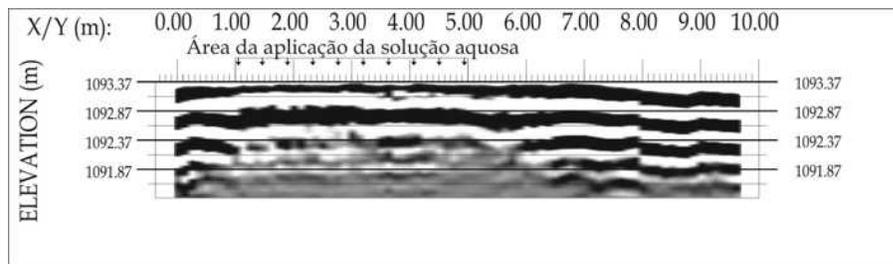


e) 28 dias e 30 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

(continuação da FIGURA 5.17)

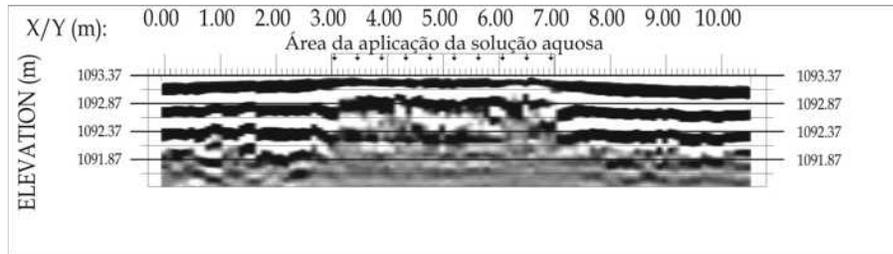


a) Perfil base (200 MHz)

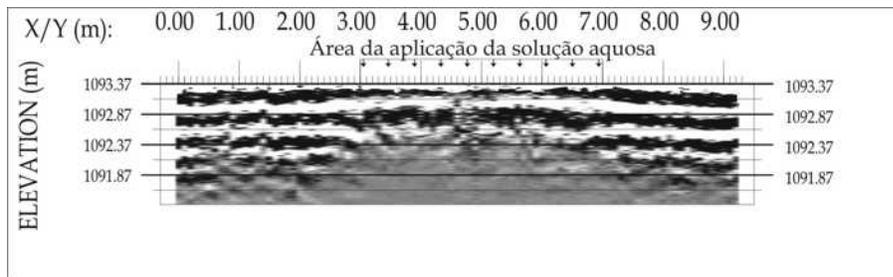


b) 30 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

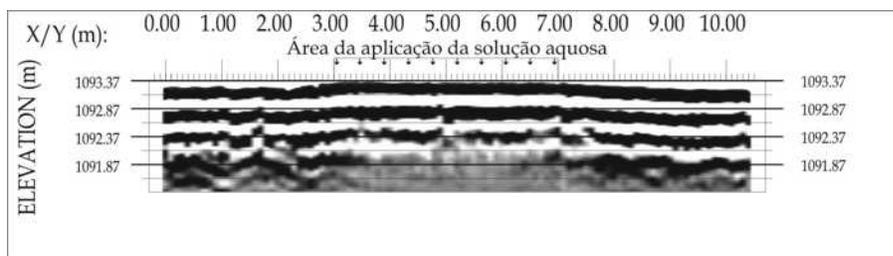
FIGURA 5.18 - Perfis paralelos no final do período chuvoso na alta vertente



c) 1 hora e 30 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

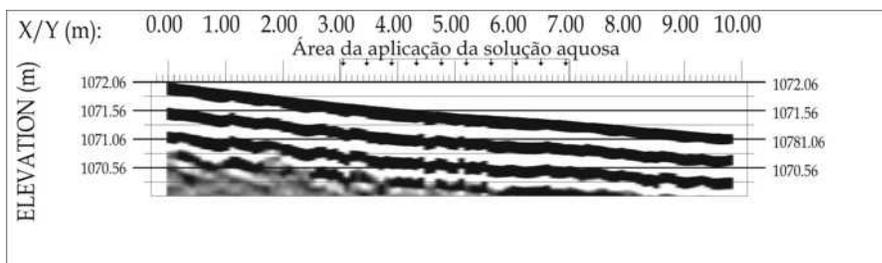


d) 23 horas e 15 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

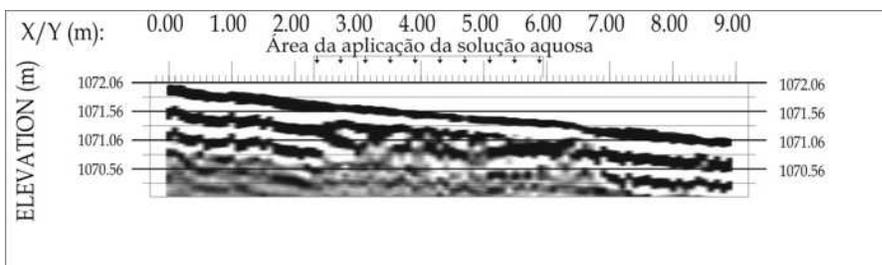


e) 28 dias e 30 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

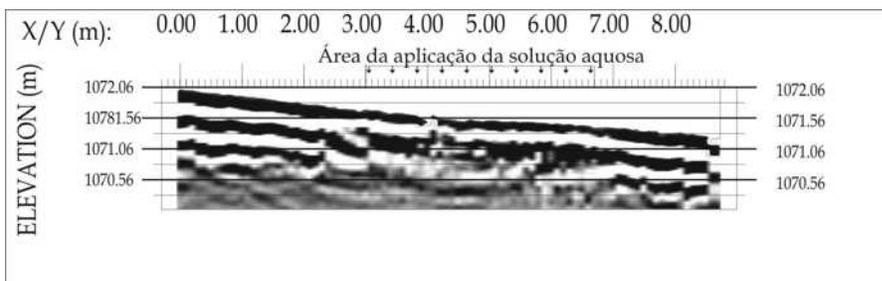
(continuação da FIGURA 5.18)



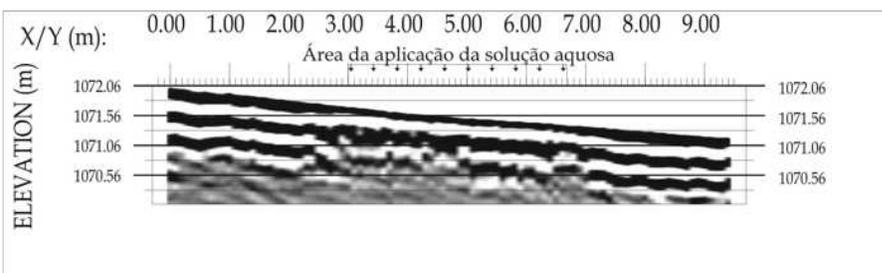
a) Perfil base (200 MHz)



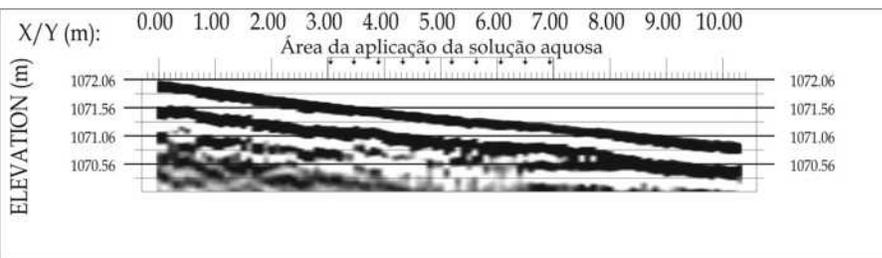
b) 1 hora após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



c) 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

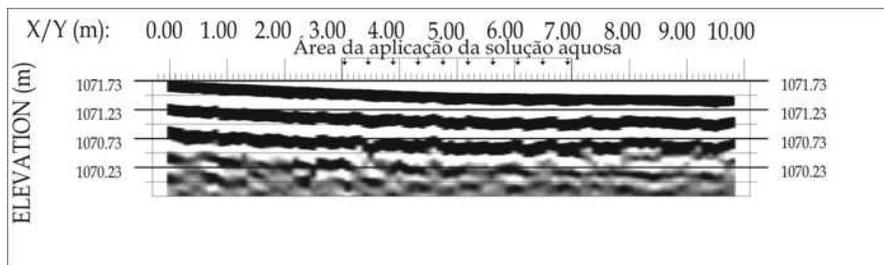


d) 18 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

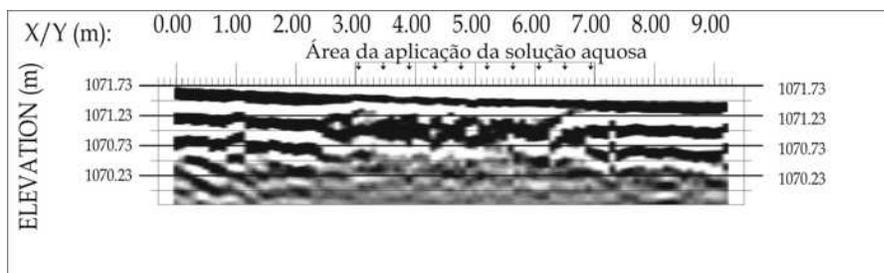


e) 27 dias, 19 horas e 30 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

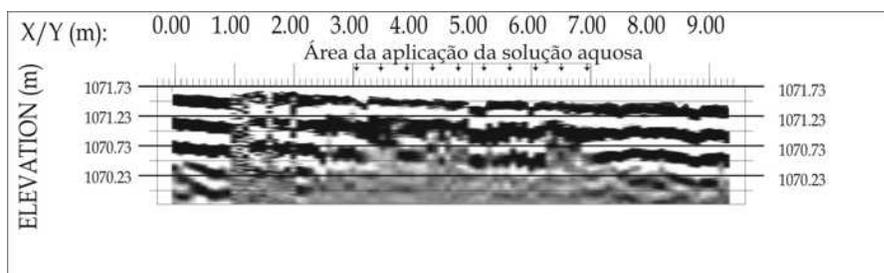
FIGURA 5.19 - Perfis perpendiculares no final do período chuvoso na média vertente



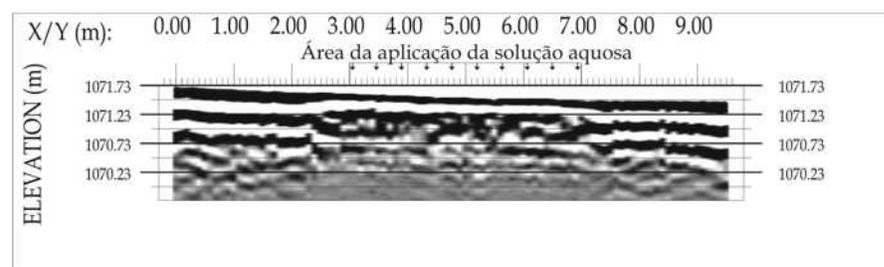
a) Perfil base (200 MHz)



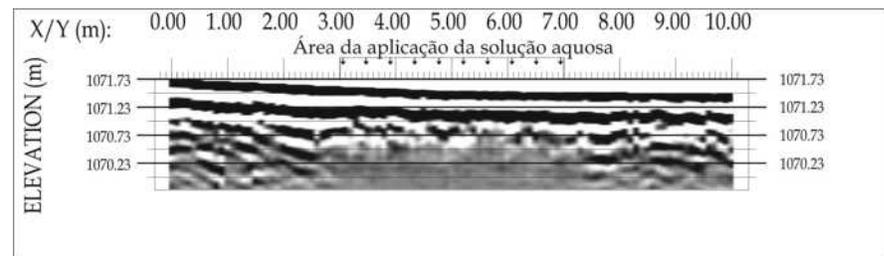
b) 1 hora após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



c) 2 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



d) 18 horas após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)



e) 27 dias, 19 horas e 30 minutos após ter terminado de jogar o azul (200 MHz)

FIGURA 5.20 - Perfis paralelos no final do período chuvoso na média vertente

5.4.2.1 - Discussão dos Dados de GPR do Final do Período Chuvoso

Na comparação dos perfis de GPR dos dois períodos analisados destaca-se a maior percolação da água em profundidade ao final do período chuvoso, contradizendo a hipótese inicial desta pesquisa, de que em solo mais úmido a água infiltraria menos, devido à menor tensão de sucção (Klar, 1988). Isto é especialmente perceptível na 5ª semana de medição, quando ainda é espessa a área de atenuação das ondas pela pluma na média vertente. A mesma constatação de maior profundidade no final do período chuvoso foi averiguada com a abertura das trincheiras para observação do azul.

A comparação dos perfis dos dois períodos analisados também aponta para um maior espalhamento horizontal da água no início do período chuvoso, enquanto ao final do período, o componente de percolação é mais vertical. Tal constatação também foi feita na análise dos perfis de eletrorresistividade e dos dados de tensiometria, e, assim como para estes métodos, pode ser explicada com base nos experimentos de Neto (1994), para quem a maior produção de fluxo lateral de água ocorre no solo menos úmido, e na componente vertical no solo mais úmido.

5.5 - Traçador Colorimétrico

A aplicação do corante Brilliant Blue FCF e a posterior abertura de trincheiras no solo para sua visualização foram realizadas nos dois períodos analisados, em quatro estações em cruz, conforme detalhadamente descrito na metodologia deste trabalho. A análise do traçador foi feita por segmentos de cada cruz, e, para melhor entendimento do esquema de cortes dos perfis nas mesmas, sugere-se ao leitor que retorne à página 70 desta pesquisa. Ademais, um modo de visualização tridimensional foi gerado por meio de interpolação das plumas pelo método de krigagem no *software* Surfer®.

5.5.1 - Parcela da Alta Vertente

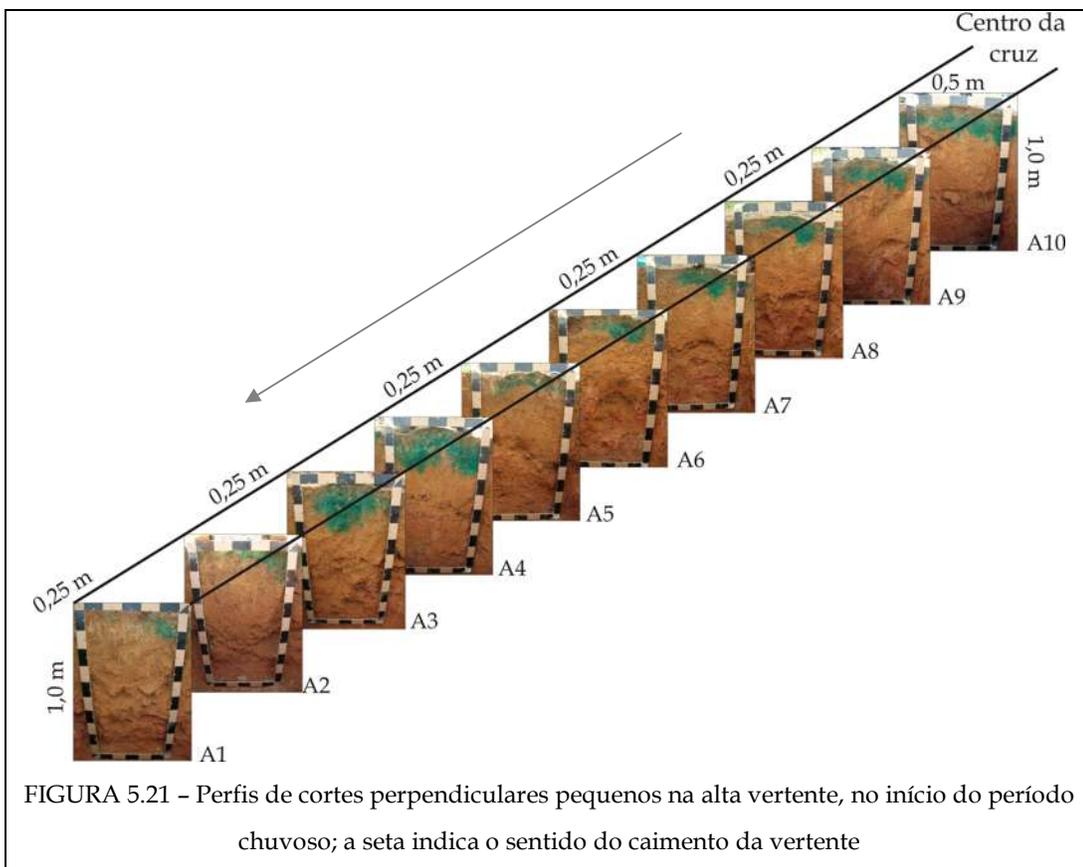
A injeção da solução traçadora nas estações experimentais da alta vertente apresentou significativo grau de empoçamento e escoamento superficial em ambos os períodos

analisados. No início do período chuvoso, o tempo de aplicação foi de 1 hora e 15 minutos; ao final do período, de 2 horas e 30 minutos.

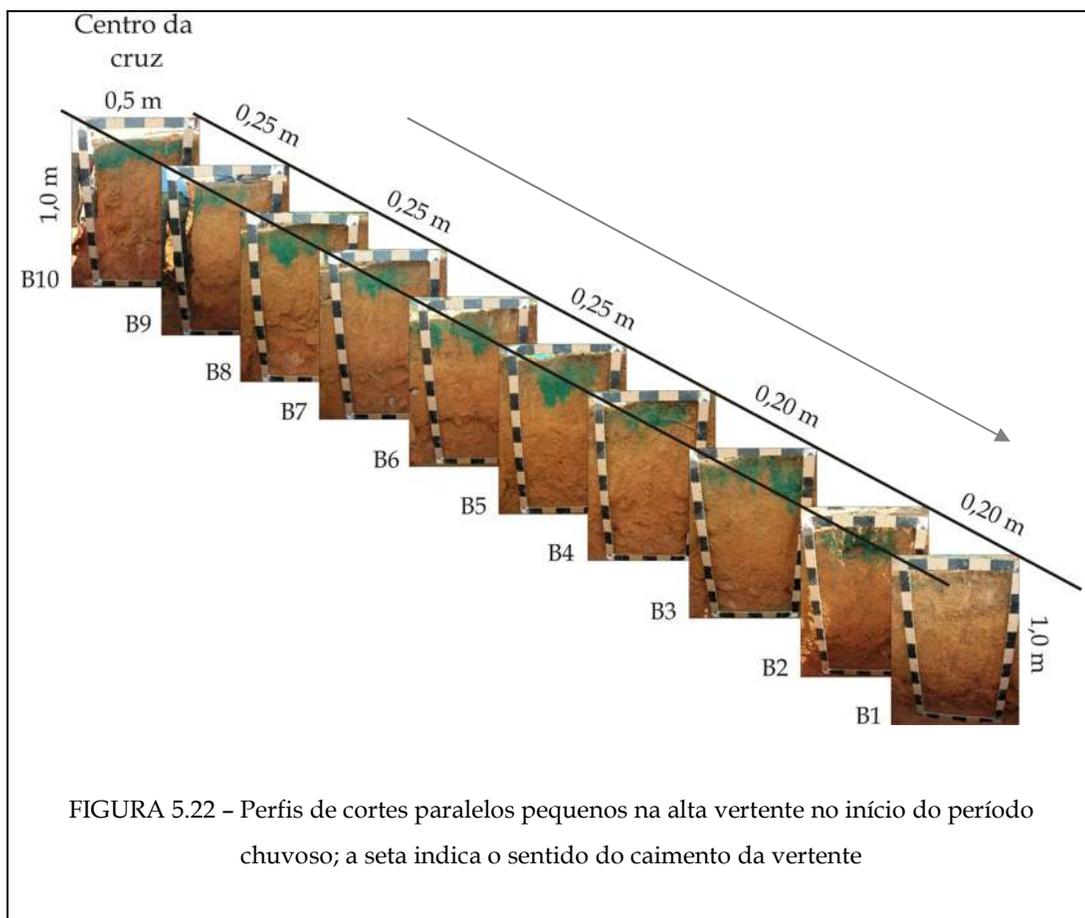
5.5.1.1 - Início do Período Chuvoso

Na abertura das trincheiras no início do período chuvoso, a profundidade máxima alcançada pela solução traçadora foi de 31 cm nos perfis perpendiculares pequenos (embora tenham sido observadas manchas isoladas que chegaram a 44 e 75 cm); 20 cm nos perfis perpendiculares grandes; 30 cm nos perfis paralelos pequenos e 17 cm nos perfis paralelos grandes. A média para o braço perpendicular da cruz foi de 19,5 cm e, para o braço paralelo, de 20,6 cm.

Nos perfis perpendiculares pequenos, sete dos dez perfis apresentaram forte concentração da pluma à direita, independentemente da profundidade alcançada. Isto ocorreu até mesmo no primeiro corte do solo, que foi feito a 20 cm do início da área de aplicação do traçador. Os cortes A5, A6, A7 e A8 apresentam plumas semelhantes, de forma abaulada (FIG. 5.21).



Nos perfis paralelos pequenos, apenas traços do azul apareceram no primeiro perfil do solo, feito a 20 cm da área de injeção do corante azul. Apesar dos formatos variados, a pluma tende a se concentrar à esquerda em nove dos dez perfis apresentados (FIG. 5.22), mostrando que o fluxo tende a se concentrar em direção ao caimento da vertente.



Os perfis perpendiculares grandes, correspondentes ao braço paralelo ao caimento da vertente, apresentaram-se bastante diferentes um do outro. No primeiro perfil, A11, a pluma alcançou menores profundidades e concentrou-se à direita do perfil. No perfil A12, a pluma encontrou-se mais profunda e a tendência de se concentrar à direita foi mais sutil (FIG. 5.23).

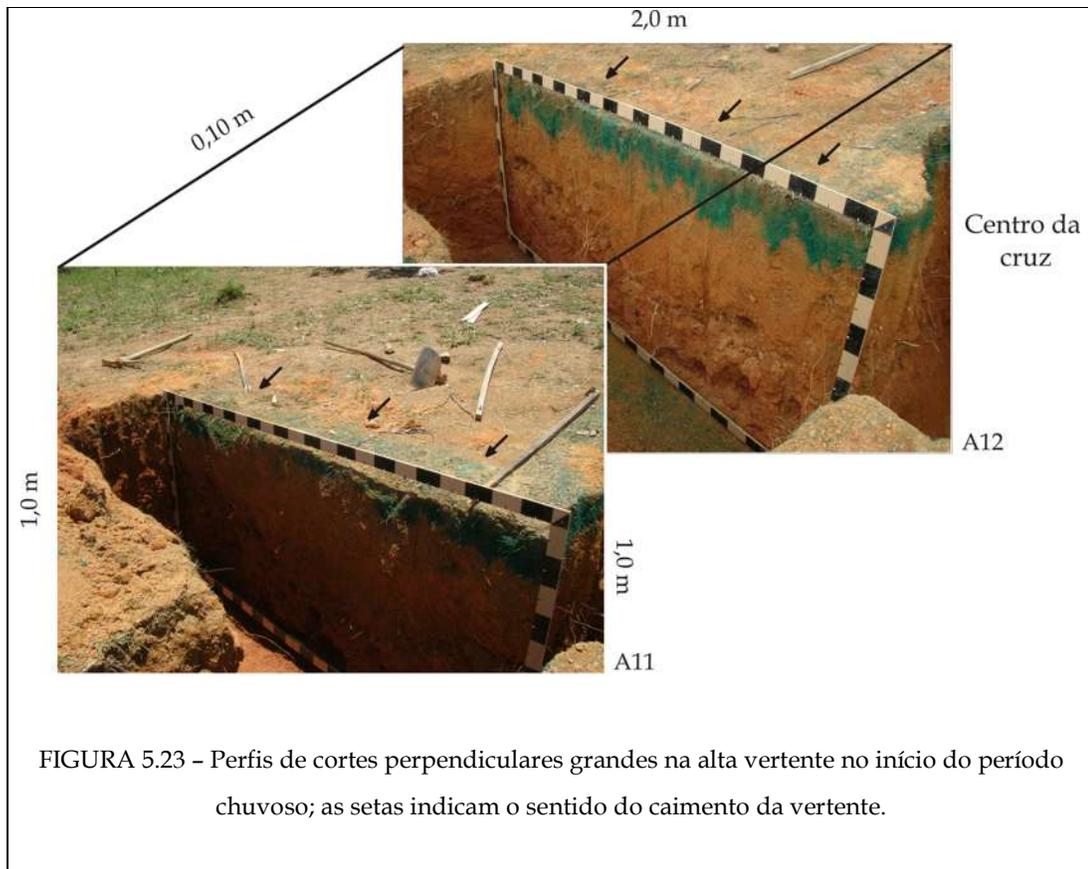


FIGURA 5.23 - Perfis de cortes perpendiculares grandes na alta vertente no início do período chuvoso; as setas indicam o sentido do caimento da vertente.

Nos perfis paralelos grandes, correspondentes ao braço perpendicular ao caimento da vertente, ficou evidente que as maiores profundidades alcançadas pela pluma ocorrem na porção mais próxima ao centro da cruz, assim como o fluxo como um todo (FIG. 5.24).

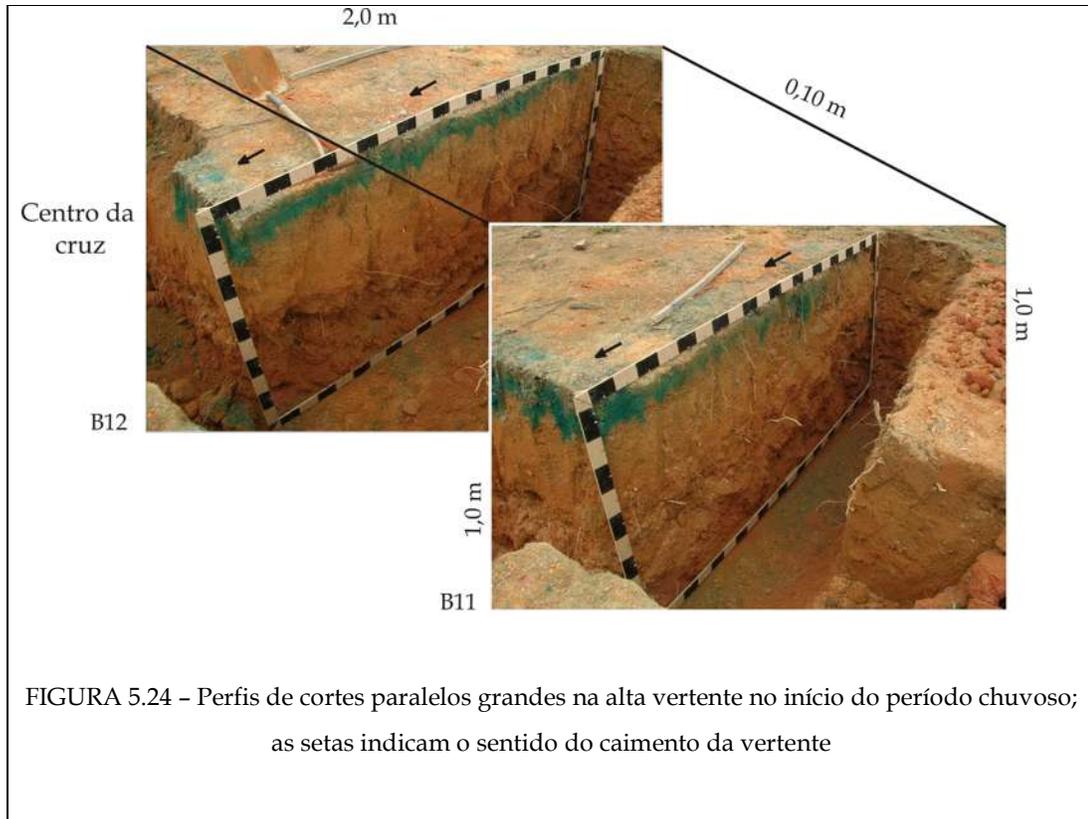
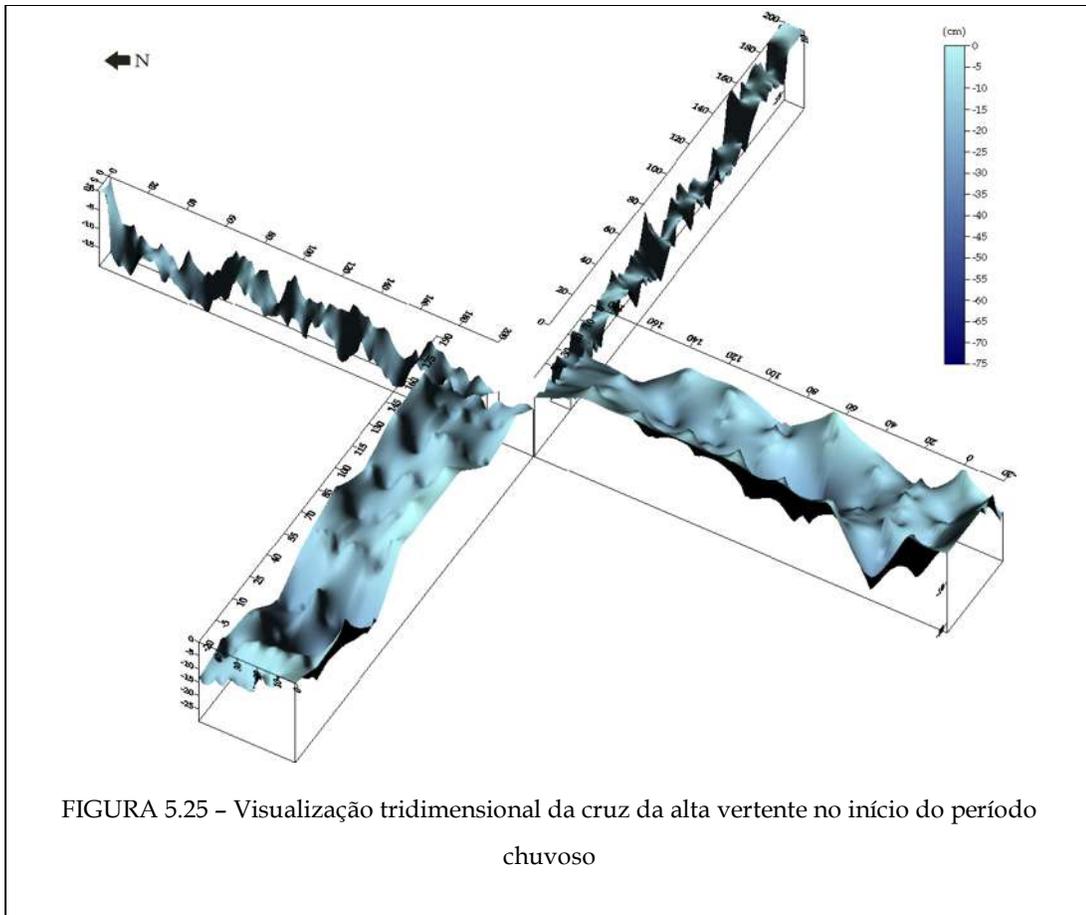


FIGURA 5.24 - Perfis de cortes paralelos grandes na alta vertente no início do período chuvoso; as setas indicam o sentido do caimento da vertente

O modo de visualização tridimensional das plumas dos perfis da alta vertente do início do período chuvoso pode ser visualizado na FIGURA 5.25. Por meio desta é possível observar que o comportamento das plumas apresentou-se heterogêneo, visto em forma de picos na figura. Nota-se também que o fluxo tende a se concentrar na parte de baixo do braço inferior, e no lado direito do braço da direita, sendo ambos sentidos de escoamento preferenciais da vertente.



5.5.1.2 - Final do Período Chuvoso

Na abertura das trincheiras no final do período chuvoso a profundidade máxima alcançada pela solução traçadora foi de 73 cm nos perfis perpendiculares pequenos; 35 cm nos perfis perpendiculares grandes; 47 cm nos perfis paralelos pequenos e 23 cm nos perfis paralelos grandes. A média para o braço perpendicular da cruz foi de 32,1cm e para o braço paralelo de 29,8 cm.

Nos perfis perpendiculares pequenos, as maiores profundidades alcançadas foram registradas na parte mais baixa da cruz. A pluma aparece no primeiro perfil do solo, feito a 20 cm da área de injeção do corante azul, e em grande profundidade. De modo geral, a pluma ocorre centralizada no perfil (FIG. 5.26).

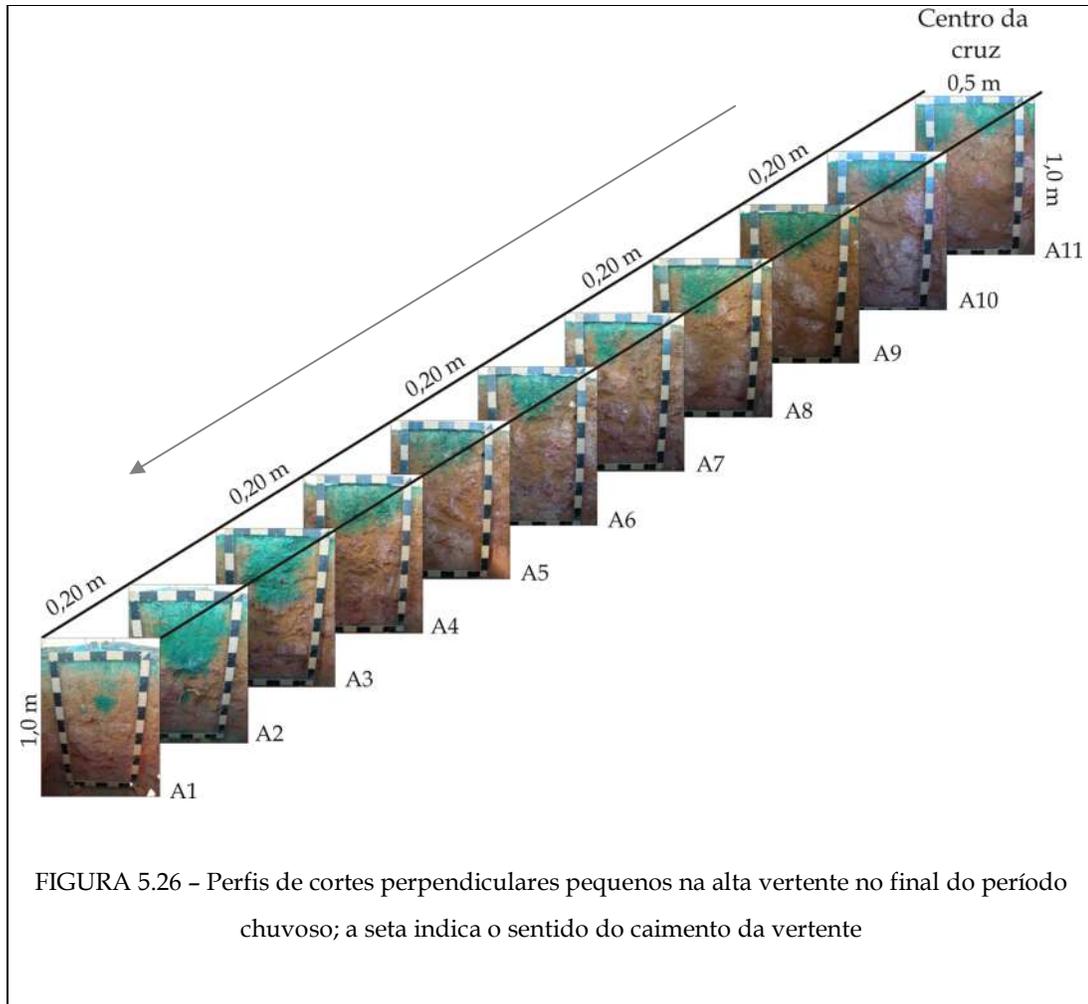


FIGURA 5.26 - Perfis de cortes perpendiculares pequenos na alta vertente no final do período chuvoso; a seta indica o sentido do caimento da vertente

Nos perfis paralelos pequenos, o azul não apareceu no primeiro perfil do solo, feito a 20 cm da área de injeção do corante azul. Apesar dos formatos variados, a plumagem parece ter uma orientação diagonal noroeste no perfil e concentra-se preferencialmente à esquerda, tendo alcançado as maiores profundidades mais ao centro do braço, nos perfis B6 e B7 (FIG. 5.27).

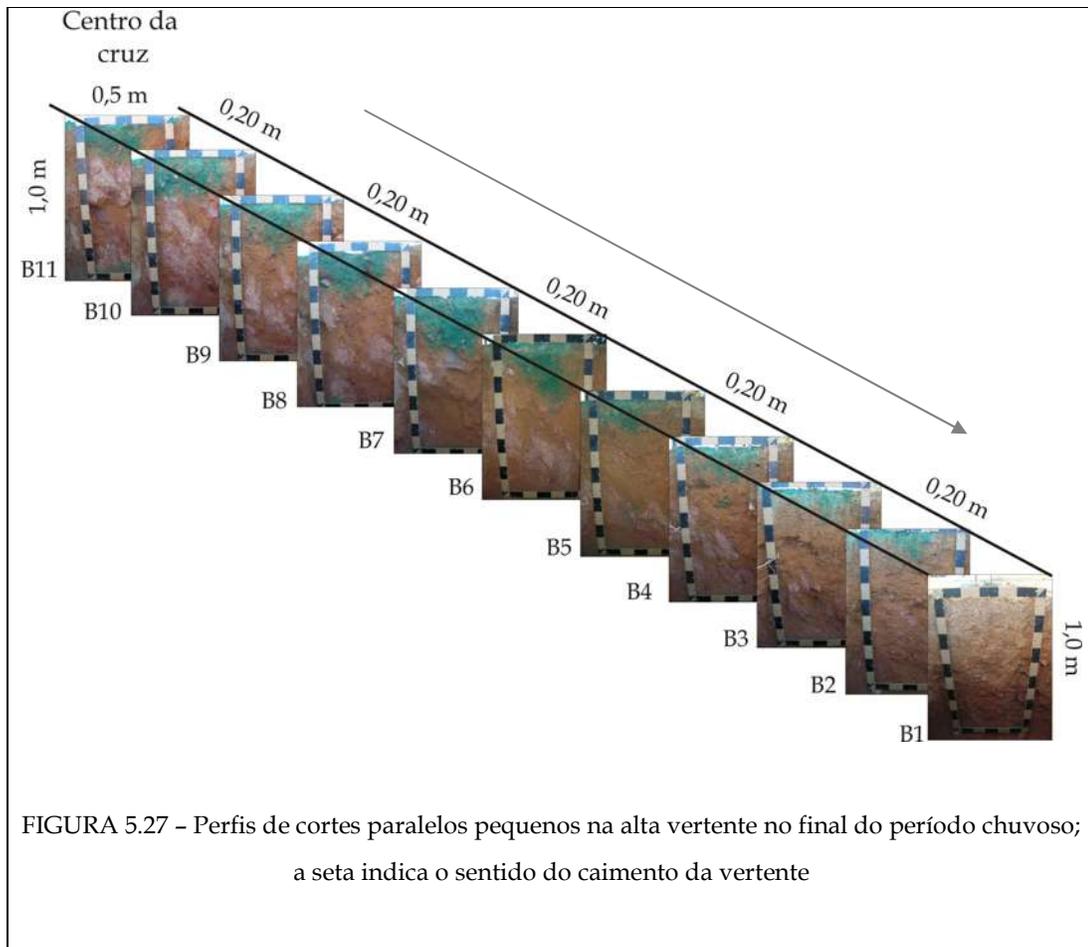


FIGURA 5.27 – Perfis de cortes paralelos pequenos na alta vertente no final do período chuvoso; a seta indica o sentido do caimento da vertente

Nos perfis perpendiculares grandes, correspondentes ao braço paralelo ao caimento da vertente, a pluma comportou-se de modo a se concentrar na direita do perfil (FIG. 5.28). Também é notável no perfil a presença do saprolito, de cor rosada, logo abaixo da pluma.

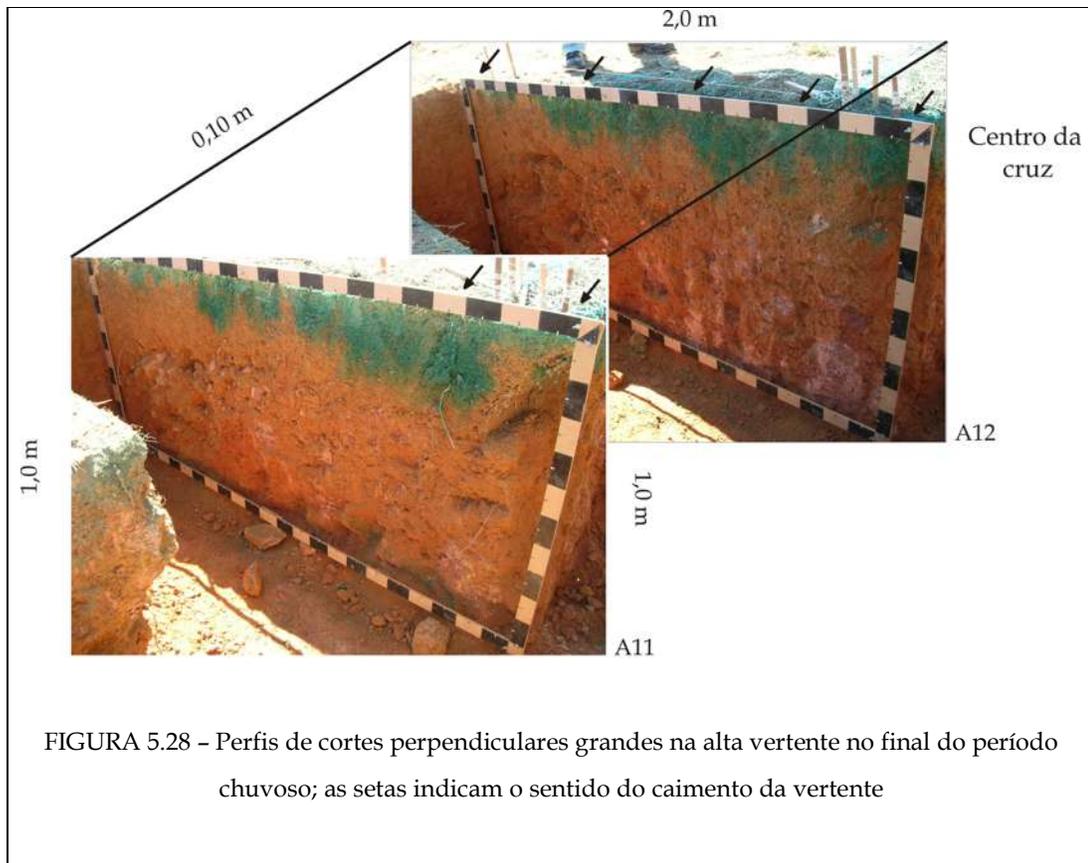


FIGURA 5.28 - Perfis de cortes perpendiculares grandes na alta vertente no final do período chuvoso; as setas indicam o sentido do caimento da vertente

Nos perfis paralelos grandes, correspondentes ao braço perpendicular ao caimento da vertente, destaca-se a concentração da pluma na parte esquerda do perfil, na sua porção mais baixa na vertente (FIG. 5.29).

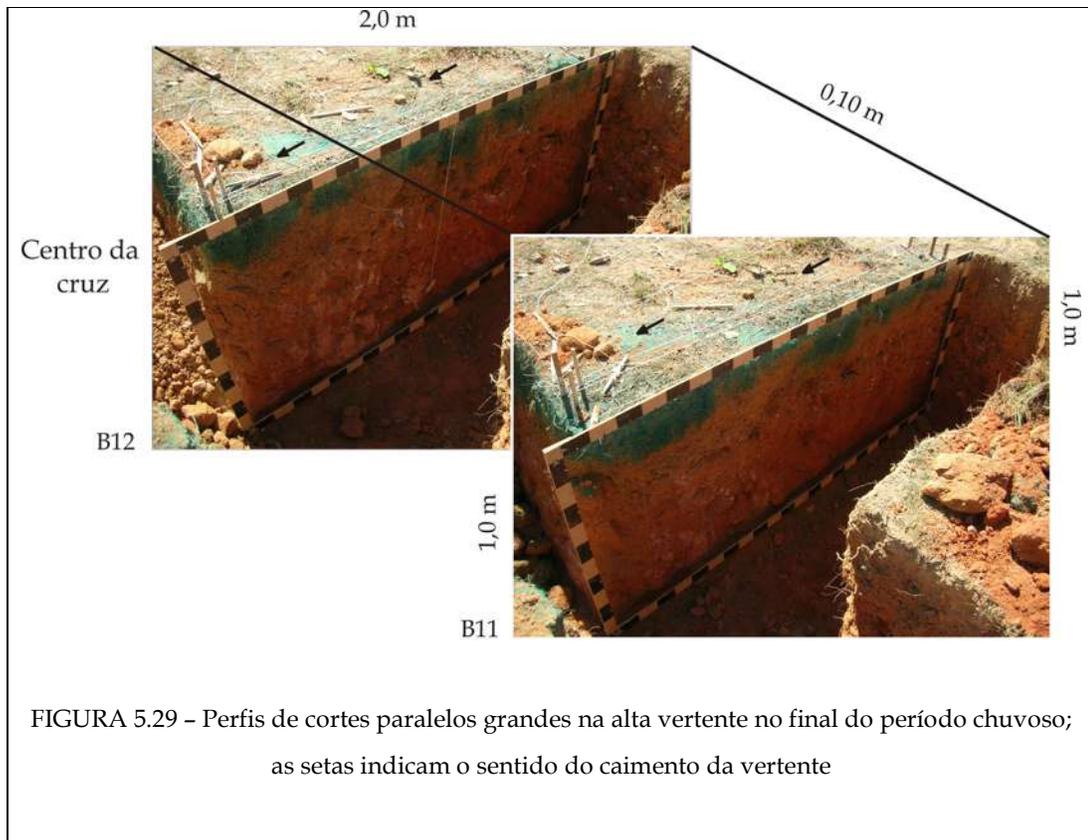
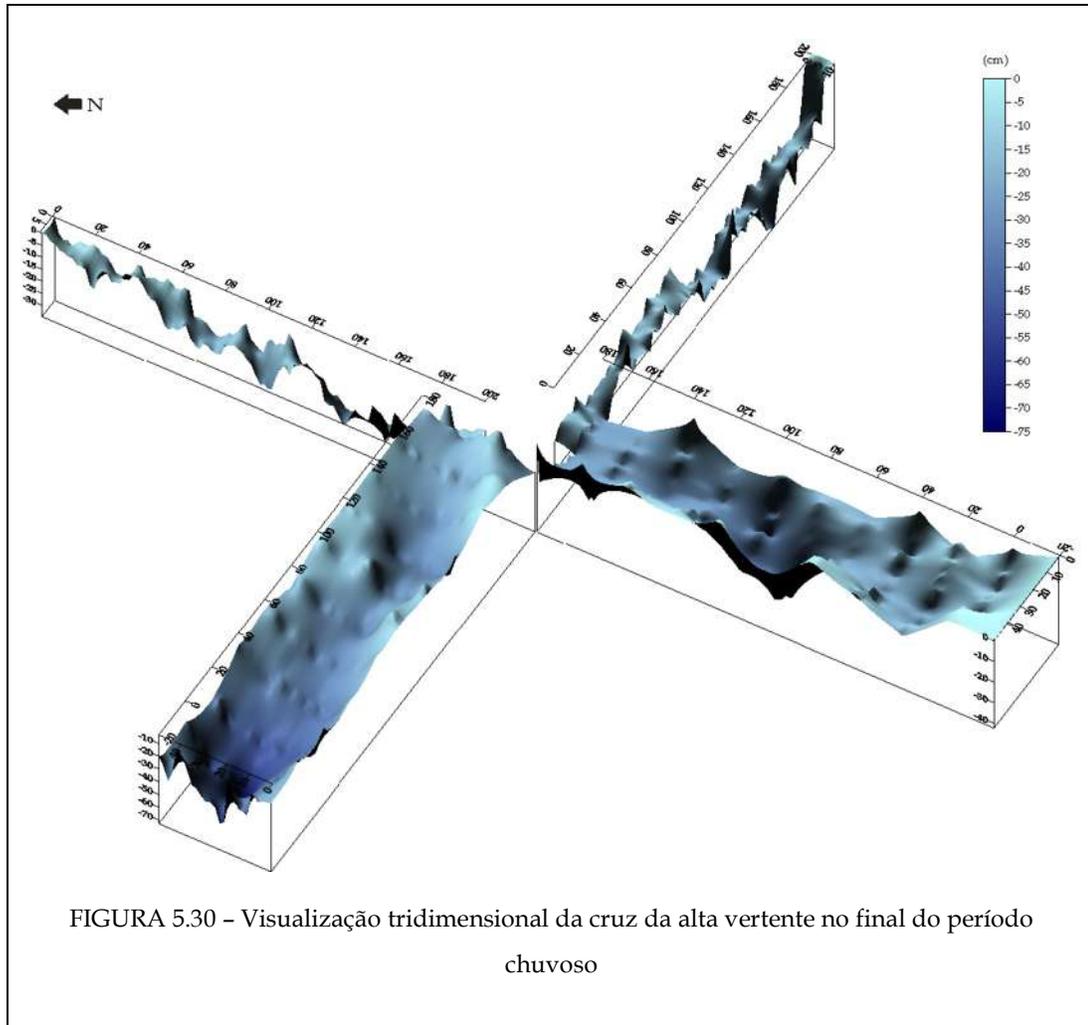


FIGURA 5.29 - Perfis de cortes paralelos grandes na alta vertente no final do período chuvoso; as setas indicam o sentido do caimento da vertente

O modo de visualização tridimensional das plumas dos perfis da alta vertente do final do período chuvoso pode ser visualizado na FIGURA 5.30. Por essa figura é possível observar o fator de acumulação do fluxo com o caimento da vertente, como também uma maior homogeneidade das plumas, o que poderia ser esperado para fim do período chuvoso, quando o solo está com maior saturação de água.



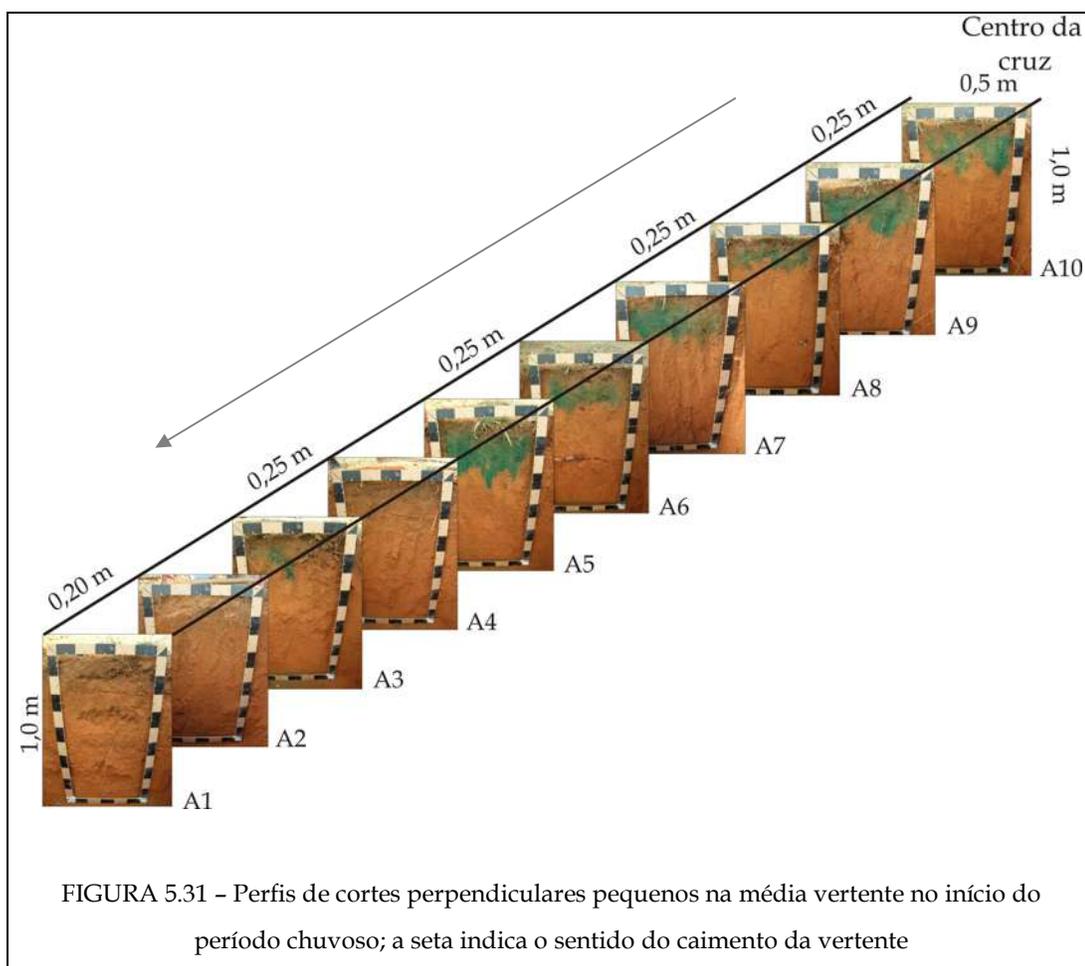
5.5.2 - Parcela da Média Vertente

A injeção da solução traçadora nas estações experimentais da média vertente foi bastante rápida no início do período chuvoso, sem apresentar nenhum empoçamento, e um pouco mais lenta ao final do período, com um baixo grau de empoçamento à superfície. No início do período chuvoso, o tempo de aplicação foi de 45 minutos; ao final do período, de 60 minutos.

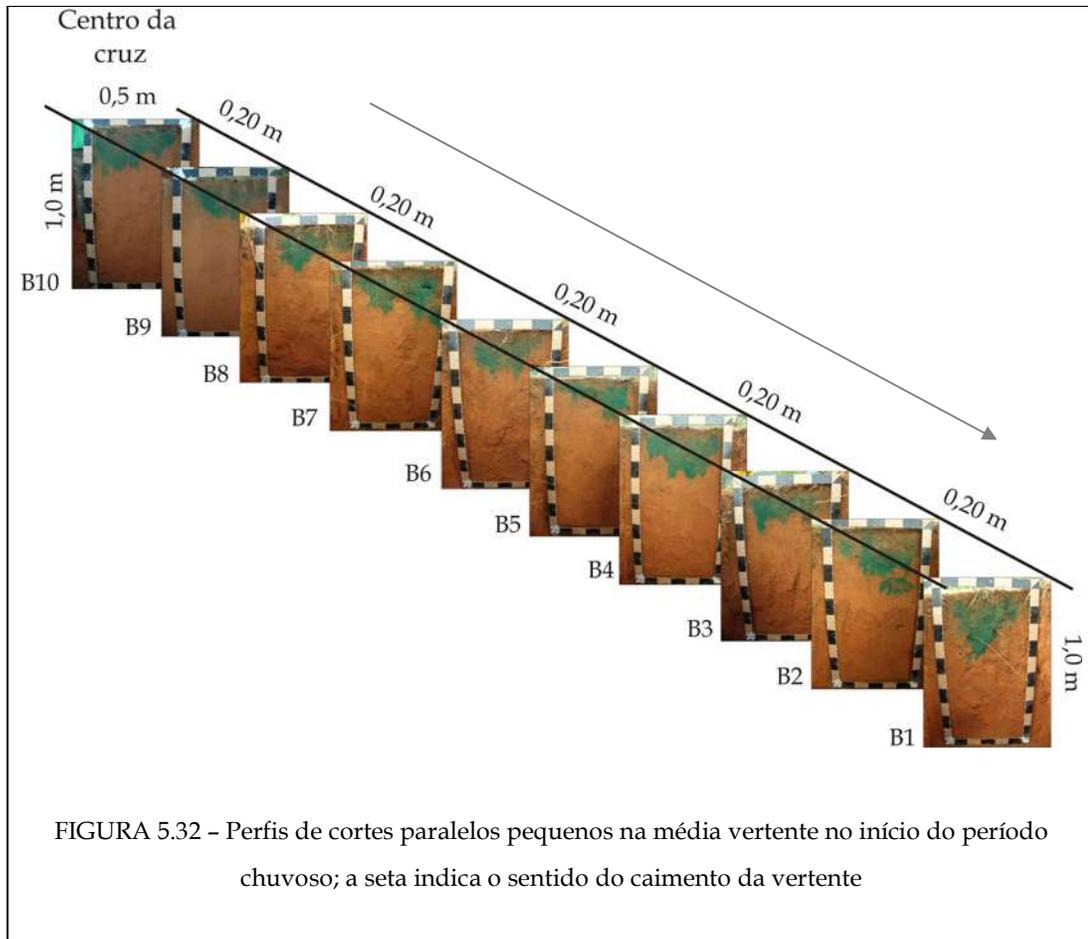
5.5.2.1 - Início do Período Chuvoso

Na abertura das trincheiras no início do período chuvoso, a profundidade máxima alcançada pela solução traçadora foi de 41 cm nos perfis perpendiculares pequenos; 20 cm nos perfis perpendiculares grandes; 40 cm nos perfis paralelos pequenos e 25 cm nos perfis paralelos grandes. A média para o braço perpendicular da cruz foi de 23,2 cm, e, para o braço paralelo, de 25,2 cm.

Nos perfis perpendiculares pequenos, o azul não apareceu nem no primeiro corte do solo, feito a 20 cm da área de injeção do corante, nem no segundo, no limite da área. No terceiro corte, apareceram traços do azul e, no quarto, apenas resquícios. Somente a partir do corte B5 ficou bem marcada a presença da pluma, especialmente em profundidade, sendo notável que nestes perfis o azul pouco aparece próximo à superfície (FIG. 5.31).



Nos perfis paralelos pequenos, a pluma apresenta formatos variados, sem um fluxo preferencial específico. O que se destaca é o fato de que nestes perfis o azul pouco aparece próximo à superfície (FIG. 5.32).



Nos perfis perpendiculares grandes, correspondentes ao braço paralelo ao caimento da vertente, foram identificadas diferenças marcantes. No primeiro corte, A11, a pluma alcançou menores profundidades e concentrou-se à direita do perfil. No corte A12, a pluma foi mais profunda e a concentração à direita foi mais sutil (FIG. 5.33).

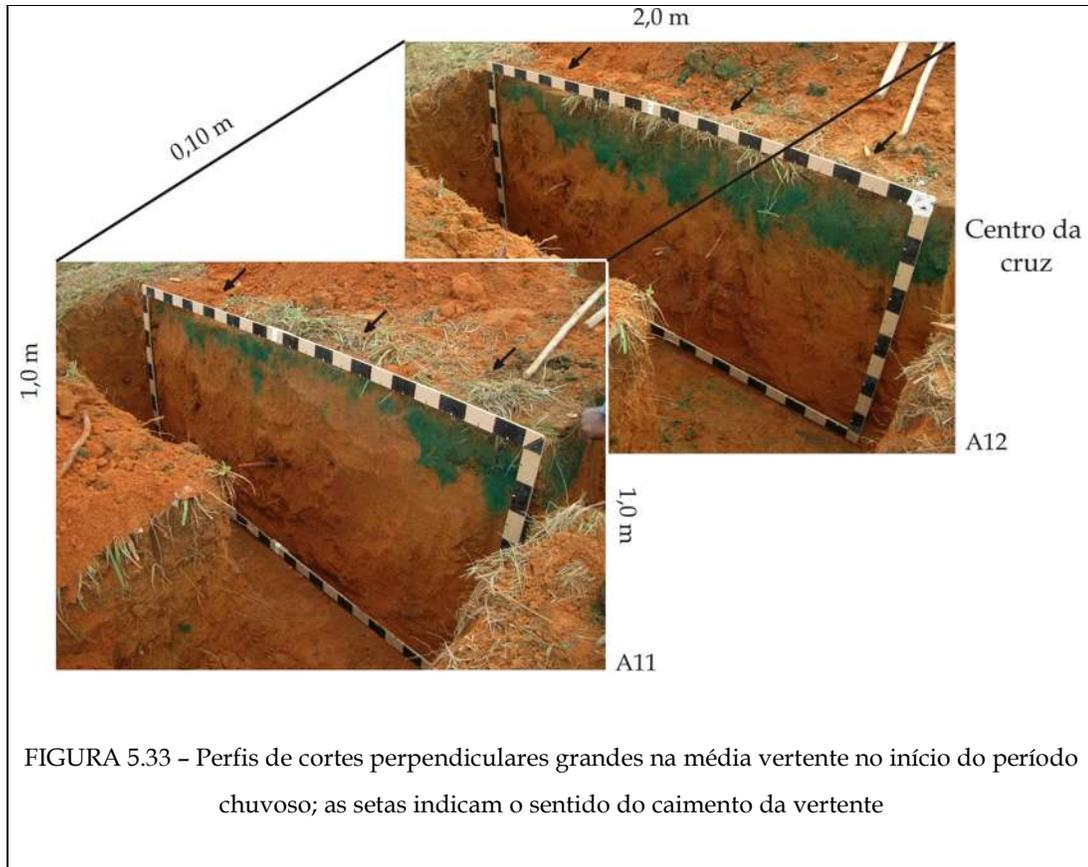


FIGURA 5.33 – Perfis de cortes perpendiculares grandes na média vertente no início do período chuvoso; as setas indicam o sentido do caimento da vertente

Nos perfis paralelos grandes, correspondentes ao braço perpendicular ao caimento da vertente, também foram observadas diferenças marcantes de um para o outro. No primeiro corte, B11, a pluma alcançou menores profundidades e concentrou-se à esquerda do perfil. No corte B12, a pluma distribuiu-se de forma mais homogênea, mas manteve a tendência de se concentrar à esquerda, onde estão as maiores profundidades alcançadas (FIG. 5.34).

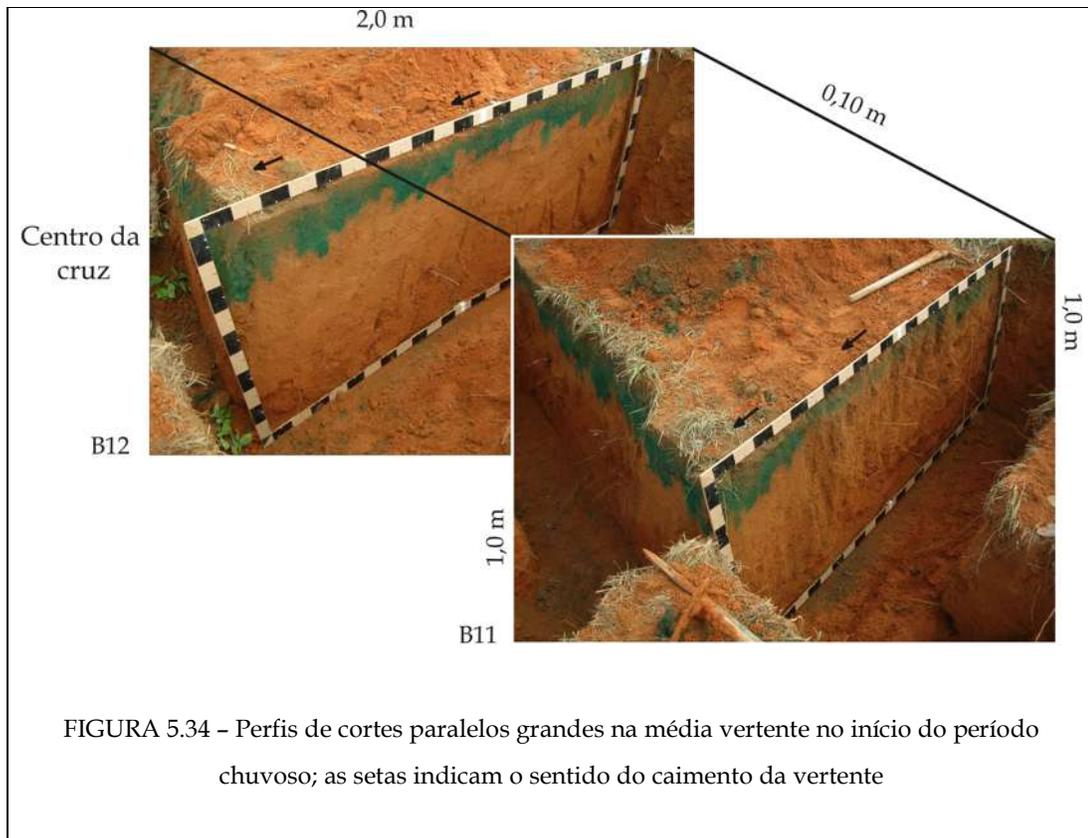
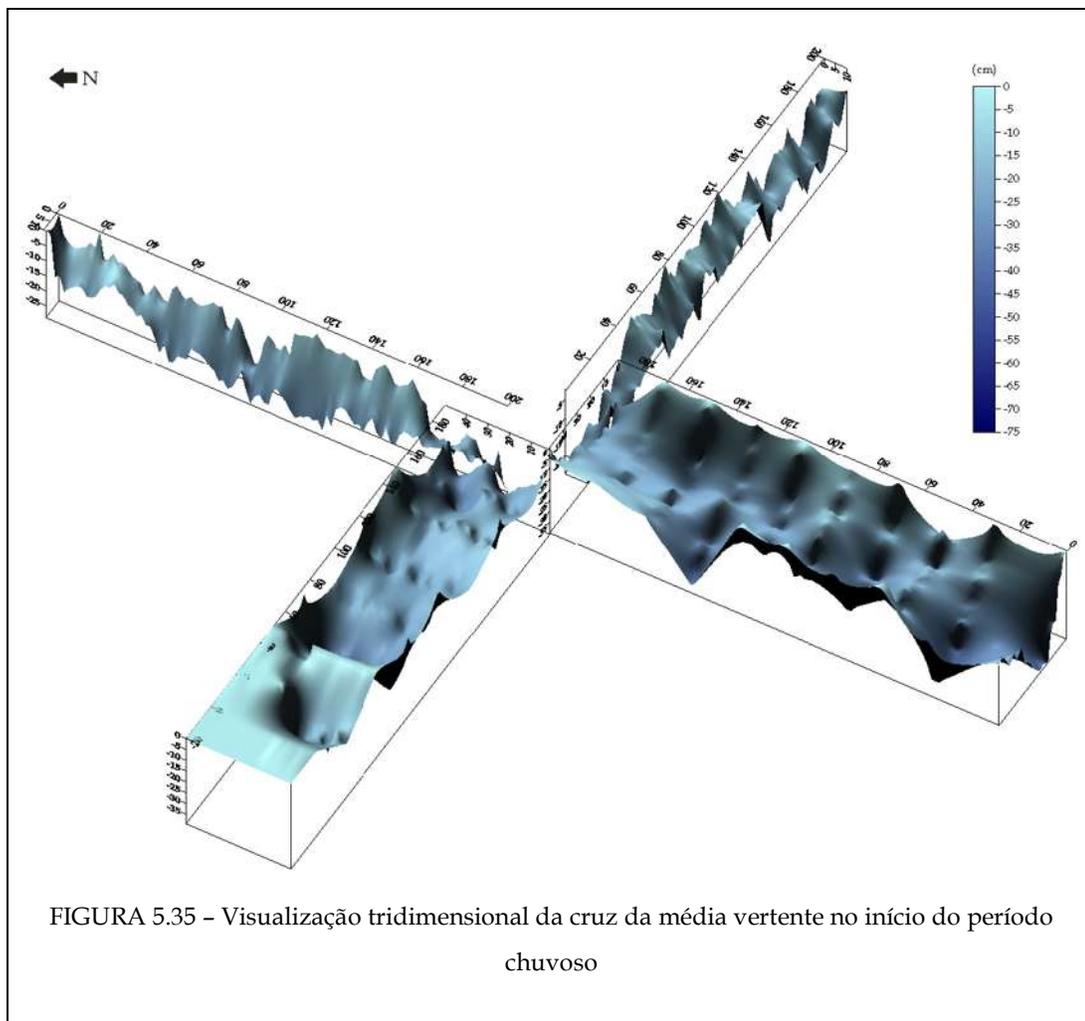


FIGURA 5.34 – Perfis de cortes paralelos grandes na média vertente no início do período chuvoso; as setas indicam o sentido do caimento da vertente

O modo de visualização tridimensional das plumas dos perfis da média vertente do início do período chuvoso pode ser visualizado na FIGURA 5.35. Esta mostra uma pluma relativamente homogênea, e que não apresenta fortes marcas da acumulação do fluxo com o caimento da vertente.

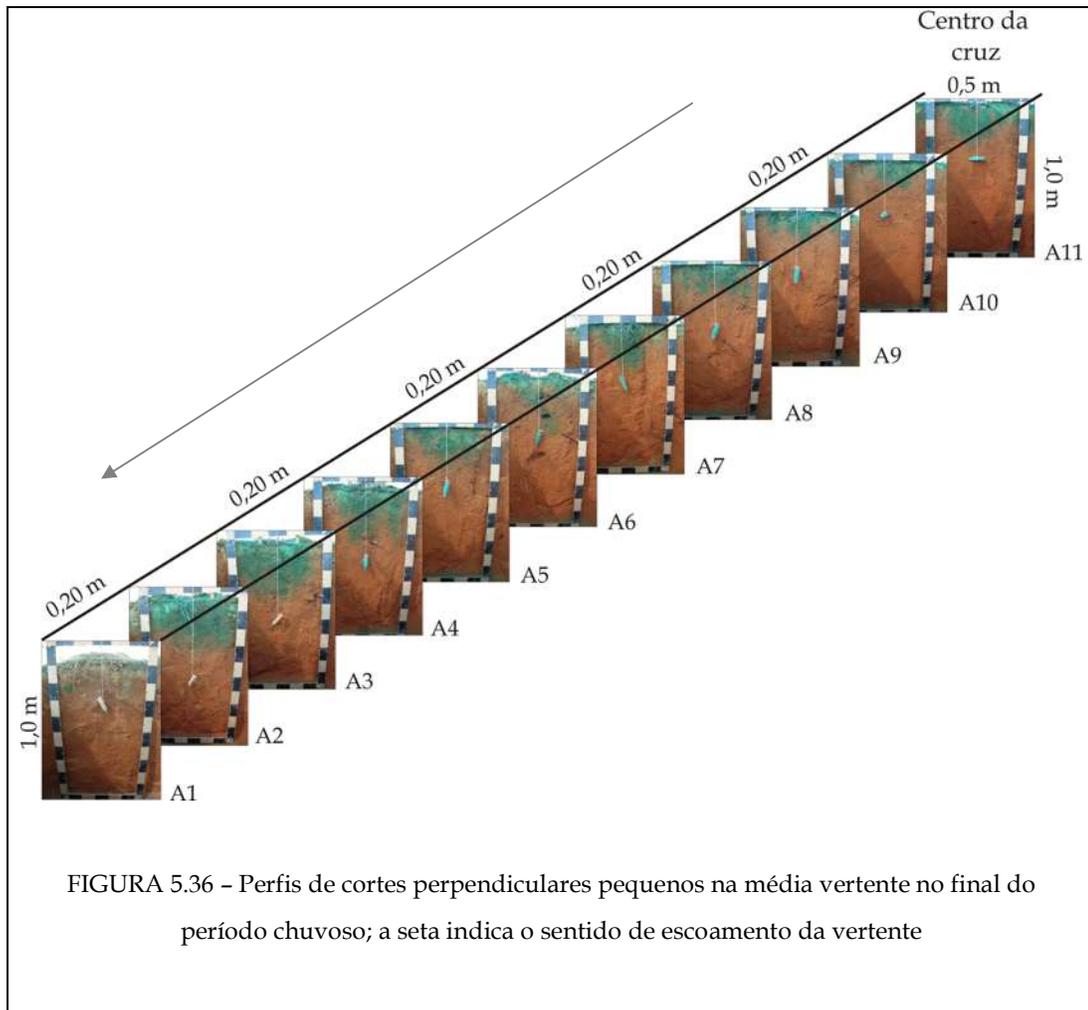


5.5.2.2 - Final do Período Chuvoso

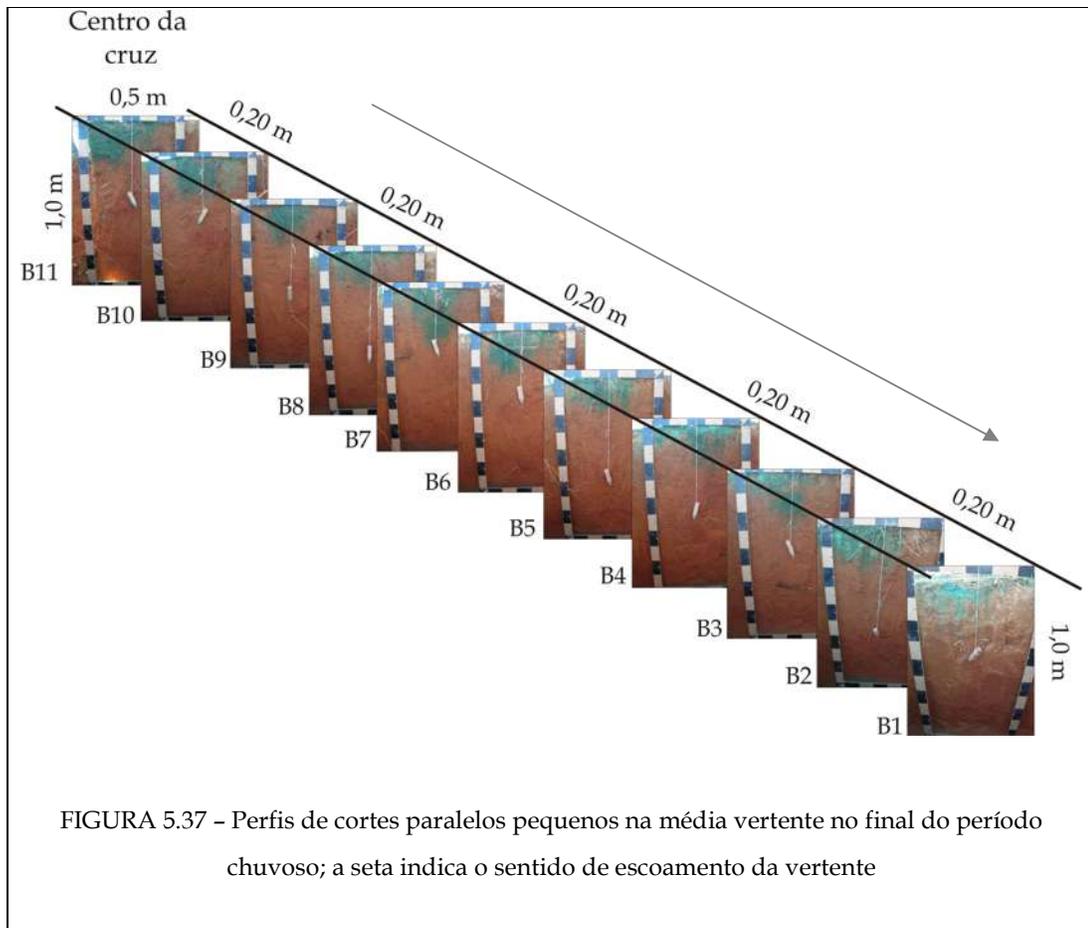
Na abertura das trincheiras no final do período chuvoso, a profundidade máxima alcançada pela solução traçadora foi de 40 cm nos perfis perpendiculares pequenos; 38 cm nos perfis perpendiculares grandes; 38 cm nos perfis paralelos pequenos e 46 cm nos perfis paralelos grandes. A média para o braço perpendicular da cruz foi de 32,2 cm, e para o braço paralelo, de 33,1 cm.

Nos perfis perpendiculares pequenos, apenas alguns traços do azul aparecem no primeiro corte de solo feito a 20 cm da área de injeção do corante. Não há um formato

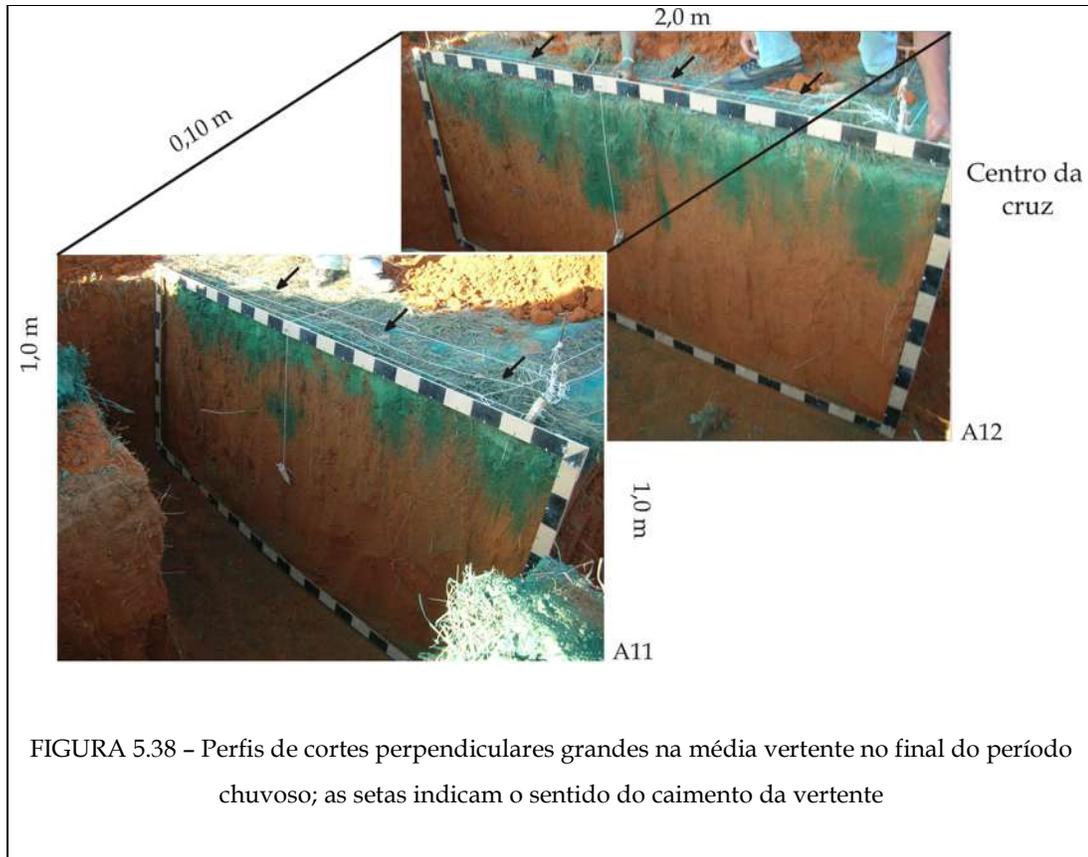
predominante de pluma, mas as maiores profundidades alcançadas estão concentradas nos primeiros cortes (FIG. 5.36).



Nos perfis paralelos pequenos, a pluma aparece no primeiro corte de solo, feito a 20 cm da área de injeção do corante azul. As profundidades alcançadas pela pluma não variam muito, e a tendência de concentração é à esquerda dos perfis (FIG. 5.37).



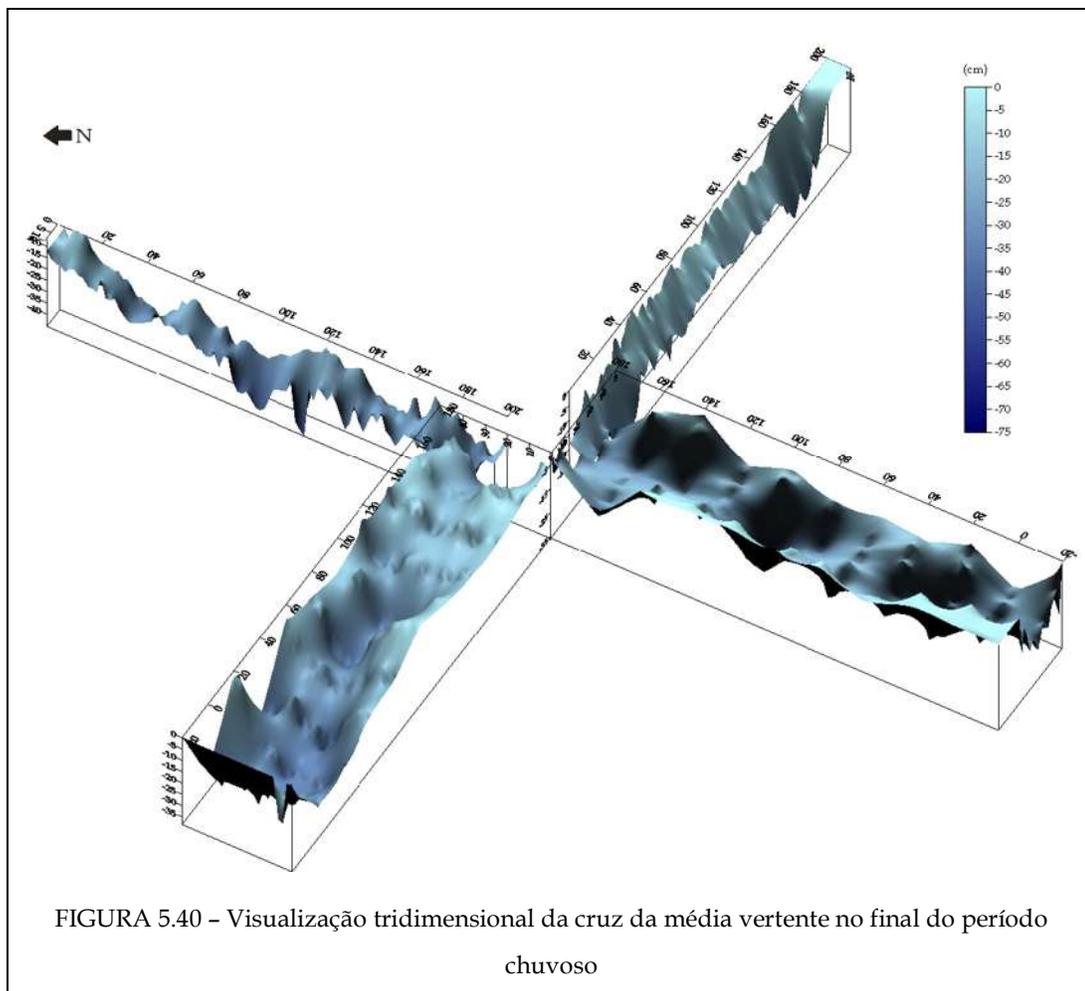
Nos perfis perpendiculares grandes, correspondentes ao braço paralelo ao caimento da vertente, a pluma alcançou grandes profundidades em quase todo o perfil, o que é mais evidente no segundo corte. A porção que atingiu maior profundidade (situada no centro esquerdo do perfil) no segundo corte avançou até o corte da frente (FIG. 5.38).



Os perfis paralelos grandes, correspondentes ao braço perpendicular ao caimento da vertente, apresentaram-se bastante diferentes um do outro. No primeiro corte, B11, a pluma alcançou menores profundidades e concentrou-se à esquerda do perfil. No corte B12, a pluma foi mais profunda, distribuiu-se de forma mais homogênea, mas manteve a tendência de se concentrar à esquerda (FIG. 5.39).



O modo de visualização tridimensional das plumas dos perfis da média vertente do final do período chuvoso pode ser visualizado na FIGURA 5.40. Por essa figura é possível observar que a pluma alcançou maiores profundidades e que o fator acumulação do fluxo com o caimento da vertente ficou mais forte, o que é muito notável no braço inferior.



5.5.3 - Discussão dos Dados do Traçador Colorimétrico

O fato de a injeção da solução traçadora nas estações experimentais da alta vertente ter apresentado significativo grau de empoçamento e escoamento superficial em ambos os períodos analisados, pode ser explicado, em grande parte, pela ocorrência de maior porcentagem de capa argilo-siltosa nesta porção da vertente. O aumento do tempo de aplicação no final do período chuvoso ocorreu pelo aumento da porcentagem de cobertura por essa capa ao final desse período, o que causa um ainda maior selamento da superfície (Portilho, 2003), impedindo que boa parte da água infiltre no solo. O mesmo se repete na média vertente, porém em intensidade bem menor, uma vez que a cobertura por capa argilo-siltosa nesta porção do relevo é significativamente menor

(mais de 2,5 vezes no início do período chuvoso e mais de 16 vezes menor no final do período chuvoso).

Em quase todos os perfis pequenos é perceptível que a pluma azul ultrapassa a área de sua aplicação, que tem largura de 20 cm, sendo isto mais evidente ao final do período chuvoso. Tal ocorrência denota que a pluma teve um significativo espalhamento na componente horizontal, corroborando os dados de eletrorresistividade.

Na alta vertente, no início do período chuvoso, alguns perfis pequenos perpendiculares apresentaram plumas semelhantes, em uma forma abaulada, conforme foi visto anteriormente. Situação semelhante ocorreu nos perfis pequenos paralelos do final do período chuvoso, também na alta vertente. Em ambos os casos, a pluma se comportou dessa maneira por estar concordante com o afloramento de saprolito a poucas dezenas de centímetro da superfície, indicando que no solo da alta vertente ainda existem estruturas pedológicas oriundas da rocha matriz que atuam no controle do fluxo da água, aparentemente desviando-o.

Nos perfis perpendiculares pequenos da média vertente, no início do período chuvoso, o azul pouco apareceu nos primeiros cortes de solo, conforme visto anteriormente na FIGURA 5.29. Uma explicação provável para esta ausência é que, com as chuvas precipitadas entre o dia de aplicação do azul e a abertura das trincheiras, a água colorida que estava logo à superfície tenha sido lavada ou diluída. Também observou-se que nestes cortes o azul pouco apareceu próximo à superfície, o mesmo ocorrendo com os perfis paralelos (FIG. 5.30 e FOTO 5.3). Neste caso, a água precipitada provavelmente desceu no perfil empurrando a pluma azul pra baixo, fazendo com que o azul ficasse mais desbotado próximo à superfície e mais concentrado em profundidade. Uma outra interpretação possível é que esse fenômeno pode ser resultado da passagem da pluma pela zona mais arenosa e permeável nas camadas mais superficiais do solo.



FOTO 5.5 - Perfil da média vertente ao início do período chuvoso, onde se nota o azul bem marcado em profundidade, mas pouco aparente próximo à superfície.

Ao final do período chuvoso a coloração azul apresenta-se bem mais desbotada tanto na alta quanto na média vertente. Isto parece estar ligado ao fato de o solo se encontrar mais úmido neste período, tendo a água *in situ* diluído o corante azul. Contudo, há que se considerar que as condições de luminosidade no momento do registro fotográfico foram diferentes (por causa da época do ano) e que também havia mais sal na solução traçadora, o que pode ter feito com que o azul tenha ficado mais esbranquiçado. Entretanto, com relação a esta segunda possibilidade, o químico responsável pela distribuição do Brilliant Blue FCF informou que não ocorrem reações entre este corante azul e cloreto de sódio.

Outra constatação diz respeito ao formato das plumas. No início do período chuvoso, nota-se que elas são muito melhor definidas que ao final do período; a borda inferior das plumas é bem delimitada, distinguindo-se bastante das porções não coloridas. Nos

perfis do final do período chuvoso, as plumas aparentam estar desfocadas se comparadas às do início (vide exemplos nas FIGS. 5.34 e 5.38).

Os cortes perpendiculares grandes na alta vertente no início do período chuvoso apresentaram-se bastante diferentes um do outro, conforme visto anteriormente. Isto deve ter ocorrido porque o primeiro corte foi feito bem na borda da área onde se aplicou o azul, e o segundo bem no centro dessa área. Assim, esta ocorrência deve indicar que a água pouco percolou horizontalmente no sentido do caimento da vertente, ou seja, a água infiltrada pela linha do segundo corte desceu mais no seu eixo vertical, não avançando muito para baixo na vertente. Como o mesmo não ocorreu nos perfis correlatos da alta vertente no final do período chuvoso, é possível admitir-se que o solo, mais seco ao início do período chuvoso, apresentou grande capacidade de reter muita água na posição em que esta percolava.

Em alguns perfis pequenos, a pluma azul apareceu nos cortes feitos a 20 cm da área de aplicação da solução aquosa, indicando que nestes casos a água percolou não só verticalmente, mas também horizontalmente, na componente do caimento da vertente.

De modo geral, as plumas da alta vertente apresentaram tendência a se concentrar no lado direito dos perfis, o que deve ser uma resposta ao leve caimento da vertente para esse lado, tendo o mesmo sido averiguado nos perfis de GPR e de eletrorresistividade.

Em ambas as posições analisadas da vertente, a pluma azul apresentou-se mais profunda ao final do período chuvoso. Isto indica a maior condutividade hidráulica desse solo, em que o saprolito muito próximo da superfície contribui com alta quantidade de macroporos. Esta ocorrência foi mais marcante ao final das chuvas pois quanto mais úmido o solo, maior a influência dos macroporos (da fração areia) na condutividade hidráulica (Brady & Buckman, 1979; Klar, 1988).

Os padrões de coloração do solo, tanto na alta quanto na média vertente, nos dois períodos analisados, correspondem ao tipo 4 de Weiler (2001), conforme visto no item 2.4.3 desta pesquisa. Segundo o esquema do autor, o tipo de fluxo é heterogêneo e ocorre pela matriz do solo, com formação de dígitos; o solo apresenta-se espacialmente heterogêneo, com repelência de água ou instabilidade de fluxo em textura grossa ou

em variações texturais. Assim, pode-se afirmar que a classificação de Weiler é aplicável aos solos deste estudo, pois o padrão de coloração obtido corresponde às feições do solo, por onde o fluxo variou dependendo do teor de areia e de variações texturais em profundidade, constatadas inclusive em níveis microscópicos.

O fluxo pela matriz do solo, que correspondeu à classificação de Weiler (2001), é corroborado por Kirkby (1978). Este autor coloca que o fluxo pela matriz do solo se movimenta lentamente e ocorre em resposta ao gradiente de potencial hidráulico, que é a soma do potencial gravitacional e do potencial de pressão (ou tensão). Assim, o fato do fluxo no solo da alta vertente ter alcançado maiores profundidades tem respaldo no fato de na alta vertente o potencial de pressão ser maior, devido à menor umidade.

Por fim, cabe lembrar-se da adsorção do Brilliant Blue FCF pelo solo, conforme visto no item 2.3.3 deste trabalho, que é tanto mais intensa quanto maior for o teor de argila. Para porcentagens de areia, silte e argila semelhantes às dos solos estudados, Ketelsen & Meyer-Windel (1999) revelam uma adsorção do azul de baixa a intermediária. Na comparação de solos, como ocorre na presente pesquisa, ressalta-se que além da argila deve-se considerar a presença de matéria orgânica. Assim, o solo da média vertente, que apresenta maiores teores de argila, deveria apresentar maior adsorção do corante azul, mas como ele também apresenta maior concentração de matéria orgânica, a adsorção não deve ser tão alta.

De qualquer maneira, deve-se reconhecer que pode ter havido uma subestimação do alcance da pluma d'água tanto no solo da alta quanto da média vertente, mas não é possível calcular essa possível diferença. Contudo, os diversos autores (Flury & Flühler, 1994; Forrer, 1997; Aeby, 1998; Weiler, 2001; Honauer, 2002; Flury & Wai, 2003; Kulli et al., 2003; Kim et al., 2004; Morais, 2007) que fizeram experimentos com o Brilliant Blue não destacam a sua adsorção como um empecilho à análise da pluma. Morais (2007) obteve valores aproximados de profundidade do azul em solos semelhantes ao dessa pesquisa (resultantes de pedogênese do embasamento cristalino no Quadrilátero Ferrífero).

As conclusões a que se chegou por meio desta pesquisa abarcam tanto os resultados obtidos a partir da análise dos dados, quanto a eficiência dos procedimentos metodológicos utilizados.

Por meio deste trabalho constatou-se que o comportamento da água em subsuperfície no local estudado é condicionado pela combinação dos diversos fatores analisados, tais como a umidade inicial no solo, a natureza do solo, a sua posição na vertente e a capacidade do solo de conduzir a água infiltrada no perfil.

Ao contrário da hipótese inicial desta pesquisa, em que se esperava obter maior infiltração da água no início do período chuvoso, quando o solo está mais seco, por meio das experimentações revelou-se que a água percola mais ao final do período de chuvas, provavelmente em razão da maior condutividade hidráulica do solo quando este está mais úmido (Brady & Buckman, 1979; Klar, 1988).

Em ambos os períodos estudados, a maior infiltração no solo da alta vertente e a menor no solo da média se deram basicamente devido à combinação de: i) valores de pressão dos solos, ii) posicionamento na vertente e iii) características texturais e estruturais dos solos.

Na alta porção da vertente, além da água aplicada ter alcançado maiores profundidades, ela apresentou uma percolação mais rápida e mais heterogênea, o que se explica pela combinação de menor cobertura vegetal, posição mais elevada e convexa na vertente, solo ser mais arenoso, menos desenvolvido e estruturado, e menor tensão da água no solo.

Na média porção da vertente, a combinação de maior cobertura vegetal, posição mais baixa e côncava na vertente, solo mais argiloso, mais desenvolvido e estruturado, e maior tensão da água no solo propiciaram uma percolação mais lenta e mais homogênea.

O método de sondagem elétrica mostrou-se eficiente no acompanhamento da pluma aplicada, e foi bastante sensível à chuva precipitada nos dias das medições. O método do georadar aparentou ser menos sensível aos eventos pluviométricos, e detectou com eficácia a percolação da água aplicada. Ambos os métodos registraram as variações topográficas e as variações nos sentidos de aplicação da água (paralelos ou perpendiculares ao caimento da vertente). A maioria dos perfis de eletrorresistividade apresentou uma tendência de maior condutividade no lado direito do perfil, o que pode ser interpretado como uma resposta ao leve caimento da vertente para esse lado. O mesmo pôde ser percebido nos levantamentos paralelos de GPR, que coincidem com a linha de levantamento de eletrorresistividade, assim como na observação do azul nas trincheiras abertas.

Nenhum dos métodos geofísicos utilizados apresentou correspondência em nível centimétrico com aquela obtida pelo método do traçador azul, nem tampouco a mesma precisão centimétrica, mas o resultado geral de posição das plumas foi semelhante. Por meio desses métodos foi possível acompanhar a movimentação da pluma tanto vertical quanto lateralmente no solo, ao longo do período estudado.

O método de tensiometria é normalmente utilizado extensivamente no tempo e no espaço para medir a tensão normal do solo e suas variações em eventos pluviométricos. Neste estudo, porém, esta técnica foi utilizada para detectar água aplicada artificialmente. Os gráficos gerados a partir da leitura dos tensiômetros apresentaram um comportamento anômalo, não tendo sido possível fazer uma análise de acompanhamento da movimentação da pluma. Contudo, foi possível fazer comparações tanto entre as tensões dos solos da alta e média porção da vertente, quanto entre os períodos analisados.

O método do traçador colorimétrico, aparentemente, respondeu bem às expectativas, especialmente ao revelar a pluma d'água em sua posição final em detalhe (cm e mm; ausência; desbotamento). Como é uma técnica ainda pouco difundida no Brasil, não foi possível estabelecer maiores comparações com outros solos tropicais. Contudo, este estudo é praticamente correlato ao desenvolvido no Complexo Bação por Morais (2007), e os resultados são concordantes em muitos aspectos.

A inovação das estações experimentais em cruz resultou em dados diferenciados de movimento da água para os dois eixos da superfície da vertente, perpendicular e paralelo ao seu plano de caimento. Assim, nos perfis de cortes paralelos pôde-se notar a influência da declividade da vertente no sentido da parte alta para a parte baixa, quando as maiores profundidades alcançadas pela pluma ocorrem na porção mais próxima ao centro da cruz. Nos perfis de cortes perpendiculares pôde-se verificar a influência da declividade no sentido da montante para a jusante, quando as maiores profundidades alcançadas pela pluma ocorrem na porção mais à direita da cruz.

Por meio desta pesquisa, conclui-se, por fim, que a ocorrência de elemento convexo na vertente interferiu significativamente no direcionamento da percolação da água de subsuperfície. Na porção côncava da vertente (média vertente) a água apresentou infiltração menos profunda, enquanto que na porção convexa (alta vertente) a infiltração atingiu profundidades maiores. Os dados também indicaram a ocorrência de uma percolação mais livre da água no cambissolo e maior retenção no latossolo, e que quanto maior a umidade inicial do solo, maior foi o alcance em profundidade da água infiltrada. Também se conclui que a combinação dos métodos de pesquisa utilizados possibilitou a análise espacial e temporal do comportamento da água em subsuperfície no local estudado.

Esta pesquisa não tem como objetivo a apresentação de uma proposta metodológica, mas, apesar disso, ela expõe uma combinação de técnicas que resulta em uma metodologia maior, abrangente de vários aspectos da dinâmica da água em subsuperfície. Esta combinação mostrou-se eficiente em avaliar o comportamento temporal e espacial da água subsuperficial, e acredita-se que sua aplicação aperfeiçoada e em mais larga escala possa levar a resultados ainda mais satisfatórios e esclarecedores sobre as relações água-solo e refeioamento do relevo.

Os dados gerados pelos métodos geofísicos utilizados ainda podem ser retrabalhados de diferentes formas, em especial de modo a obter informações a respeito da velocidade do movimento da água na subsuperfície. Do mesmo modo, os dados resultantes do método do colorímetro Brilliant Blue FCF, ainda pouco difundido no Brasil, podem ser analisados em maior detalhe, como em termos de porcentagem de área tingida e grau de desbotamento da cor por diluição pela água e/ou adsorção pelo solo.

Ao longo da realização da pesquisa, alguns contratempos e dificuldades tiveram que ser enfrentados, tais como: o limite dos recursos financeiros disponíveis; o deslocamento freqüente de Belo Horizonte a Gouveia; as condições climáticas que por vezes interferiam no funcionamento dos equipamentos; o tempo hábil para a pesquisa e a disponibilidade dos voluntários da equipe de campo.

Os contratempos que dizem respeito aos equipamentos envolveram falhas e até mesmo atrasos na aquisição de alguns deles, conforme relatado anteriormente. Testes de condutividade hidráulica dos solos estudados foram realizados no período da pesquisa, mas os equipamentos encontravam-se descalibrados e os dados resultantes tiveram que ser descartados. Testes de umidade do solo se revelaram importantes de ter sido realizados, mas só se percebeu isso tardiamente.

Apesar de não ter sido possível estabelecer uma relação direta entre as parcelas de estudo e a grande feição erosiva que se encontra na vertente – mesmo porque isso não está entre os objetivos desta pesquisa –, são bastante relevantes os motivos da

infiltração e da não-infiltração, que podem levar a especulações sobre a relação da água com a erosão acentuada na região.

O estudo da água em subsuperfície pode levar à descoberta de fluxos preferenciais, que podem simplesmente apontar o caminho da água em direção à drenagem ou ao nível freático, como podem indicar uma erosão por *piping* ou uma associação direta a uma voçoroca, por exemplo. No caso desta pesquisa, a análise do comportamento da água em subsuperfície mostrou que a infiltração é determinada pela umidade inicial no solo, pela natureza do solo, pela sua posição na vertente e pela capacidade do solo de conduzir a água infiltrada no perfil.

Assim, por meio da escala de vertente desta pesquisa foi possível verificar que a ocorrência dos fluxos de água em subsuperfície pode ser determinada pelo conjunto de variáveis que se apresentam como limitantes ou favoráveis à movimentação desse fluxo a qualquer direção ou sentido. Entretanto, sabe-se que a combinação de vários micro-eventos no tempo é responsável pela formação da macro-escala do fenômeno, nem sempre sendo possível determinar situações futuras a partir da micro-escala (Neto, 1994). Contudo, a partir do presente podem ser feitas previsões de probabilidades do que pode vir a ocorrer no futuro.

A hidrografia do solo é importante não apenas em relação às condições locais, mas também como um componente do relevo e da hidrografia como um todo (Kikby, 1978). O sistema água-solo é um dos condicionantes dos processos de erosão, deposição e estabilidade das vertentes, o que reflete diretamente na conformação geomorfológica da paisagem.

Para uma generalização mais imediata, os resultados desta pesquisa podem ser aplicados para a bacia do córrego Grande, uma vez que a associação das variáveis geomorfológicas, pedológicas, vegetacionais, geológicas e pluviométricas dentro de uma mesma vertente é recorrente nessa bacia. Assim, considera-se que os resultados obtidos com este trabalho são relevantes e contribuem para o entendimento da evolução do refeiçoamento do relevo da Depressão de Gouveia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁDAMO, RODRIGO. **Caracterização hidrológica da zona não-saturada do solo na bacia do ribeirão do Chiqueiro, Gouveia, MG, serra do Espinhaço meridional**. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2001.
- AEBY, PHILIPP G. 1998. **Quantitative fluorescence imaging of tracer distributions in soil profiles**. Dissertation (Ph. D. in Natural Sciences) – ETHZ, Zürich, 1998. 74 p.
- ALMEIDA ABREU, PEDRO A. 1989. **A geologia das quadriculas Onça e Cuiabá, Gouveia / MG: região mediana central da Serra do Espinhaço Meridional**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – DEGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1986. 75 p.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2007. **Dados diários de precipitação do município de Gouveia**. Gouveia: ETA (Estação de Tratamento de Água) – COPASA/Gouveia/MG, 2007.
- ANNAN, A. P. 1992. **GPR – Workshop Notes**. Sensors & Software Inc., Hc. October. 72 p.
- ANNAN, A. P. & DAVIS, J. L. 1976. Impulse radar soundings in permafrost. **Radio Science**, v. 11: 383 – 394, 1976.
- AQUINO, W. F. 2000. **Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação de solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais**. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências/USP, São Paulo, 2000.
- ARANHA, PAULO ROBERTO A.; AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R.; LÚCIO, P. S. & NEVES, F. A. P. S. 1998. Estudo das coberturas superficiais na região de Gouveia – MG, com o uso de GPR (ground penetrating radar). In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1998, Belo Horizonte. **Resumos do XL Congresso Brasileiro de Geologia**. Belo Horizonte: 1998. p. 387.
- ARANHA, PAULO ROBERTO A. 2003. **Estudo das coberturas superficiais e sua dinâmica na região de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG: utilizando o Radar de Penetração no Solo (GPR)**. Tese (Doutorado em Geociências) – DEGEO/UFOP, Ouro Preto, MG, 2003. 258 p.
- ARANHA, PAULO ROBERTO A. 2006. Possibilidades e limites da aplicação do geo-radar em arqueologia: Teixeira Lopes e Emílio Brandão, Juiz de Fora – MG. In: OLIVEIRA, ANA PAULA DE P. L. DE. (Org). 2006. **Arqueologia e Patrimônio da Zona da Mata Mineira: Juiz de Fora**. Juiz de Fora: Editar, 2006. p. 181 – 192, 2006.
- AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R. 1979. **A preliminary interacted survey of the natural resources near Alcantarilla, Southeast Spain**. 209 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – University of Sheffield, Sheffield, 1979.
- AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R. 1995. **Geoökologische Studien im südlichen Espinhaçogebirge bei Gouveia, Minas Gerais, Brasilien unter besonder Berücksichtigung der Landschaftsentwicklung**. 147 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt a Main, Alemanha, 1995.
- AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R.; FIGUEIREDO, MÚCIO DO A. & FABRIS, JOSÉ D. 1998. Presença do ferro, sua influência na agregação do solo e na susceptibilidade ao “pipping”. In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1998, Belo Horizonte. **Resumos do XL Congresso Brasileiro de Geologia**. Belo Horizonte: 1998.

- AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R. 1999. The relationship between gully erosion and land use in Gouveia, Minas Gerais, Brasil. In: REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY - THE BRAZILIAN GEOMORPHOLOGICAL UNION, 1999, Rio de Janeiro. **Abstracts of the Regional Conference on Geomorphology - The Brazilian Geomorphological Union**. Rio de Janeiro: 1999. p. 88.
- AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R. & ARANHA, PAULO ROBERTO A. 2006. A ocorrência de voçorocas em Gouveia, MG: características e processos associados. **Geonomos Revista de Geociências**, v. XIV, n. 2, p. 75 - 86, dez. 2006.
- AYOADE, J. O. 1991. **Introdução a Climatologia para os trópicos**. 3. ed. Rio de Janeiro: 1991. 332 p.
- BACCARO, CLAUDETE APARECIDA DALLEVEDOVE. 1999. Processos erosivos no domínio cerrado. In: GUERRA, ANTÔNIO JOSÉ T.; SILVA, ANTÔNIO S. S. & BOTELHO, ROSÂNGELA G. M. B. 1999. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1999. 339 p. cap. 6. p. 195 - 227.
- BACELLAR, LUÍS DE ALMEIDA PRADO. 2000. **Condicionantes Geológicos, Geomorfológicos e Geotécnicos dos Mecanismos de Voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG**. 226 f. Tese (Doutorado em Geologia) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- BAILEY, L. H. 1943. **The nature and properties of soils**. 4th ed. New York: The MacMillan Company, 1943. 499 p.
- BAIRD, A. J. 1997. Field estimation of macropore functioning and surface hydraulic conductivity in a fen peat. **Hydrological Processes**, v. II, 11: 287 - 295, 1997.
- BARBOSA, VALÉRIA CRISTINA. C. 2002. **Análise da erosão laminar em vertente no município de Gouveia, MG, baseado na variação da micro-forma da vertente e da cobertura vegetal**. 86 f. Monografia (Graduação em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.
- BARBOSA, VALÉRIA CRISTINA. C. 2004. **Análise da erosão laminar e em ravina sob diferentes coberturas de solos e micro-topografia, na bacia do córrego Quebra, Gouveia, MG: um ensaio sobre o método de medida da micro-topografia aplicada ao estudo do processo erosivo**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.
- BARBOSA, VALÉRIA CRISTINA. C. & AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R. 2001. Estudo preliminar da variação das micro-formas e da cobertura vegetal na geração do Runoff e perda de solo em vertente do município de Gouveia. **Revista de Geociência Geonomos**, v. 8, nº 2, p. 1 - 7, 2000.
- BARKER, R. D. & MOORE, J. 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. **The Leading Edge**, p. 1454 - 1458, 1998.
- BARROS, W. D. 1961. **Plantas na conservação dos solos**. Rio de Janeiro, SIA. n. 4, 1961.
- BERNDTSSON, R. & LARSON, M. 1987. Spatial variability of infiltration in a semi-arid environment. **Journal of Hydrology**, 90: 117 - 133, 1987.
- BERTONI, JOSÉ; LOMBARDI NETO, FRANCISCO. 1999. **Conservação do solo**. 4 ed. São Paulo: Icone, 1999. 355 p.

- BEVEN, KEITH & GERMAN, PETER. 1982. Macropores and water flow in soils. **Water Resources Research**, v. 18, n. 5, p. 1311 - 1325, oct. 1982.
- BEZERRA, JOSÉ FERNANDES R. & RODRIGUES, SÍLVIO CARLOS. 2006. Estudo do potencial matricial e geotêxteis aplicado a recuperação de um solo degradado, Uberlândia (MG). **Caminhos de Geografia - Revista On-line**, v. 6, n. 19, p. 160 - 174, out. 2006.
- BORTOLOZZO, ADRIANE REGINA & SANS, LUIZ MARCELO MAECELO A. 2001. Selamento superficial e seus efeitos na taxa de infiltração: uma revisão. **Revista FactuCiência**, 1: 37 - 45, 2001.
- BOTELHO, M. A. B.; XAVIER, J. & ARANHA, PAULO ROBERTO A. 1997. Estudo sobre a economicidade de jazidas de rochas ornamentais empregando o geo-radar (GPR). In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 6º, 1997, SÃO PAULO. **Anais do 6º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**. São Paulo: 1997.
- BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F. X. & LUCAS, Y. 1982. **Analyse structurale et cartographie en pédologie: I - Les études de toposéquences et principaux apports à la connaissance des sols**. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 19 (4), p. 309 - 351. 1982.
- BRADY, NYLE C. & BUCKMAN, HARRY O. 1979. **Natureza e propriedades dos solos**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1979. 647 p. Cap. 7: Água do solo: características e comportamento.
- BRANDÃO, VIVIANE DOS S.; CECÍLIO, ROBERTO A.; PRUSKY, FERNANDO F. & SILVA, DEMETRIUS DAVID DA. 2002. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: Editora UFV, 2002.
- BRIGGS, DAVID JOHN. 1977. **Soils: Sources and methods in Geography**. London: Butterworths, 1977. 192 p.
- BUENO, G. T. 1997. **Estudo do comportamento da água no solo na região de Gouveia**. Monografia (Graduação em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 1997.
- CARVALHO, VILMA LÚCIA MACAGNAN. 1991. **Variação da cobertura vegetal e seus reflexos na erosão superficial**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, Rio Claro, SP, 1991.
- CASSEL, D. K. & KLUTE, A. 1986. Water potencial: tensiometry. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical, chemical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986.
- CASTRO, SELMA SIMÕES DE. 2002. **Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas**. Goiânia & Campinas: UFG/Unicamp/FUNAPE, 2002. 143 p.
- CETEC. 1983. **Estudos integrados de recursos naturais: bacia do alto São Francisco e parte central da área mineira da SUDENE**. Vegetação e Uso da Terra, relatório final; Geomorfologia, relatório final; Área para preservação ambiental; relatório final e relatório síntese dos estudos. Belo Horizonte: 1983.
- CHOWDHURY, R. N. 1978. **Slope Analysis**. Amsterdam: Elsevier, 1978. 423 p.
- COLLINS, M. E.; PUCKETT, W. E.; SCHELLENTRAGER, G. W. & YUST, N. A. 1990. Using GPR for microanalyses of soils and karst features on the chiefland limestone plain in Florida. **Geoderma**, v. 47, p. 159 - 170, 1990.

- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS. 1996. **Projeto Espinhaço, Mapa Geológico, Folha de Diamantina (SE-23-Z-A-III)**. Eescala 1:100.000. Belo Horizonte: COMIG, 1997.
- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS. 1996. **Projeto Espinhaço, Mapa Geológico, Folha de Presidente Kubitschek (SE-23-Z-A-VI)**. Eescala 1:100.000. Belo Horizonte: COMIG, 1997.
- COSTA, JOAQUIM BOTELHO DA. 1975. **Caracterização e constituição do solo**. Lisboa: Sociedade Tipográfica, 1975. 527 p.
- CRUZ, LUIZ OTÁVIO M. 2003. **Comportamento desnudacional e evolução de curto-termo em voçorocas na microbacia do Córrego do Quebra em Gouveia - Espinhaço Meridional/MG**. 63 f. Monografia (Licenciatura em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2003.
- CRUZ, LUIZ OTÁVIO M. 2006. **Assinatura geoquímica de unidades coluviais da Bacia do Córrego do Rio Grande - Depressão Gouveia/MG**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2006.
- CUSTÓDIO, MANUEL RAMON & LLAMAS, EMILIO. 1976. **Hidrologia subterranea**. Barcelona: Ediciones Omega, 1976.
- DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J. & CONACHER, A. J. 1968. A hypothetical nine unit land surface model. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 12:1, p. 60 - 76, 1968.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v. 37, p. 531 - 551, 1989.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. 1992. Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater and geotechnical projects: selected case histories. In: **Ground Penetration Radar**, 90-4, p. 49 - 55, 1992.
- DAVIS, S. N.; THOMPSON, G. M; BENTLEY, H. W. & STILES, G. 1980. Groundwater tracers - a short review. *Groundwater*, 18: 14 - 22, 1980.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 1992. **Normais Climatológicas - série 1961/1990**. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Brasília, 1992.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL & COMPANHIA DE RECURSOS MINERAIS. 1979. **Fotografias aéreas do Vão Cruzeiro do Sul de 26 de julho de 1979, faixa 12, escala 1: 30.000**. DNPM/CPRM, 1979.
- DIAS, JANISE B. 2001. **Correlações entre a nidificação de térmitas e formigas nas vertentes em Gouveia, Minas Gerais, e a alteração dos teores de nutrientes nos solos**. 211 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2001.
- DINIZ, ALISSON D. 2002. **Levantamento pedológico da porção norte da bacia do ribeirão do Chiqueiro - Gouveia, MG, e a relação entre as classes de solos e a erosão**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.
- DOOLITTLE, J. A. 1987. Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys. REYBOLD, W. U. & PETERSEN, G. W. (Eds.). **Soil Survey Techniques**, Soil Science Society of America, Special Publication, n. 20, 1987.

DOOLITTLE, J. A. & COLLINS, M. E. 1995. Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 101 – 108, 1995.

DRUMOND, M. M. 2004. **A técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à bacia representativa de Juatuba - MG**. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1997. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CNPS. 212 p.

FERNANDES, NELSON F. 1990. **Hidrologia subsuperficial e propriedades físico-mecânicas dos complexos de rampa- Bananal (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1990.

FERNANDES, NELSON F.; COELHO NETTO, ANA LUIZA & DEUS, CARLOS E. DE. 1989. Monitoramento dos fluxos d'água no solo: instrumentação alternativa. In: 3º SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 3º, 1989, NOVA FRIBURGO. **Anais do 3º Simpósio de Geografia Física Aplicada**. Nova Friburgo: 1989. p. 71 – 87.

FERREIRA, A. DE O. 2002. **Mapeamento das formações superficiais da bacia do córrego do Rio Grande - Depressão de Gouveia (Serra do Espinhaço Meridional/MG)**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.

FIGUEIREDO, MÚCIO DO AMARAL. 1999. **Óxidos de ferro pedogênicos e sua influência na agregação de partículas de argila: estudo de casos nos solos da região de Gouveia - Serra do Espinhaço Meridional - MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 1999.

FLURY, MARKUS & FLÜHLER, HANNES. 1994. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies – a toxicological overview. **Journal of Environmental Quality**, 23: 1108 – 1112, 1994.

FLURY, MARKUS; FLÜHLER, HANNES; JURY, W. A. & LEUNENBERGER, J. 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. **Water Resource Research**, 30(7): 1945 – 1954, 1994.

FLURY, MARKUS & WAI, NU NU. 2003. Dyes as tracers for vadose zone hydrology. **Reviews of Geophysics**, 41(1): 1 – 37, 2003.

FORRER, IRENE E. 1997. **Solute transport in an unsaturated field soil: visualization and quantification of flow patterns using image analysis**. Dissertation (Ph. D. in Technical Sciences) – ETHZ, Zürich, 1997. 128 p.

FUTAI, MARCOS M. 2002. **Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não-saturados: aplicação a um caso de voçorocamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

GANDOLFO, OTÁVIO COARACY BRASIL. **Aplicação da sísmica de reflexão de alta resolução e do radar de penetração no solo (GPR): um estudo comparativo**. 140 f. 1999. Dissertação (Mestrado em Geociências) – IGCE/UNESP, Rio Claro, SP, 1999.

- GAVANDE, SAMPAT A. 1972. **Física de suelos: principios y aplicaciones**. Mexico: Limusa, 1972. 351p.
- GERRARD, JOHN. 1992. **Soil geomorphology: an integration of pedology and geomorphology**. London: Chapman & Hall, 1992. 269 p.
- GOUVEIA, LEONARDO LÚCIO DE A. 2002. **Aspectos da circulação atmosférica no município de Gouveia – Minas Gerais e suas relações com a topografia local**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.
- GREENHOUSE, J. P. 1991. Environmental geophysics: it's about time. **Geophysics: The Leading Edge of Exploration**, v. 10, n. 1, p. 32 – 34, 1991.
- GRUBER, STEPHAN & LUDWIG, FLORIAN. 1996. Application of Ground Penetrating Radar in Glaciology and Permafrost Prospecting. **Arctic Studies Programme at the Arctic Centre**, Finland, 1996.
- HAGREY, S. A. & MICHAELSON, J. 1999. Resistivity and percolation study of preferential flow vadose zone at Bokhorst, Germany. **Geophysics**, 64(3), p. 764 – 753, 1999.
- HARARI, Z. 1996. Ground Penetration Radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. **Journal of Applied Geophysics**, 36: 43 – 52, 1996.
- HAYASHI, MASAKI; KAMP, GARTH VAN DER & RUDOLPH, DAVID L. 1997. Use of tensiometer response time to determine the hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science**, v. 162, n. 8, p. 567 – 575, 1997.
- HARTMANN, R. 1989. **Soil water potencial (part I); Tensiometer (part II)**. Ghent: College on Soil Physics, 1989.
- HILLEL, DANIEL. 1982. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic Press, 1982. 364 p.
- HONAUER, BEATRICE K. 2002. **Analysis of flow patterns: the influence of soil compactation and soil structure on the infiltration pathways of dye tracer solutions and the quantitative evaluation of flow patterns**. Dissertation (Ph. D. in Natural Sciences) – ETHZ, Zürich, 2002. 109 p.
- HORTON, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainages basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, n.1, p. 275 – 370, 1945.
- HUBBEL, J. M. & SISSON, J. B. 1996. Portable tensiometer use in deep boreholes. **Soil Science**. v. 161, n. 6, p. 376 – 381, jun. 1996.
- HUBBEL, J. M. & SISSON, J. B. 1998. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurement. **Soil Science**, v. 163, n. 4, p. 271 – 277, apr. 1998.
- HUDSON, N. 1971. **Soil conservation**. 2nd Edition. Ithaca: Cornell University Press. 324 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 1986. **Carta Topográfica de Diamantina, SE-Z-A-III, Escala 1: 100000**. IBGE, 1986.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 1986. **Carta Topográfica de Presidente Kubitscheck, SE-Z-A-IV, Escala 1: 100000**. IBGE, 1986.

- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. 2006/2007. **Dados da Estação Convencional de Diamantina/MG**. Belo Horizonte: 5º DISME/SEOMA, 2006/2007.
- JORGE, JOSÉ ANTÔNIO. 1986. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 328 p.
- KALPAGÉ, F. S. C. P. 1974. **Tropical soils**. Basingstoke: Mac Millan, 1974. 283 p.
- KASTEEL, R.; VOGEL, H. J. & ROTH, K. 2002. Effect of non-linear adsorption on the transport behavior of brilliant blue in a field soil. **European Journal of Soil Science**, 53: 231 - 240, 2002.
- KETELSEN, HARK & MEYER-WINDEL, SIGRID. 1999. Adsorption of brilliant blue FCF by soils. **Geoderma**, 90: 131 - 145, 1999.
- KIM, JAE GON; CHON, CHUL-MIN & LEE, JIN-SOO. 2004. Effect of structure and texture on infiltration flow pattern during flood irrigation. **Environmental Geology**, 46: 962 - 969, 2004.
- KIRKBY, M. J. (Ed). 1978. **Hillslope Hydrology**. Great Britain: Wiley-Interscience, 1978. 389 p.
- KIRKBY, M. J. 1994. **Process models and theoretical geomorphology**. Chichester; New York: John Wiley & Sons, 1994. 417 p.
- KLAR, ANTÔNIO EVALDO. 1988. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2 ed. rev. São Paulo: 1988. 408 p.
- KOEFOD, OTTO. 1979. **Geosounding principles, 1: Resistivity Sounding Measurements**. Amsterdã: Elsevier, 1979.
- KUBIËNA, W. L. 1986. Principle and goal of fabric analysis. In: STOOPS, GEORGES & ESWARAN, HARI (Eds). **Soil Micromorphology**. New York: Van Norstrand Reinhold Company, 1986. 345 p.
- KULLI, BEATRICE; GYSI, MICHAEL & FLÜHLER, HANNES. 2003. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. **Soil & Tillage Research**, 70: 29 - 40, 2003.
- LEMONS, RAIMUNDO C. & SANTOS, RAPHAEL DAVID. 2002. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 4ª ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, Comissão de Método de Trabalho de Campo - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 2002. 83 p.
- LEPSCH, IGO F. 2002. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.
- MARCHIORO, EBERVAL. 2002. **Perda de solo por escoamento superficial difuso em vertente do córrego Quebra, no município de Gouveia - MG [manuscrito]**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.
- MATTEUCCI, SÍLVIA D. & COLMA, AIDA. 1982. **Metodologia para el estudio de la vegetacion**. Washington: 1982. 168 p.
- MONIZ, ANTÔNIO C. & MEDINA, H. P. (Coords). 1972. **Elementos de pedologia**. São Paulo: 1972. 459 p.
- MORAIS, FERNANDO DE. 2007. **Estudo dos fatores pedogeomorfológicos intervenientes na infiltração em zonas de recarga no Complexo Metamórfico Bação, Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Geociências) - DEGEO/UFOP, Ouro Preto, MG, 2007. 132 p.

- MORAIS, FERNANDO DE; BACELLAR, LUÍS DE A. P. & ARANHA, PAULO ROBERTO A. 2007. Study of flow in vadose zone from electrical resistivity surveys. Aceito na **Revista Brasileira de Geofísica** em 2007. In press.
- MOREIRA, CESAR AUGUSTO; DOURADO, JOÃO CARLOS. 2003. Análise temporal de pluma de contaminação por meio do GPR. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8TH, 2003, RIO DE JANEIRO. **8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. Rio de Janeiro: 2003. p. 14 - 18.
- MOREIRA, P. F. 1987. **Estudo da capacidade de infiltração dos solos na região do Alto Paraúna, Município de Gouveia, Espinhaço Meridional - MG**. Monografia (Graduação em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 1987.
- MORGAN, ROYSTON PHI C. 1979. **Soil erosion: topics in applied Geography**. New York: Ed. Longman Group, 1979. 113 p.
- NERY, A. C. F.; ARANHA, PAULO ROBERTO. A. 1995. Uma nova metodologia em prospecção geolétrica: metodologia Cacau. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 4TH, 1995, RIO DE JANEIRO. **Anais of the 4th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. Rio de Janeiro: 1995. v. II, p. 996.
- NETO, MÁRIO DINIZ DE. 1994. Métodos de medição da água no solo: uma breve discussão. **Geonomos Revista de Geociências**, 2 (2): 51 - 56, dez. 1994.
- NEVES, ANA PAULA V. B.; LUIZ, JOSÉ G. 2003. Estudo do fluxo subterrâneo por imageamento elétrico. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8TH, 2003, Rio de Janeiro. **Anais of the 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. Rio de Janeiro: 2003. 4 p.
- NEVES, F. A. P. S.; ARANHA, PAULO ROBERTO. A. & LÚCIO, P. S. 1997. Estudos de voçorocas usando GPR. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 5^o, 1997, PENEDO/RJ. **Resumos do 5^o Simpósio Regional de Geologia do Sudeste**. Penedo/RJ: 1997. p. 35.
- OLIVEIRA, C. V.; DINIZ, ALISSON D. & AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R. 2003. Classes de solo e erosão na região de Gouveia - MG, Espinhaço Meridional. **XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Ribeirão Preto, 2003.
- OVERMEEREN, R. A.; SARIOWAN, S. V. & GEHRELS, J. C. 1997. Ground penetrating radar for determining volumetric water content; results of comparative measurements at two test sites. **Journal of Hydrology**, 197: 316 - 338, 1997. PAZ, VITAL PEDRO DA S.; PEREIRA, FRANNCISCO A. C. & OLIVEIRA, ÁUREO S. DE. s.d. **Retenção e movimento de água no solo**. Salvador: Núcleo de Engenharia de Água e Solo da UFBA. Notas de aula da disciplina Irrigação e Drenagem.
- PENNA, RODRIGO MACEDO. 2006. **Mapeamento geológico e caracterização geofísica por cintilometria, magnetometria e georadar da região de Gouveia / MG**. Trabalho Geológico de Graduação - Departamento de Geologia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2006.
- PETERSEN, C. T.; JENSEN, H. E.; HANSEN, S. & BENDER KOCH, C. 2001. Susceptibility of a sandy loam soil to preferential flow as affected by tillage. **Soil Tillage Research**, 58: 81 - 89, 2001.
- PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T. & MARTINS, J. A. 1976. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 278 p.

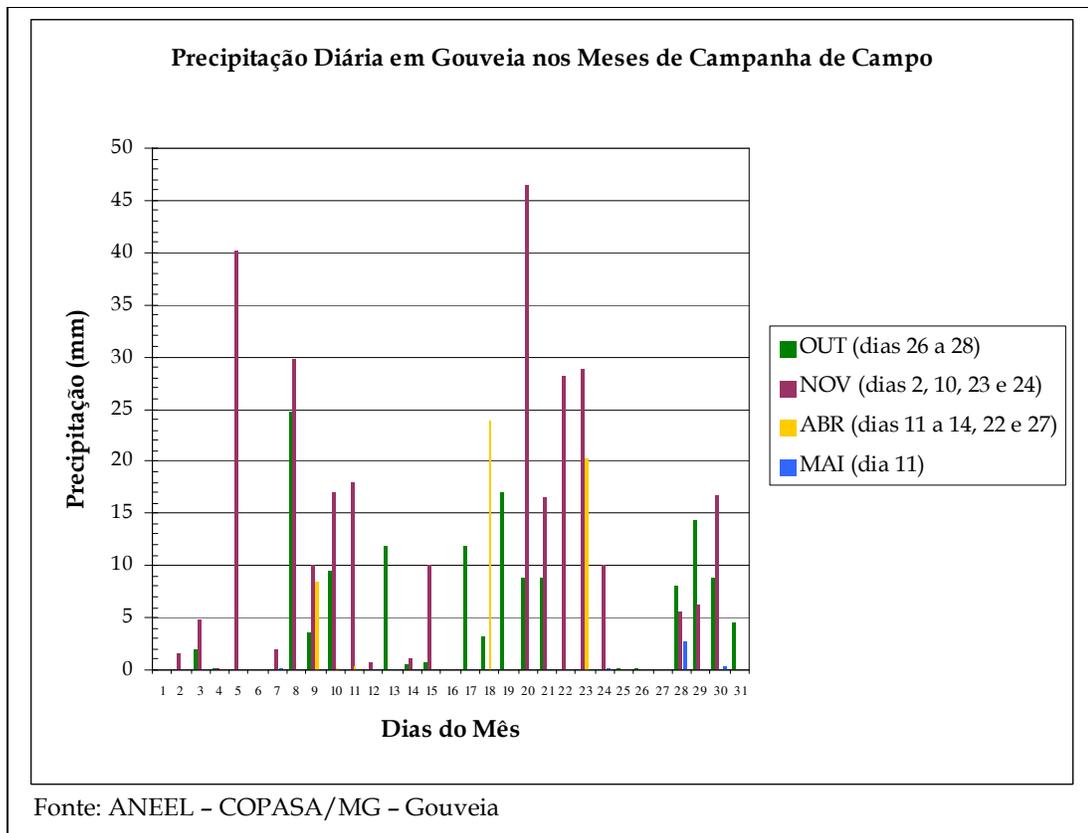
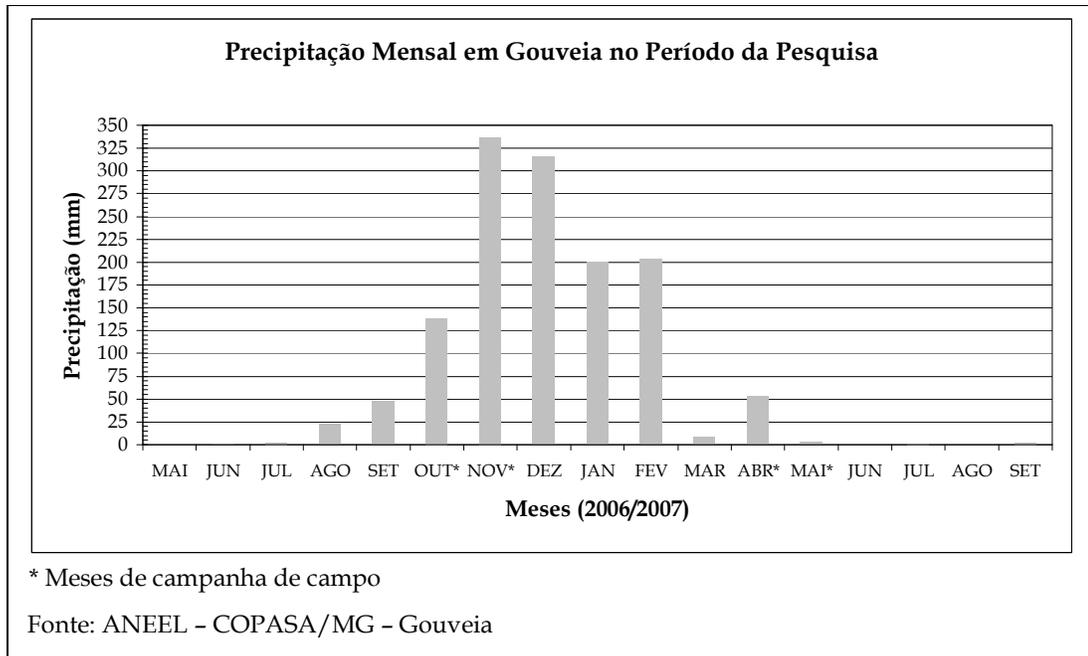
- PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP.** 1999. 145 p. Tese (Doutorado)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- PORTILHO, SIDNEY. 2000. **Padrões de infiltração e percolação da água no solo - microbacia do Córrego Quebra, Gouveia, MG.** 76 p. Monografia (Graduação em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2000.
- PORTILHO, SIDNEY. 2003. **Perda de solo por escoamento superficial e os padrões de infiltração e percolação da água no solo, microbacia do Córrego Quebra, Gouveia, Espinhaço Meridional, MG.** 117 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2003.
- PORTILHO, SIDNEY; AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R & DINIZ, ALEXANDRE M. 2002. Relações entre o comportamento hidrológico e características estruturais de uma vertente na região de Gouveia, Espinhaço Meridional, MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS, 23º, 2002, JOÃO PESSOA. **Anais do 23º Encontro Nacional de Geógrafos.** João Pessoa: 2002. p 101.
- PORTILHO, SIDNEY; AUGUSTIN, CRISTINA HELENA R. R & VALADÃO, ROBERTO CÉLIO. 2001. Comportamento da água subsuperficial no solo em vertente da microbacia do córrego do Quebra - MG (Brasil). In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE GEOLOGIA, 21º, 2001, MONTEVIDÉO. **Anais do 21º Simpósio Latinoamericano de Geologia.** Montevideo: 2001.
- REICHENBERGER, S.; AMELUNG, W.; LAABS, V.; PINTO, A.; TOTSCHKE, K. U. & ZECH, W. 2002. Pesticide displacement along preferential flow pathways in a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, 110: 63 - 86, 2002.
- RESENDE, MAURO; REZENDE, SÉRVULO B.; CORRÊA, GILBERTO F. & CURI, NILTON. 2002. **Pedologia: Base para distinção de ambientes.** 4ª ed. Viçosa: NEPUT, 2002. 365 p.
- ROCHA, LEONARDO CRISTIAN. 2004. **Caracterização pedológica em duas vertentes na Bacia do Córrego do Quebra - Gouveia/MG.** 110 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.
- ROCHA, LEONARDO CRISTIAN; CARVALHO, VILMA LÚCIA MACAGNAN & CRUZ, LUIZ OTÁVIO M. 2006. Índícios micromorfológicos de processos de coluvionamento na bacia do córrego do Quebra, Gouveia/MG. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, VI, 2006, Goiânia. **Trabalhos Completos do VI Simpósio Nacional de Geomorfologia.** Goiânia: v. 2, 10 p., 2006.
- RODRIGUES, A. R. & PORSANI, J. L. 1997. Diferentes litologias, diferentes situações, diferentes respostas - a utilização do método GPR como ferramenta de suporte à Geologia. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 5TH, 1997, SÃO PAULO. **Anais of the 5th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.** São Paulo: 1997.
- ROLDÃO, JOÃO S. F.; LOPES, NARCISO A. F. 1988. Potencialidades do emprego de traçadores na solução de problemas de percolação. In: SIMPÓSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO EM GEOTECNIA, 1988, RIO DE JANEIRO. **Anais do Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório em Geotecnia.** Rio de Janeiro: 1988. v. 2, p. 623 - 633.

- RÖMKENS, M. J. M.; HELMING, K. & PRASAD, S. N. 2001. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. **Elsevier Science**, 46: 103 - 123, 2001.
- SAADI, ALLAOUA. 1995. Geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. **Revista de Geociência Geonomos**, v. 3, n° 1, p. 41 - 63, 1995.
- SAADI, ALLAOUA & VALADÃO, ROBERTO CÉLIO. 1987. O cenozóico da porção mediana-central do Espinhaço Meridional. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 1º, 1987, PORTO ALEGRE. **Anais do 1º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**. 1ª síntese. Porto Alegre / RS. p. 398 - 407.
- SALGADO, ANDRÉ. AUGUSTO R. 2002. **Desnudação geoquímica e evolução do relevo no Espinhaço Meridional - MG**. 189 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.
- SALOMÃO, FERNANDO X. T. 1999. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, ANTÔNIO JOSÉ T.; SILVA, ANTÔNIO S. S. & BOTELHO, ROSÂNGELA G. M. B. 1999. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1999. 339p. cap 7. p. 229 - 267.
- SCANLON, BRIDGET R.; TYLER, SCOTT W. & WIERENGA, PETER J. 1997. Hydrology issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport. **Reviews of Geophysics**, v. 35, n. 4, p. 461 - 490, 1997.
- SCHOENEBERGER, P. J. & WYSOCKI, P. A. 2005. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. **Geoderma**, 126: 117 - 128, 2005.
- SILVA, ANTÔNIO SOARES DA. 1999. Análise morfológica dos solos e erosão. In: GUERRA, ANTÔNIO TEIXEIRA et al. (Orgs). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.
- SILVA, SAUL MOREIRA. 2004. **Compartimentação morfopedológica da Bacia do Ribeirão Chiqueiro, Gouveia-MG**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, IGC/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.
- SOUSA JR. & PORSANI, J. L. 2001. Localização de fraturas em rochas graníticas, no município de Capão Bonito - SP, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7TH, 2001, SALVADOR. **Anais of the 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. Salvador: 2001.
- STEEPLES, D. W. 1991. Uses and techniques of environmental geophysics. **Geophysics: The Leading Edge of Exploration**, v. 10, n. 9, p. 30 - 31, 1991.
- STRAHLER, A. N. & STRAHLER, A. H. 1973. **Environmental Geoscience**. Hamilton, California, Santa Bárbara, EUA. 1973.
- TACKETT, J. L. & PEARSON, R. W. 1964. Some characteristics of soil crust formed by simulated rainfall. **Soil Science**, Baltimore, v. 99, n. 6, p. 407 - 413, 1964.
- TAMARI, S.; GAUDU, J. & SIMONNEAU, T. 1991. Tensiometric measurement and metastable state of water under tension. **Soil Science**, v. 152, n. 3, p. 231 - 235, sept. 1991.
- TEIXEIRA, CLÁUDIA FERNANDA A.; MORAES, SÉRGIO OLIVEIRA & SIMONETE, MARIA APARECIDA. 2005. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da

- umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 161 - 168, mar./abr. 2005.
- THOMAS, GRANT W. & PHILLIPS, RONALD E. 1979. Consequences of water movement in macropores. **Journal of Environmental Quality**, 8: 149 - 152, 1979.
- THOMAS, GRANT W. & PHILLIPS, RONALD E. 1991. The transient instability of tensiometer reading during infiltration. **Soil Science**, v. 152, n. 3, p. 231 - 235, sept. 1991.
- THOMAS, MICHAEL F. 1994. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 460 p.
- THORNES, J. B. (Ed). 1990. **Vegetation and erosion: processes and environments**. England: John Wiley & Sons, 1990. 519 p.
- THURLER, E. R., FERNANDES, N. F., GUERRA, A. J. T. 1996. Condicionantes dos processos de infiltração e drenagem em solos submetidos a diferentes tratamentos em parcelas experimentais. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7º, 1996, CURITIBA. **Anais do 7º Simpósio de Geografia Física Aplicada**. Curitiba: 1996.
- TREWARTHA, G. T. **An Introduction to Climate**. New York: McGraw-Hill, 1954. 402p.
- TSYTOVICH, N. 1986. **Soil Mechanics: Concise Course**. Moscow: MIR Publishers, 1986. 391 p. Cap. 1: The nature and properties of soils.
- UCHA, J. M.; VILAS BOAS, G. S.; BOTELHO, M. A. B.; RIBEIRO, L. P. & SANTANA, P. S. 1999. Utilização do radar de penetração no solo - GPR - na identificação das camadas de fragipã e de duripã nos solos desenvolvidos sobre os sedimentos do grupo Barreiras. In: CONGRESSO DA ABEQUA, VII, 1999, PORTO SEGURO. **Anais do VII ABEQUA**. Porto Seguro: 1999.
- VALADÃO, ROBERTO CÉLIO. 1998. **Evolução de longo-termo do relevo do Brasil oriental: desnudação, superfície de aplainamento e soerguimentos crustais**. Tese (Doutorado em Geologia) - CPGG, Instituto de Geociências/UFBA, Salvador, BA, 1998.
- VILLAGRA, M. M.; MATSUMOTO, O. M.; BACCHI, O. O. S.; MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. & REICHARDT, K. 1988. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 12: 205 - 210, 1988.
- WEILER, MARKUS HELMUT. 2001. **Mechanisms controlling macropore flow during infiltration: dye tracer experiments and simulations**. Dissertation (Ph. D. in Technical Sciences) - ETHZ, Zürich, 2001. 151 p.
- WHITE, P. A. 1994. Electrode arrays for measuring groundwater direction and velocity. **Geophysics**, 57(2): 192 - 201, 1994.
- YEH, JIM T. C.; GELHAR, LYNN W. & WIERENGA, P. J. 1986. Observations of spatial variability of soil water pressure in a field soil. **Soil Science**, v. 142, n. 1, jul. 1986.
- YOUNG, ANTHONY. 1972. **Slopes**. London: Ed. Longman, 1972. 228 p.

ANEXO A

Dados Pluviométricos



ANEXO B
Descrição dos Perfis de Solo

Perfil da alta vertente

Classificação: CAMBISSOLO

Formação geológica: embasamento cristalino – Complexo Gouveia

Litologia: milonito de granito/xisto

Situação e declive: alta vertente, porção convexa

Erosão: forte – erosão laminar

Drenagem: bem drenado

Vegetação: Cerrado degradado

Uso atual: pastagem

	Horizonte A: 0 – 8 cm	Horizonte AB: 86 – 25 cm	Horizonte Bi: 25 – 37 cm	Horizonte C: 37 – 100 cm ⁺
Cor	10 YR e 4/4 bruno amarelado escuro	10 YR e 7/6 amarelo	5 YR e 5/8 vermelho- amarelado	10 YR e 5/8 bruno- amarelado
Textura	Argilosa com cascalho	Areno-argilosa a argilosa	Argilosa	Areno-argilosa
Estrutura	Moderada pequena e média granular	Fraca a moderada média e blocos subangulares	Fraca a moderada média de blocos subangulares	Maciça
Consistência	Macia, friável, plástica e ligeiramente pegajosa	Macia, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa	Ligeiramente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa	Ligeiramente dura, muito friável, não plástica a ligeiramente plástica e pegajosa
Raízes	Poucas finas	Raras finas	Poucas finas	Raras finas
Transição	Gradual horizontal	Gradual horizontal	Difusa irregular	-

Esta descrição é uma associação de dados obtidos nesta pesquisa e em pesquisas anteriores (Diniz, 2002 e Rocha, 2004)

Perfil da média vertente

Classificação: LATOSSOLO VERMELHO AMARELO

Formação geológica: embasamento cristalino – Complexo Gouveia

Litologia: milonito de granito/xisto

Situação e declive: média vertente, porção côncava

Erosão: extremamente forte – voçorocamento e erosão laminar

Drenagem: acentuadamente drenado

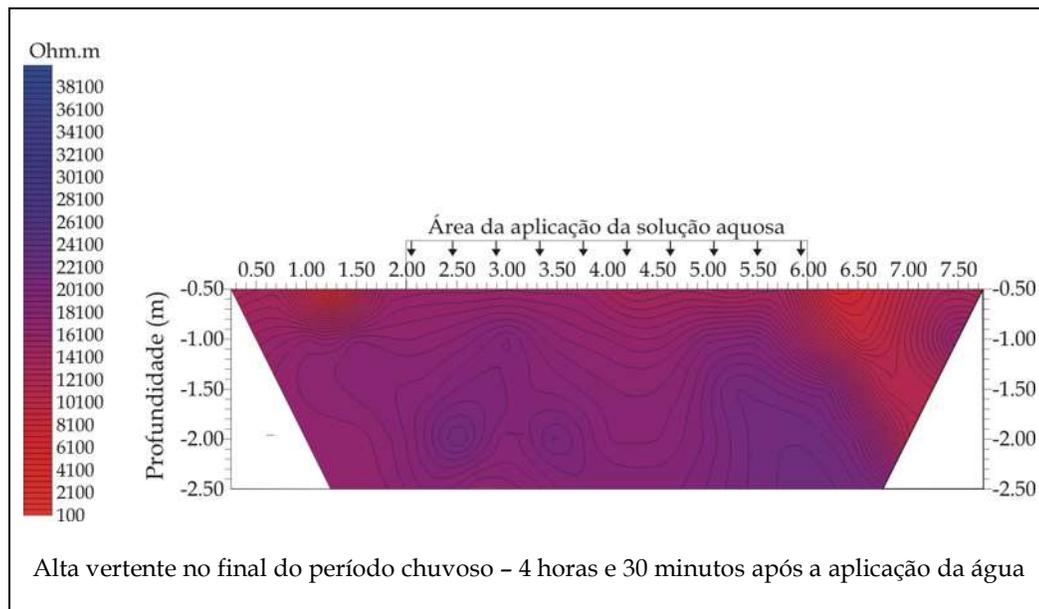
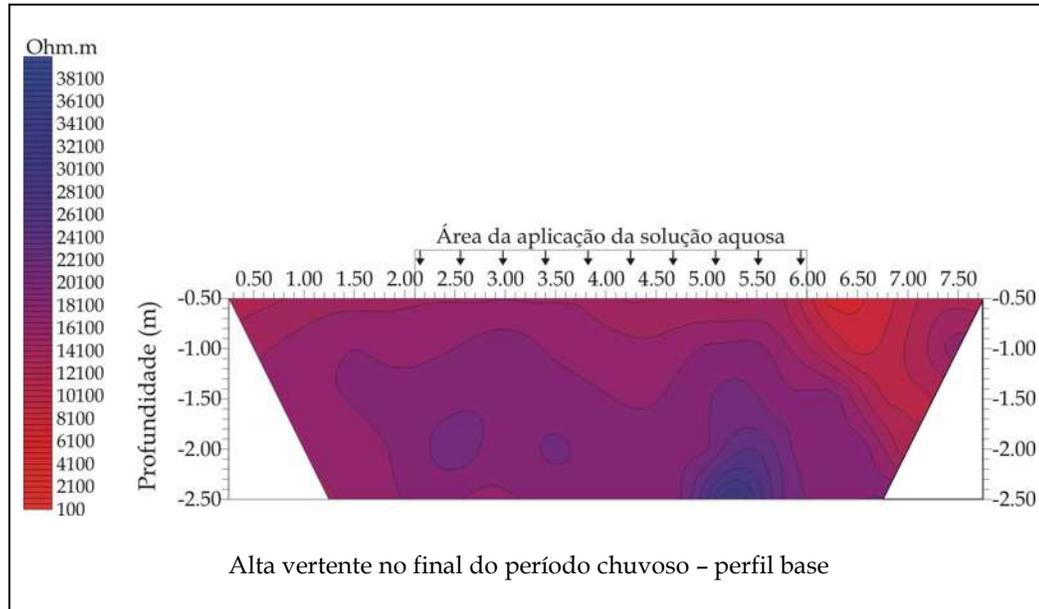
Vegetação: Cerrado degradado

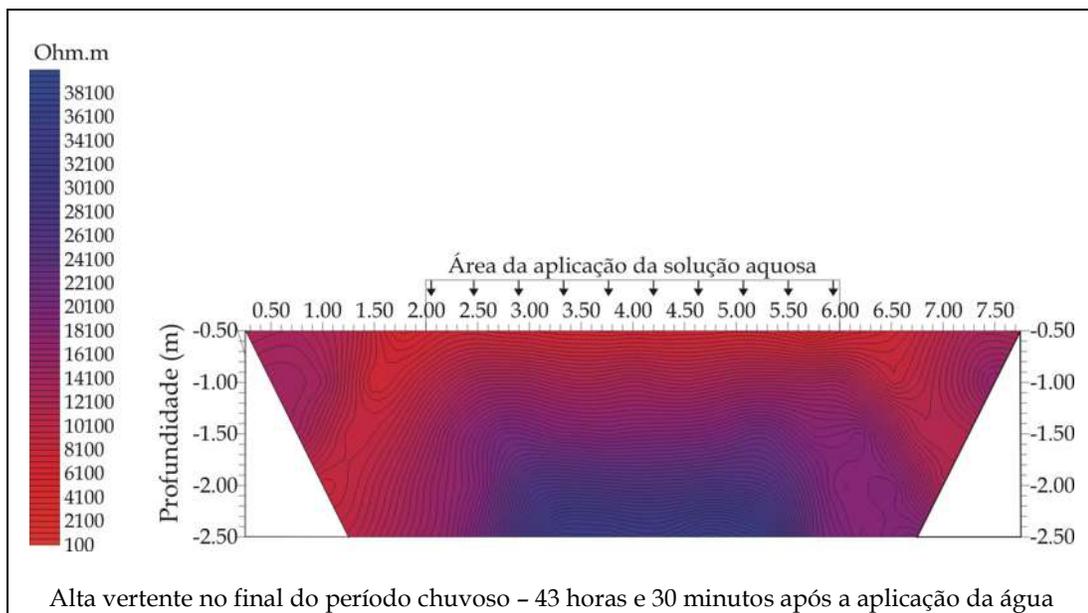
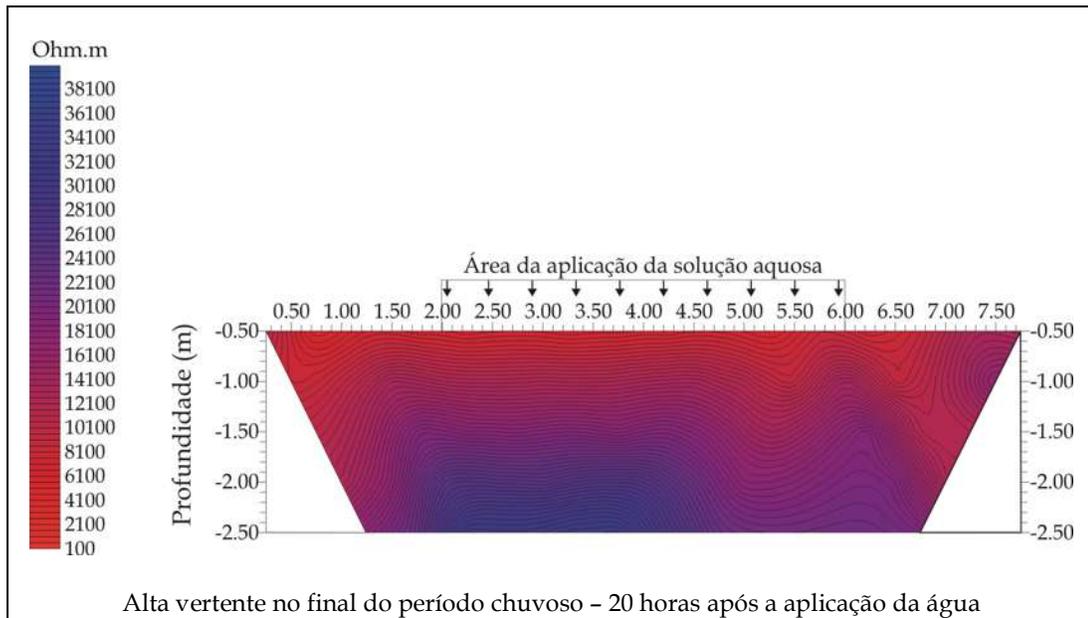
Uso atual: pastagem

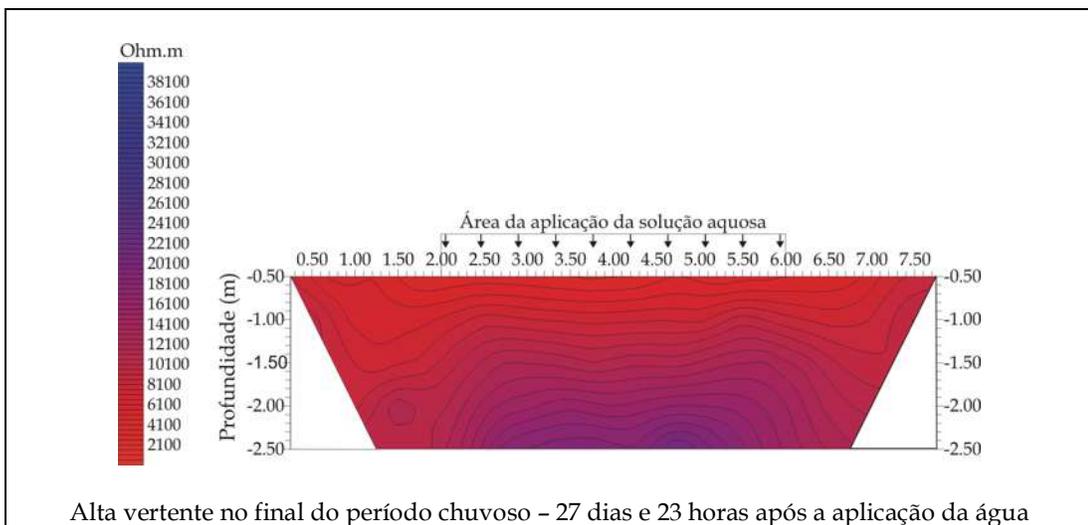
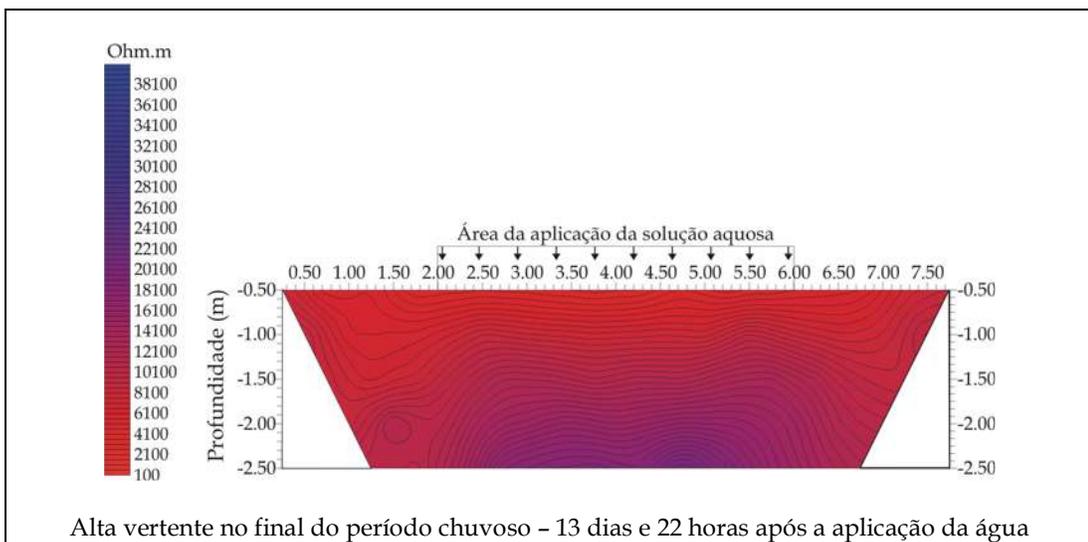
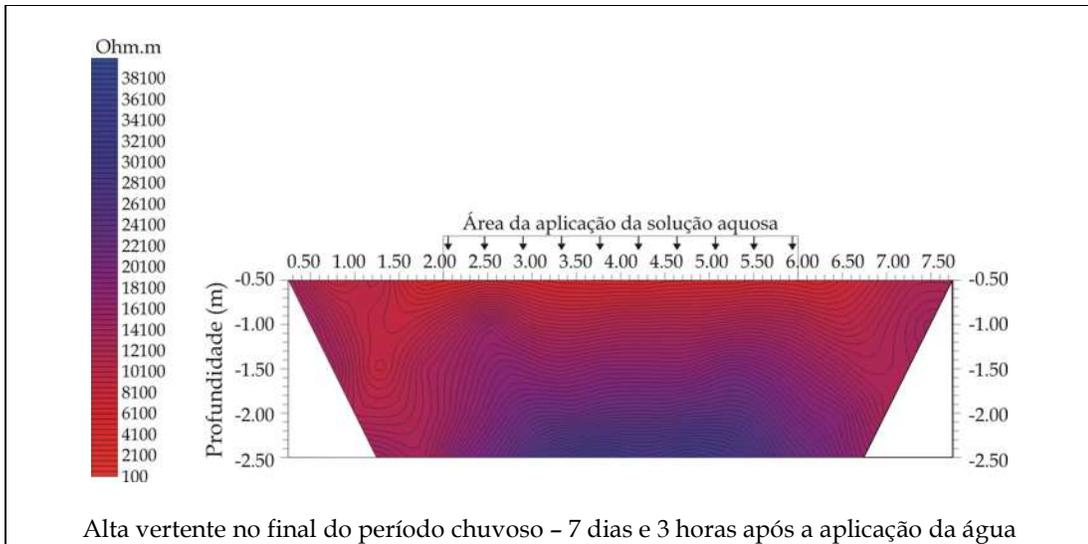
	Horizonte A: 0 - 16 cm	Horizonte AB: 16 - 29 cm	Horizonte Bw1: 29 - 78 cm	Horizonte Bw2: 78 - 100 cm*
Cor	7,5 YR e 3/3 bruno escuro	7,5 YR e 4/4 bruno	5 YR e 4/6 vermelho- amarelado	5 YR e 5/8 vermelho- amarelado
Textura	Argilosa	Argilosa	Argilosa	Argilosa
Estrutura	Moderada pequena e média granular	Moderada pequena e média granular	Fraca média de blocos subangulares que se desfaz em forte muito pequena granular	Fraca média de blocos subangulares que se desfaz em forte muito pequena granular
Consistência	Ligeiramente dura, muito friável, plástica e pegajosa	Ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e pegajosa	Macia, extremamente friável, plástica e pegajosa	Macia, extremamente friável, ligeiramente plástica e pegajosa
Raízes	Poucas finas	Poucas finas	Poucas finas e raras médias	Raras finas e médias
Transição	Clara horizontal	Gradual horizontal	Difusa horizontal	-

Esta descrição é uma associação de dados obtidos nesta pesquisa e em pesquisas anteriores (Diniz, 2002 e Rocha, 2004)

ANEXO C

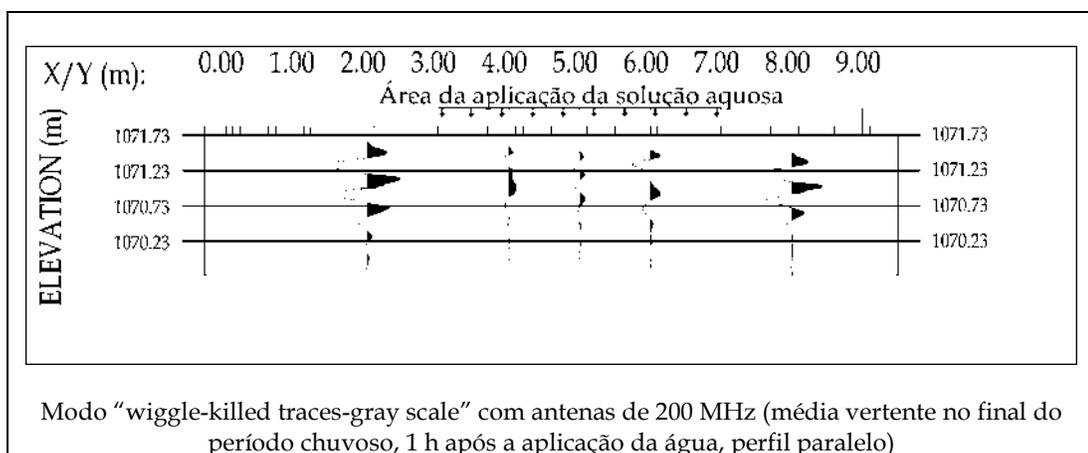
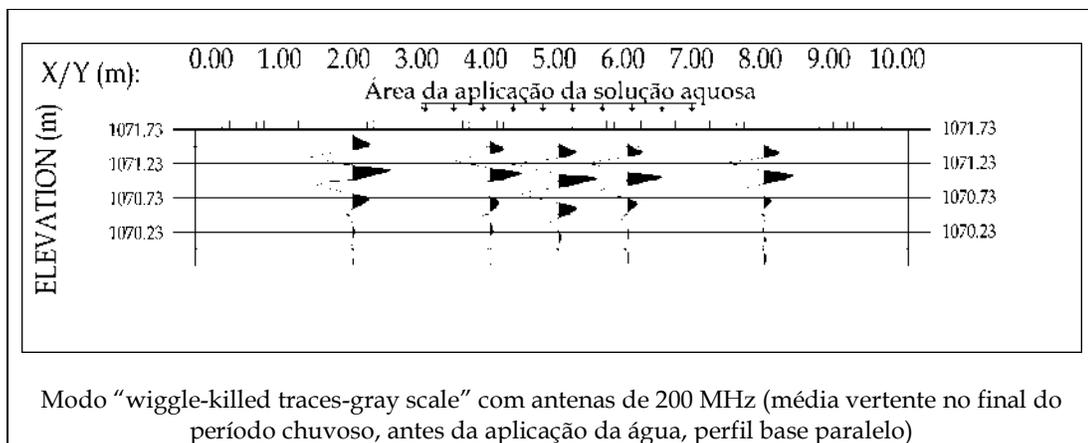
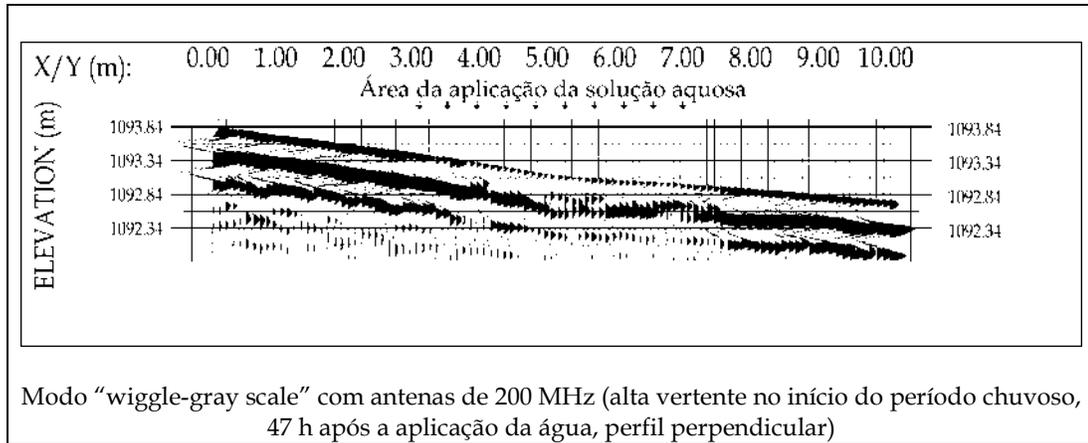
Perfis Geométricos Gerados com a Utilização do *Software Surfer®*

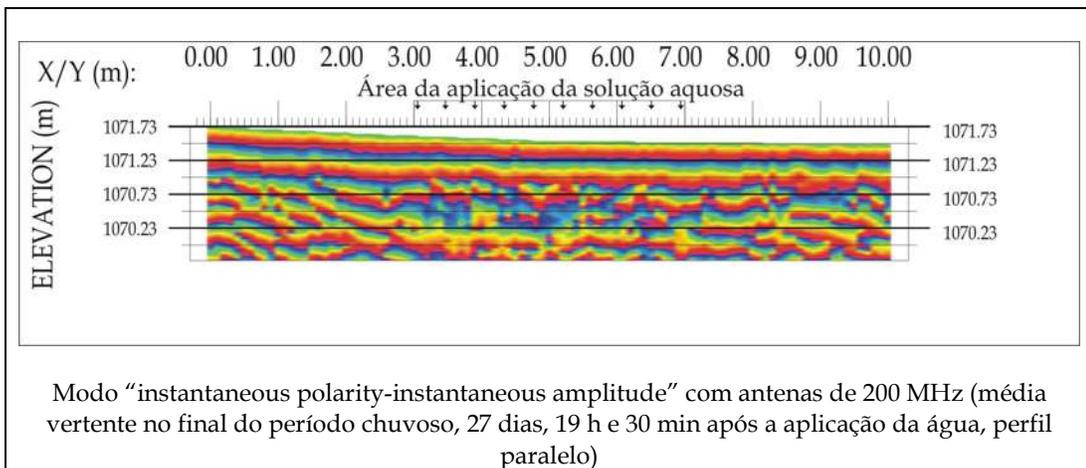
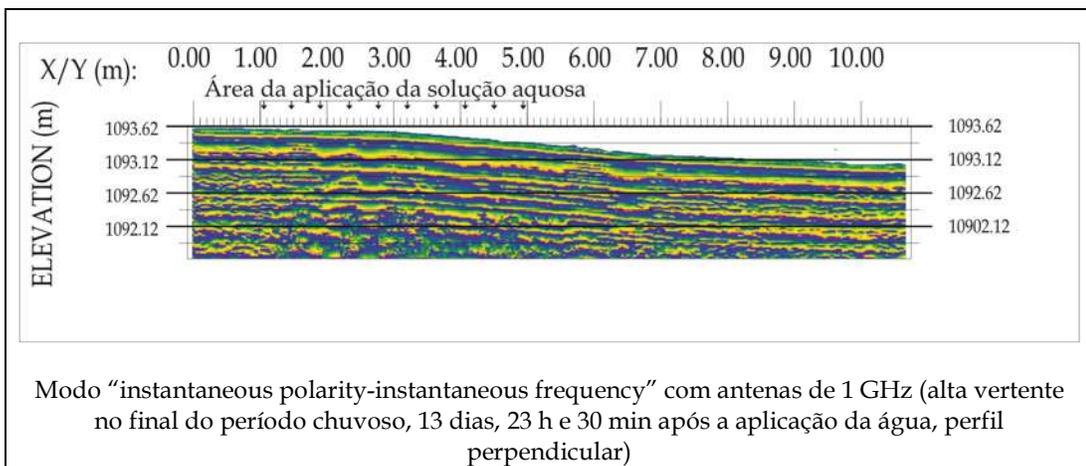
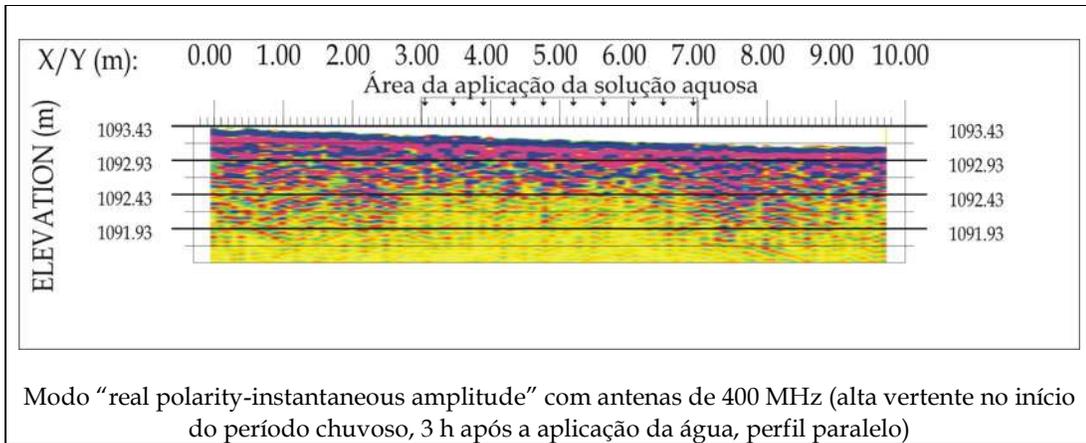




ANEXO D

Modos de Visualização de Radargramas Testados





Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)