



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**



***MODIFICAÇÕES NA HIDROLOGIA DOS SOLOS EM RESPOSTA AS  
ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO BONFIM, REGIÃO SERRANA DO RIO DE JANEIRO***

**SARAH LAWALL**

**NELSON FERREIRA FERNANDES - ORIENTADOR**

MAIO/2010

**MODIFICAÇÕES NA HIDROLOGIA DOS SOLOS EM RESPOSTA AS  
ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO BONFIM, REGIÃO SERRANA DO RIO DE JANEIRO**

**Sarah Lawall**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciência (Geografia).

Orientador: Nelson Ferreira Fernandes

Rio de Janeiro

Maio/ 2010

**MODIFICAÇÕES NA HIDROLOGIA DOS SOLOS EM RESPOSTA AS  
ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO BONFIM, REGIÃO SERRANA DO RIO DE JANEIRO**

**Sarah Lawall**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciência (Geografia).

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes – Orientador (UFRJ)

---

Prof. Dr. Evaristo de Castro Júnior (Professor- UFRJ)

---

Prof. Dr. Irani dos Santos (Professor - UFPR)

Rio de Janeiro – Maio 2010

## Ficha catalográfica

Lawall, Sarah

Modificações na hidrologia dos solos em resposta as alterações de uso e cobertura na Bacia Hidrográfica do Bonfim, Região Serrana do Rio de Janeiro. UFRJ/Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2010.

197 p.

Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Programa de Pós-graduação em Geografia, 2010.

1. Uso e cobertura do solo 2. Pesquisa de campo 3. Hidrologia dos solos

Se uma pessoa fizesse apenas o que entende,

jamais avançaria um passo.

(Clarice Lispector)

Dedico

Ao César, pela inigualável atenção, carinho e amor

Ofereço

A Patrícia, Renata, Pamela, Ana Carolina e Nelson,  
que caminharam junto transformando o projeto em realidade

## AGRADECIMENTOS

- Ao César, meu marido. Dois anos de “bastidores” dando equilíbrio a parte que não aparece na escrita final, meu emocional. Ele suportou! Não passou a mão na minha cabeça, mas, me deu colo quando precisava. Meu maior ídolo, obrigada.
- Ao Nelson, meu orientador, que acreditou, investiu e confiou esta pesquisa em minhas mãos. Muito obrigada!
- As valentes guerreiras Ana Carolina Ferraz, Renata Paulino, Pamela Figueiredo e Patrícia Mota, que trabalharam pesado nos campos sem perder a graciosidade feminina. Obrigada, “rangers do Bonfim”.
- A Lígia da CPRM que foi sempre solícita aos meus pedidos, orientações e acompanhamentos em campo.
- Ao Projeto EIBEX pelo investimento realizado através da compra dos instrumentos, um verdadeiro patrimônio para a pesquisa em hidrologia.
- Ao CNPq, pela bolsa de mestrado dando suporte financeiro a minha caminhada de 24 meses.
- Aos moradores do Bonfim que abriram as portas de suas propriedades permitindo a realização da pesquisa. Ao Sr. Carlos, Sr. “Casinho”, Sr. Vanderley, Sr. José Joaquim, Sr. Sérgio, Sr. Robson, Sr. Antônio, Sr. Pedro.
- Ao Anderson, Andinho ou melhor Anjinho, nosso guia e braço direito. Obrigada Anderson pela disponibilidade e principalmente, disposição.
- Aos amigos do Nemphe que passaram pelo Bonfim e pelo Projeto, deixando suas contribuições. Obrigada Lúcia e Marcel.
- A minha amiga gauchinha da turma de mestrado e que também colocou seu suor no Bonfim e principalmente na formatação final, obrigada Lia Kroeff.
- A Cristiane Brasão, calourinha no Bonfim mas, cheia de gás e presteza.

- Aqueles que não são do Nemphe mas que também passaram no Bonfim deixando um suorzinho. Obrigada Gabi, Bruno, Thais Balther, Felipe e Luana.
- Ao motorista do IGEO Vanderlei que não só nos levava morro acima e morro abaixo como também, colocou a mão na massa na instalação dos sensores. Obrigada.
- Ao Senhor Antônio, proprietário do Sítio das Nascentes, que teve a “infelicidade” de nos oferecer a casa e nós, claro que aceitamos. Obrigada mesmo, foi uma semana muito feliz, de grande trabalho e abrigo.
- A Débora, Tia Clarinha e funcionários do CAPA (Campo de Aventuras Paraíso do Açú) que nos atenderam gentilmente nas jornadas de Campo e captura de dados.
- Ao Sidney pela construção das caixas que abrigam os GMS.
- Ao Joãozinho, Andrea Paula, Ricardo Zaidan que me indicaram para o Nemphe e que sempre acreditaram no meu lado “pesquisadora” .
- Ao Sidney Vieira e a Bianca Vieira pelas conversas e orientações acerca do Permeâmetro de Guelph.
- Ao José Francisco Lumbreras e Uebi pelo cansativo trabalho de reconhecimento dos solos na Bacia do Bonfim.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia por manter a credibilidade e competência engrandecendo nossa formação “strictu-sensu”.
- As Professoras Thelma e Maria Naíse que contribuíram diretamente para meu crescimento no caminho da pesquisa em geografia; respeito e gosto muito de vocês.
- Aos demais Professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia pela contribuição nos debates e discussões que engrandeceram meu universo geográfico.
- Aos membros da banca de qualificação, Professores Evaristo de Castro Júnior e Marcos Bacis Ceddia, além da pesquisadora da CPRM Lígia Maria do Nascimento Araújo. Obrigada pelas críticas pertinentes que possibilitaram melhor direcionamento da pesquisa.



- Ao Pedro do Geocart pela elaboração dos mapas para qualificação, obrigada.
- Ao João Paulo (Juiz de Fora), pelos mapas da dissertação final e carinho, obrigada João.
- Aos meus enteados, Juliana e Guilherme que aturando meu mau-humor, sempre me retribuía com sorriso e calma.
- A Marly, minha eterna querida sogrinha, que festejou a minha aprovação mas, infelizmente não teve tempo de ver o desfecho e a conclusão desta etapa de minha vida.
- Aos meus inúmeros parentes, família Lawall, obrigada a aqueles que torceram e sempre acreditaram que eu poderia chegar até aqui.
- E por último, mas não menos importante, Mirian, minha mãe e “pãe” e irmãos Suely e Samuel que torceram a distância, sofreram calados com minhas agonias e sempre me acolheram quando eu corria para Juiz de Fora em refúgio.

## RESUMO

Mudanças no tipo de uso e cobertura dos solos influenciam a dinâmica hidrológica dos solos. A vegetação natural, ao proteger a superfície, auxilia diretamente na preservação das propriedades físicas e hídricas dos solos, podendo, assim, aumentar a infiltração. A substituição da cobertura florestal pela agrícola ou de pastagem acarreta, dentre outros, dois sérios problemas para hidrologia dos solos, a redução da quantidade de água adicionada ao solo e, a erosão do topo do perfil. Nas áreas serranas, este fator é agravado pelas características naturais da topografia que acentuam a produção e transporte de sedimentos por intensos fluxos superficiais. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência das mudanças de tipo de uso e cobertura vegetal na hidrologia dos solos de ambiente serrano. Para tal, foi escolhida com bacia hidrográfica experimental, a do rio Bonfim, no município de Petrópolis, Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Nesta bacia, foram feitas atividades de campo para obtenção das análises das propriedades físicas, mensurações da taxa básica de infiltração e condutividade hidráulica saturada e, monitoramento do potencial matricial nas Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Nove URH foram escolhidas, sendo quatro em florestas (URHF), quatro agrícolas (URHA) e uma em pastagem (URHP). Em geral, verificou-se que as URHF foram mais permeáveis a entrada e deslocamento da água no perfil do solo, as URHA foram intermediárias e a menos permeável, a URHP. Quanto à movimentação de fluxos no perfil, a mesma ordem foi seguida, com menor retenção e fluxo vertical nas URHF potencializando a infiltração, ao passo que, na URHP, maior retenção e saturação na superfície podendo gerar fluxos laterais e escoamento superficial no excedente a precipitação. Em ambientes serranos, o uso e as condições de relevo se intercalam sendo o primeiro mais atuante na superfície e, o segundo, no restante do perfil.

# HYDROLOGY CHANGES IN SOIL IN RESPONSE TO THE USE AND COVER ALTERATIONS IN THE CATCHMENT BONFIM, MOUNTAINOUS REGION OF RIO DE JANEIRO

## ABSTRACT

Changes land use and soil cover influences the hydrological dynamics of the soil. Vegetation protects the soil surface, assists in maintaining the characteristics physical properties of soil and water, increasing infiltration rates. The replacement of forests by agriculture and grazing influences the water entering the soil, which may cause impacts by exposing surfaces, to erosion processes. In mountainous areas, where natural topography accentuates the sediment transport due to intense surface flow, deforestation makes it overwhelming. In this context, the objective of this research was to evaluate the influence of changes in land use and soil cover in hydrology on mountain environment in the catchment of Bonfim (RJ). Field activities were performed to obtain the physical properties, measurements of the basic rate of infiltration and saturated hydraulic conductivity and matric potential monitoring in Hydrologic Response Units. URH nine were chosen, four in the forests (URHF), four farmland (URHA) and pasture (URHP).

In general, it was found that the URHF were more permeable, the URHA were intermediate and less to URHP. As for handling the flow profile, the same order was followed, with less restraint and vertical flow in URHF enhancing the infiltration, whereas in URHP, higher retention and saturation on the surface can generate lateral flow and runoff in excess precipitation. In mountain environments, the use and topography are inserted as the first most active on the surface and the second, the rest of the profile.

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha$	Parâmetro de correção do meio poroso	Cm
cm	Centrímetro	
C	Constante de proporscionalidade adimensional	
GMS	Sensor de matriz granular	kPa
H	Carga Hidráulica constante	Cm
Ksat	Condutividade hidráulica saturada	Cm/s
Q	Vazão	cm <sup>3</sup> /s
TIB	Taxa de Infiltração Básica	Cm/s
t	Tempo	segundos
v	Velocidade de infiltração	Cm/s

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação capacidade de infiltração e taxa de precipitação ao longo do tempo. ....	31
Figura 2: Curva de infiltração de um solo arenoso e outro argiloso. . ....	32
Figura 3: Curva de capacidade de infiltração dos solos com a) diferentes texturas, b) diferentes manejos e mesma cobertura e c) diferentes coberturas.....	34
Figura 4: Representação dos picos de vazão e dos elementos da paisagem envolvidos.. ....	35
Figura 5: Infiltrômetro de Anel Duplo.....	38
Figura 6: Tabela de classes de condutividade hidráulica conforme a textura do solo.....	41
Figura 7: Fluxos de água no perfil em dois solos, franco-arenoso e franco-argiloso com relação a profundidade do solo e a lateralidade.).....	42
Figura 8: Utilização do Permeâmetro de Guelph.....	47
Figura 9: Formação do Bulbo de saturação no contato entre o poço com a carga hidráulica e o solo. ....	48
Figura 10: Permeâmetro IAC (Instituto Agronômico de Campinas).....	49
Figura 11: Método Analítico de obter o Fator C para uso na Equação de Elrich... ..	51
Figura 12: Entrada da água em areia seca .....	52
Figura 13: Ação da força capilar, experimento em laboratório .....	54
Figura 14: Tensiômetro instalado no solo .....	56

Figura 15: Sensor de Matriz Granular (GMS).....	58
Figura 16: <i>Datalogger Watermark</i> modelo 900 .....	59
Figura 17: Fluxograma representativo da influencia da retirada da cobertura nas propriedades físicas e processos hidrológicos desencadeantes.....	62
Figura 18: Localização da Bacia do Bonfim no município de Petrópolis e sua posição no Estado do Rio de Janeiro.....	68
Figura 19: Limites do Parque Nacional da Serra dos Órgãos com as divisões municipais.. .....	70
Figura 20: Divisão dos seis setores fundiários nos limites do Parque Nacional da Serra dos Orgãos.....	71
Figura 21: Mapa com divisão dos cursos da bacia do Bonfim com fotografias de paisagens representativas dos compartimentos. ....	76
Figura 22: Manejo do solo e água na comunidade rural do Bonfim. ....	78
Figura 23: Isoietas transpostas na carta topográfica de Itaipava com limites da bacia do Bonfim.....	81
Figura 24: Recorte do Mapa geológico do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, com ênfase na bacia do Bonfim. ....	82
Figura 25: Modelo Digital de Elevação com respectivas feições geomorfológicas identificadas na Bacia do Bonfim .....	84
Figura 26: Assimetria das encostas no vale do Bonfim representada por imagem de satélite e em perfil.. .....	86
Figura 27: Modelo Digital de Elevação com perfis de relevo em meio a duas falhas geológicas. ....	87

Figura 28: Unidades de Mapeamento de Solos no Parque Nacional da Serra dos Orgãos. ....	89
Figura 29: Solos mais profundos na Bacia do Bonfim. Visão geral da encosta com recorte do perfil observado.....	90
Figura 30: Mapa altimétrico da Bacia do Bonfim com distribuição das URHs.....	95
Figura 31: Esquema metodológico das mensurações e coletas realizadas nas Unidades de Resposta Hidrológica .....	97
Figura 32: Instalação do Infiltrômetro de Anel Duplo na URHP.....	98
Figura 33: Leitura realizada no anel interno do infiltrômetro de anel duplo. ....	99
Figura 34: Permeâmetro modelo IAC, mensuração da condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ).....	101
Figura 35: Seqüência de montagem e controle do ensaio de condutividade hidráulica saturada de campo .....	103
Figura 36: Seqüência de coleta de amostra indeformada.. ....	105
Figura 37: Localização das estações de GMS na Bacia do Bonfim. ....	107
Figura 38: Kit completo watermark instalado na URHA com esquema de posicionamento dos sensores no solo. ....	109
Figura 39: Média total das frações granulométricas analisadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Floresta representada por profundidade em percentual. ....	112
Figura 40: Média total das frações granulométricas analisadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Agricultura .....	112

Figura 41: Média total das frações granulométricas analisadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Pastagem .....	113
Figura 42: Triângulo de distribuição de classes texturais .....	114
Figura 43: Média dos três pontos de repetição para cada URH em área florestada. ....	117
Figura 44: Média dos três pontos de repetição para cada URH na agricultura. ..	118
Figura 45: Valores totais das cinco repetições da URH pastagem.....	119
Figura 46: Valores médios de densidade de partículas das amostras analisadas em cada Unidade de Resposta Hidrológica. ....	121
Figura 47: valores médios de porosidade total das URHF e URHA com valor bruto da URHP com relação às profundidades .....	123
Figura 48: Box plot dos valores de porosidade total divididos por tipo de uso, sem distinção de profundidades. ....	125
Figura 49: Adensamento da camada superficial da URHP, com redução da porosidade total.....	126
Figura 50: Valores médios de densidade aparente nas Unidades de Resposta Hidrológica .....	128
Figura 51: Superfície em URHF1, horizonte orgânico com 3 centímetros, menor acúmulo de serrapilheira com relação a URHF5.....	129
Figura 52: Box plot dos dados de densidade aparente separados por tipo de uso e cobertura. ....	130



Figura 53: Box plot das taxas de infiltração básica das unidades de resposta hidrológica agricultura, floresta e pastagem com relação aos valores totais encontrados.....	133
Figura 54: Dispersão dos dados individuais de $k_{sat}$ obtidos em diferentes URH e profundidade .....	139
Figura 55: Valores médios totais de $K_{sat}$ das unidades de resposta hidrológicas floresta, agricultura e pastagem, divididos por profundidade na escala logarítmica. ....	143
Figura 56: Box plot dos valores de $k_{sat}$ ( $10^{-5}$ cm/s) nos diferentes tipos de uso e ocupação do solo, não separado por profundidades.....	143
Figura 57: Box plot dos valores de $K_{sat}$ em cm/s na profundidade de 20 cm distribuídos pelas unidades de resposta hidrológica agricultura, floresta e pastagem.....	145
Figura 58: Box plot dos valores de $K_{sat}$ em cm/s na profundidade de 50 cm distribuídos pelas unidades de resposta hidrológica agricultura, floresta e pastagem.....	145
Figura 59: Precipitação diária acumulada entre o período de 07 de setembro de 2009 a 04 de janeiro de 2010.....	149
Figura 60: Dados de precipitação diária (mm) e potencial matricial das estações em URHA1, URHA2 e URHP1 do período completo de setembro de 2009 a janeiro de 2010 .....	151
Figura 61: Dados de precipitação diária (mm) e potencial matricial das estações em URHF1, URHF5 do período completo de setembro de 2009 a dezembro de 2010 .....	157

Figura 62: Detalhamento dos dados de potencial matricial das cinco estações de GMS em período de nove dias de maior concentração de picos de chuva.....	161
Figura 63: Agrupamento dos monitoramentos e mensurações realizadas nas Unidades de Resposta Hidrológica Florestadas.....	167
Figura 64: Imagem GeoEye extraída do <i>Google Earth</i> com a distribuição das estações de GMS nas Unidades de Resposta Hidrológica .....	171
Figura 65: Agrupamento dos monitoramentos e mensurações realizadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Agricultura .....	174
Figura 66: Agrupamento dos monitoramentos e mensurações realizadas na Unidade de Resposta Hidrológicas Pastagem .....	179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores e Taxa de Infiltração Básica dos solos. Adaptado de [REICHARDT, 1987] .....	39
Tabela 2: Parâmetros de ajuste A e B, para o cálculo do fator C. ....	50
Tabela 3: Categorias de meios porosos para estimativa de $\alpha^*$ (ELRICK et al. 1989) .....	51
Tabela 4: Interpretação dos valores de GMS.....	57
Tabela 5: Caracterização das Unidades de Resposta Hidrológica na bacia hidrográfica do Bonfim. Baseada em PARK e VAN DE GIESEN (2004).....	94
Tabela 6: Valores médios totais das repetições das URHF, URHA, URHP por profundidade com destaque para fração areia.....	111
Tabela 7: Valores médios das URHs floresta, agricultura e pastagem com destaque para o somatório de silte e argila.....	116
Tabela 8: densidade de partículas (real) dos solos das unidades de resposta hidrológica .....	120
Tabela 9: valores brutos com média de densidade aparente das unidades de resposta hidrológica .....	124
Tabela 10: valores brutos com média de densidade aparente das Unidades de Resposta Hidrológica distribuídos pelas profundidades.....	129
Tabela 11: dados totais da taxa de infiltração básica (TIB) dos pontos mensurados nas unidades de resposta hidrológica seguida das médias de cada unidade e desvio padrão (DP) correspondente.....	132
Tabela 12: Dados acerca da autoria, tipo de uso, textura, método, resultados de TIB e análise em percentual dos artigos escolhidos para discussão dos dados. ....	137
Tabela 13: Dados totais de $k_{sat}$ com média das repetições de cada URH divididos nas profundidades mensuradas .....	140

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Taxa Básica de Infiltração .....	38
Equação 2: Condutividade Hidráulica Saturada de Campo .....	50
Equação 3: Constante de Proporcionalidade Adimensional.....	50
Equação 4: Taxa de Infiltração Básica .....	100
Equação 5: Densidade real do solo.....	104
Equação 6: Porosidade total .....	105
Equação 7: Densidade Aparente.....	106

## INDICE

1	INTRODUÇÃO .....	24
2	OBJETIVO .....	29
3	HIDROLOGIA DOS SOLOS: Processos e fatores condicionantes .....	30
3.1	Hidrologia dos solos: processos de entrada, movimentação e retenção ....	30
3.1.1	Infiltração – entrada de água no solo .....	30
3.1.2	Métodos de obtenção da Taxa de Infiltração Básica.....	37
3.1.3	Fluxo saturado de água no solo: condutividade hidráulica.....	40
3.1.4	Métodos de obtenção da Condutividade Hidráulica Saturada.....	45
3.1.5	Estado de energia da água no solo: características de movimentação e retenção .....	52
3.1.6	Monitoramento Potencial Matricial .....	55
3.2	O papel da cobertura vegetal na dinâmica hidrológica dos solos .....	60
4	A BACIA HIDROGRÁFICA DO BONFIM .....	68
4.1	Localização Geográfica e Processo de ocupação da Bacia do Bonfim .....	68
4.1.1	Uso e cobertura do solo .....	74
4.1.2	Manejo das atividades agrícolas .....	77
4.2	Caracterização Ambiental.....	79
4.2.1	Clima .....	79

4.2.2	Geologia.....	81
4.2.3	Relevo e Solos .....	83
5	METODOLOGIA .....	91
5.1	Áreas de mensuração e monitoramento hidrológico: Unidades de Resposta Hidrológica (URH) .....	91
5.2	Mensurações e Monitoramentos Hidrológicos nas Unidades de Respostas Hidrológicas .....	96
5.3	Taxa de Infiltração Básica.....	98
5.4	Condutividade Hidráulica Saturada de Campo .....	100
5.5	Propriedades Físicas dos Solos .....	103
5.5.1	Amostras Deformadas.....	103
5.5.2	Amostras Indeformadas .....	104
5.6	Potencial Matricial do Solo.....	106
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
6.1	Análises das Propriedades Físicas nas Unidades de Resposta Hidrológica (URH).....	110
6.1.1	Granulometria das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs).....	110
6.1.2	Densidade real, aparente e porosidade total das Unidades Resposta Hidrológica .....	120
6.2	Análise das propriedades hídricas e físicas nas unidades de resposta hidrológica.....	131

6.2.1	Taxa de infiltração básica (TIB).....	131
6.2.2	Condutividade Hidráulica Saturada ( $k_{sat}$ ).....	139
6.3	Interpretação da hidrologia dos solos nas Unidades de Resposta Hidrológica na Bacia do Bonfim .....	148
6.3.1	Análise do potencial matricial com relação à precipitação local nas unidades de resposta hidrológica.....	149
6.3.2	Detalhamento do potencial matricial nas URHs com base no intervalo de altas precipitações.....	160
6.3.3	Hidrologia dos solos nas Unidades de Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Bonfim.....	165
7	CONCLUSÕES .....	182
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	185
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	187

## 1 INTRODUÇÃO

O dueto solo e água são dois recursos vitais para manutenção da vida e desenvolvimento econômico das sociedades. Em resposta ao crescimento populacional, nas últimas décadas, a cobertura dos solos de bacias hidrográficas florestadas vem sendo gradativamente substituída por áreas de intensa produção agrícola, pecuária e, principalmente, pela expansão urbana. Essas mudanças têm acarretado uma série de impactos tais com: a erosão do solo e a contaminação da água por produtos químicos e efluentes domésticos, os quais têm comprometido a qualidade e disponibilidade de água e solo.

A vegetação mantém a qualidade das propriedades físicas e hídricas envolvidas no processo de infiltração. Além disso, ela protege o solo do impacto direto da água da chuva atenuando os processos erosivos intensificados pela exposição da superfície (DUNNE e LEOPOLD, 1978; HEWLETT, 1982).

Uma vez retirada a cobertura florestal, sensíveis alterações no equilíbrio entre infiltração e escoamento superficial podem ser identificadas pelo aumento do volume de água que atinge os canais com redução no tempo de resposta às intensas precipitações (NEWSON, 1996; TUCCI E CLARKE, 1998, DESCHEEMAEKER et al, 2006). Tradicionalmente, a mudança súbita dos fluxos nos canais vem sendo amplamente estudada nos trabalhos em hidrologia superficial, representados pelas hidrógrafas ou hidrogramas (GURNELL e GREGORY, 1981; CUO et al, 2008; CEBACAUER e HOYERKA, 2008). Em geral, o monitoramento feito no canal acusa a degradação no aumento do escoamento superficial na bacia, mas não contribuem para a pesquisa da fonte de degradação e mudanças no comportamento de solo e encostas.

A infiltração é um processo que responde melhor as fontes de degradação pela alteração nas propriedades físicas e condições de cobertura, regulando a quantidade de água inserida no solo ou disponível para escoar. Por isso, ela é



uma etapa importante no ciclo hidrológico, responsável pelo abastecimento das plantas, recarga dos aquíferos, controle dos processos geomorfológicos e manutenção dos fluxos nos canais em períodos de estiagem.

Dentre as múltiplas funções, a influência da infiltração na disponibilidade de água para as plantas tem conduzido inúmeros trabalhos no campo da agronomia guiados pela necessidade de entender a dinâmica hidrológica dos solos, a fim de ampliar a sua produtividade (GÓES, 2005; MIRANDA, 2008, HOULBROOKE et al, 2008).

Mudanças na superfície dos solos por substituição de cobertura ou práticas de manejos são identificadas nos estudos das propriedades físicas e hídricas que envolvem a hidrologia dos solos. Dentre elas, densidade aparente, porosidade total (macro e micro), estrutura de agregados, curva de retenção, taxa de infiltração e condutividade hidráulica são amplamente empregadas pela sensibilidade às perturbações no perfil dos solos.

Muitos trabalhos têm estabelecido comparações entre diferentes ambientes buscando caracterizar o efeito dos tipos de uso no comportamento hidrológico dos solos (SOUZA et al, 2004; SILVA et al, 2005; ZIMMERMANN, 2006; NDIAYE et al, 2007). Alguns relacionam a floresta, como condição inicial, quantificando os demais ambientes modificados pela agricultura e pastagem, como em SOUZA et al (2004) e ZIMMERMANN et al, (2006). Há aqueles, como NYDIAYE et al, (2007), que comparam ambientes modificados, de agricultura e pastagem, sem condições iniciais, buscando indicar os efeitos nocivos dos sistemas para a hidrologia dos solos.

Nesta mesma linha, algumas pesquisas buscam contribuir com o entendimento da dinâmica hidrológica dos solos frente práticas de manejo (KLEIN e LIBARDI, 2002; SOUZA, 2003; BERTOLINO, 2004) e atividades conservacionistas de restabelecimento das propriedades físicas e hídricas (MIRANDA, 2008) ou os efeitos temporais dos sistemas (CAVALIERI, 2009). Dada

a importância econômica dos solos, esses trabalhos concentram esforços nas estimativas e monitoramentos, principalmente, na zona de raízes, camada do solo mais impactada pelo manejo, tornando os resultados concentrados nos seus 30 primeiros centímetros.

Em outra vertente, as propriedades físicas e hídricas têm sido empregadas nas pesquisas de campo da Hidrologia e Geomorfologia, auxiliando na investigação dos movimentos de massa (VIEIRA, 2001; DHAKAL e SIDLE, 2004), e processos de encostas (FAMIGLIETTI et al, 1998; LIN E ZHOU et al, 2008), controle e simulação de fluxos de contaminantes (LIPSIUS E MOONEY, 2006; BACHMAIR, 2009).

Em complemento ao interesse agrônomo pela zona de raízes, a Hidrologia e Geomorfologia incorporam à sua abordagem todo perfil do solo, área com limite entre a superfície (com a vegetação) e o contato com lençol freático, permitindo o estudo dos fatores internos e externos ao perfil, que tem grande interferência na dinâmica hidrológica dos solos. Essa incorporação aumenta o número de variáveis envolvidas nos processos hidrológicos, tornando as pesquisas da zona não-saturadas mais complexas.

Nesta direção, vários estudos têm buscado entender os efeitos da topografia (TICEHURST et al, 2007; WANG et al, 2008; WEST et al, 2008) e da profundidade do perfil (SCHOENEBERGER et al. 1995; TROMP-VAN MEERVELD e McDONNELL, 2006) na dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas, porém, sem considerar as influências da cobertura e do tipo de uso. Outros trabalhos envolvem a cobertura testando a sua influência em diferentes posições da encosta quanto às mudanças na forma dos solos em absorver água como em HAYASHI et al (2006) e JORDAN et al(2008). Esses trabalhos investigam consistentemente a participação das variáveis ou condicionantes geomorfológicas e pedológicas entre diferentes escalas espaciais e temporais. Entretanto, a variável cobertura do solo, para fins hidro-geomorfológicos, aparece como o estudo do efeito de coberturas isoladas como a pastagem (CAMBRA, 1998) ou florestas, compondo a grande

maioria, como em BUTLE e HOUSE (1997), ELSENBEER (2001), HARDEN e SCRUGGS (2003) e NEGREIROS (2006).

Destacam-se os trabalhos de CHEN et al (2007) e SWARTZ et al (2003) que atuaram na interface entre as influências das modificações nos tipos de uso e cobertura, envolvendo a agricultura, na hidrologia dos solos na zona não-saturada.

No Brasil, em função da histórica base econômica agrária, muitos trabalhos estão voltados às pesquisas de interesses no controle de impactos que afetem a produtividade agrícola e na comparação das práticas de manejo (SOUZA et al, 2004; SILVA et al, 2005; ZIMMERMANN et al, 2006). Em geral, essas pesquisas estão concentradas em áreas de grande escala produtiva em terrenos planos, onde se concentram também os centros de excelência em pesquisas agropecuárias do país.

Trabalhos em ambientes serranos e de encostas declivosas são raros. Os desenvolvidos para tais ambientes, como encontrado em SOUZA (2003), BERTOLINO (2004) e MIRANDA (2006), estão limitados a atividades de manejo e fins agrícolas. Pesquisa no campo da hidrologia dos solos em topografia forte acidentada pode ser de grande valia, pois nesses ambientes os impactos nos solos, como a erosão pela água, ou a poluição e escassez hídrica, podem ser agravados pelos dos condicionantes geomorfológicos. Dentro dessa premissa, as bacias hidrográficas em ambientes serranos do Rio de Janeiro, seriam alvo desses impactos, uma vez que se acentua a substituição da cobertura florestal por atividades comerciais, de agricultura e pastagem, e a expansão urbana, sendo esta de maior expressão. Assim, a bacia hidrográfica do Bonfim representa o processo ocorrido na região serrana, pois, reúne os tipos de uso e cobertura predominantes na área, de forma bem compartimentada, conferindo a condição de bacia experimental.

Diante da necessidade de melhor interpretar os processos hidrológicos dos ambientes serranos, espera-se com este trabalho, contribuir com a análise do comportamento hidrológico dos solos atentando para a seguinte questão:

- a) Como o tipo de uso e cobertura do solo influencia na dinâmica hidrológica dos solos de ambientes serranos? E ainda, qual é a relação existente entre a presença da cobertura florestal, dinâmica hidrológica no perfil do solo e o volume total de precipitação?

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar as influências na dinâmica hidrológica dos solos, a partir das modificações no tipo de uso cobertura em ambiente serrano, na Bacia Hidrográfica do Bonfim, Estado do Rio de Janeiro. Em termos específicos, para cada tipo de uso e cobertura do solo baseado na cobertura florestada, uso para agricultura e pastagem, objetiva-se:

2.1. Caracterizar as propriedades físicas dos solos no perfil envolvidas nos processo de infiltração da água nos solos;

2.2. Caracterizar as propriedades hídricas sensíveis as mudanças de tipo de uso e cobertura ao longo do perfil dos solos;

2.3. Analisar os fluxos de água no solo por monitoramento contínuo do potencial matricial;

2.4. Interpretar as propriedades físicas e hídricas comparando os diferentes tipos de uso e cobertura;

2.5. Interpretar o monitoramento dos fluxos de água em resposta aos eventos pluviométricos;

2.6. Interpretar a hidrologia dos solos, nos diferentes tipos de uso e cobertura, envolvendo as propriedades físicas, hídricas e o potencial matricial.

O trabalho inicia-se com seguinte hipótese: o tipo de uso e cobertura influencia a hidrologia dos solos na superfície, principalmente no processo de infiltração. No entanto, a geomorfologia sobrepõe ao tipo de uso ao longo do perfil. Para os processos hidrológicos do solo ligados a movimentação vertical dos fluxos, tem-se a ordem floresta, agricultura e pastagem.

### **3 HIDROLOGIA DOS SOLOS: PROCESSOS E FATORES CONDICIONANTES**

Este capítulo se divide em duas partes, a primeira traz abordagem acerca dos conceitos e técnicas que envolvem a dinâmica hidrológica dos solos pautados nos processos de entrada, movimentação e retenção da água no perfil. A segunda trabalha-se com o papel da cobertura vegetal na dinâmica hidrológica dos solos bem como a influencia da sua substituição na alteração das propriedades físico-hídricas e na hidrologia dos solos.

#### **3.1 Hidrologia dos solos: processos de entrada, movimentação e retenção**

##### **3.1.1 Infiltração – entrada de água no solo**

A infiltração é o processo de entrada da água no solo através da superfície (REICHARDT, 1987). Importante e vital etapa do ciclo hidrológico, a ela, é responsável pela disponibilidade da água para plantas e animais, contribuição na recarga dos aquíferos, manutenção dos fluxos nos canais de drenagem em períodos de estiagem e, na evolução da paisagem geomorfológica (DUNNE E LEOPOLD, 1978; REICHARDT, 1987; MANNING, 1992, dentre outros).

Em termos gerais, a entrada da água no solo se faz de forma desacelerada, começando com velocidade alta, decrescendo gradativamente ao longo do tempo até atingir o equilíbrio dinâmico. Nessas condições de equilíbrio, quando a velocidade de infiltração praticamente não varia com o tempo, um valor constante é assumido denominando-se de infiltração básica (REICHARDT, 1987). A taxa de infiltração básica (TIB) é representada pelo nível de água infiltrados no solo com relação ao tempo (mm/h, cm/h ou cm/s) depois que este se torna estável.

Quando a absorção da água pelo solo chega ao limite máximo é então, atingida a capacidade de infiltração do solo (DUNNE E LEOPOLD, 1978; HEWLETT, 1982). A relação da taxa de infiltração com a capacidade de infiltração

é feita sobre três diferentes respostas do solo diante de eventos pluviométricos. Se a taxa de precipitação for maior que a capacidade de infiltração, toda água que atingirá a superfície se infiltrará. Se a precipitação for maior que a taxa de infiltração mas, no instante inicial do evento o solo estiver mais seco, parte dessa água precipitada se infiltrará. E por fim, se a precipitação for maior que a capacidade de infiltração inicial, imediatamente a água escoará sobre a superfície. DUNNE E LEOPOLD (1978), FETTER (1994). Na Figura 1, os três momentos da relação precipitação-capacidade de infiltração são ilustrados pelo comportamento dos gráficos.

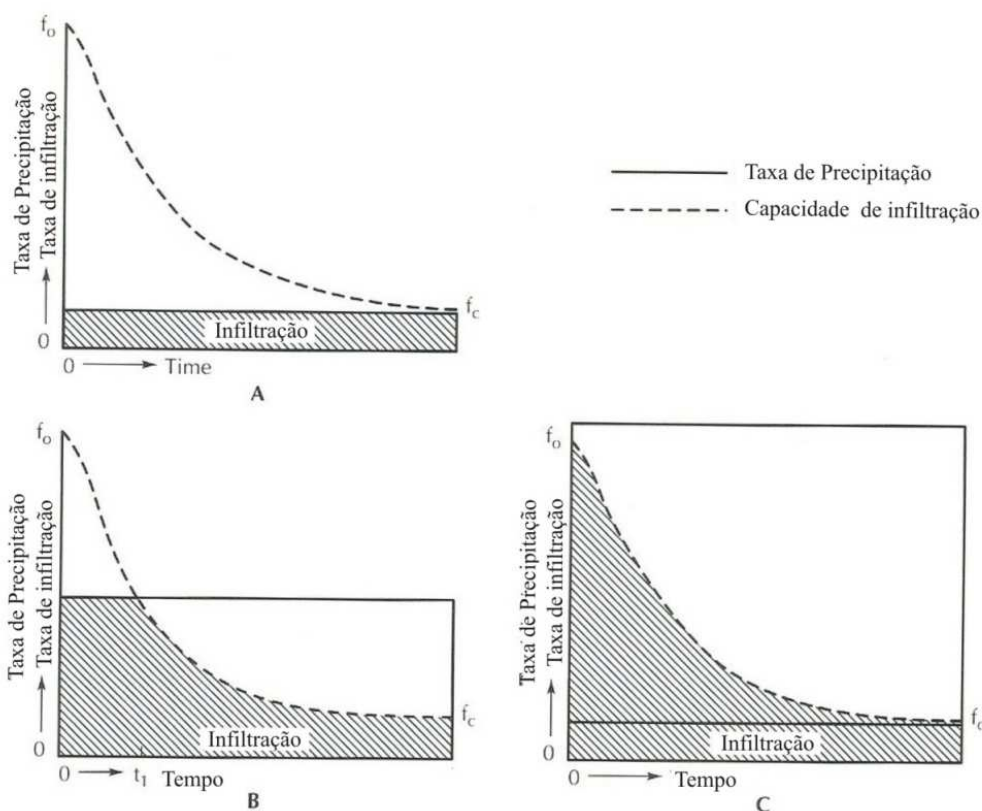


Figura 1: Relação capacidade de infiltração e taxa de precipitação ao longo do tempo. A) Taxa de infiltração menor que capacidade de infiltração. B) taxa de precipitação maior que a capacidade de infiltração mas menor que capacidade de infiltração inicial. C) taxa de precipitação maior que taxa de capacidade de infiltração inicial. Modificado de FETTER (1994)

A configuração do modelo apresentado na Figura 01 está condicionada aos elementos que controlam a infiltração, denominados de variáveis-controle, sendo

estes: as características da precipitação, propriedades físicas dos solos, condições de superfície, uso e cobertura e umidade antecedente (HEWLETT, 1992; SILVEIRA *et al*, 1993; COELHO-NETTO, 1998; dentre outros).

Exemplo do comportamento da infiltração em função do controle das variáveis-controle pode ser encontrado em REICHARDT (1987), quando o mesmo elabora a curva de infiltração de dois solos com frações granulométricas distintas, um arenoso e outro argiloso (Figura 2). No solo arenoso, a infiltração inicial atinge rapidamente a taxa básica de infiltração, tornando-se constante através do  $K_{01}$  e com boa drenagem ao longo do gráfico. Já o solo argiloso, a taxa de infiltração básica sofre um atraso, se comparado ao arenoso, tendendo a valores próximos a zero, o que não se verifica em  $K_{01}$ .

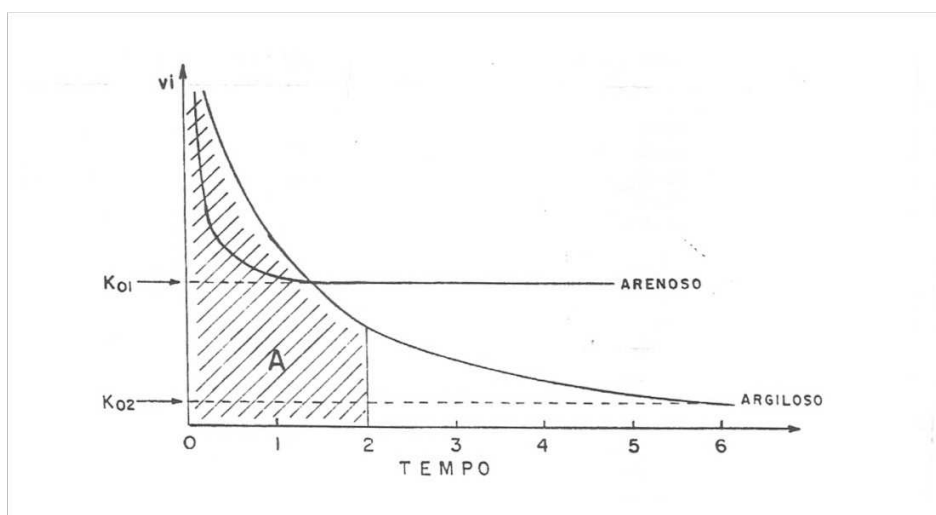


Figura 2: curva de infiltração de um solo arenoso e outro argiloso. Adaptado de REICHARDT (1987).

Com base na granulometria de dois solos e a umidade antecedente, ARAÚJO FILHO e RIBEIRO (1996) avaliaram a infiltração de cambissolos argilosos e muito argilosos na Bahia, observando o comportamento similar dos solos argilosos e muito argilosos quando testados em condições secas e úmidas. As taxas foram muito altas, média de 287 mm/h (28,7 cm/h), diferentemente do esperado para solos argilosos, equivalendo ao comportamento de solos de textura mais grosseira. Desta forma, os autores concluíram que, nos estudos de



infiltração, a granulometria não pode ser considerada como parâmetro único para sustentar os resultados. Outros fatores devem ser considerados, como a estrutura e conectividade dos poros, como bem defendido por MESQUITA e MORAES (2004) em testes de dependência da permeabilidade dos solos em relação aos atributos físicos. Os mesmos defenderam a maior participação da estrutura e do arranjo dos poros em detrimento a textura na dinâmica dos fluxos de água no solo.

Com relação à umidade antecedente, ANTONELI e THOMAZ (2009) observaram diferenças nos testes feitos em solos úmidos e secos no Paraná e, em distintos tipos de uso, tais como, florestal, agricultura, erva-mate, reflorestamento, pastagem, capoeira e faxinal. Em todos os tratamentos, a umidade influenciou no tempo de alcance do fluxo constante sendo que, na mata foi a menor influência e a pastagem, ao contrário, maior.

O tipo de uso e cobertura é uma variável-controle bastante representativa pois a vegetação protege o solo do impacto direta da gota da chuva e, dispersa a água que atinge a superfície. O manejo adequado do solo agrícola ou de pastagem pode aumentar a entrada de água com a formação de macroporos que auxiliam o fluxo preferencial, como visto (BACHMAIR et al, 2009) . A ênfase maior desta variável é dada no sub-capítulo 3.2.

Na Figura 3, DUNNE E LEOPOLD (1978) representam as curvas da capacidade de infiltração correlacionando-as a solos de diferentes texturas, distintos sistemas de manejos e, tipos de cobertura.

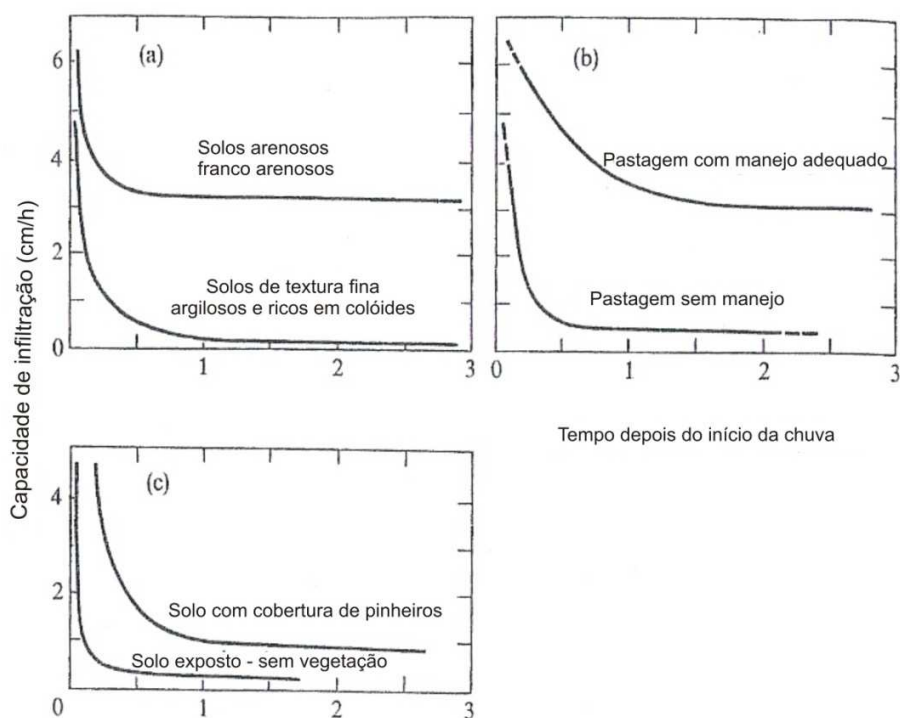


Figura 3: Curva de capacidade de infiltração dos solos com a) diferentes texturas, b) diferentes manejos e mesma cobertura e c) diferentes coberturas. Modificado de DUNNE e LEOPOLD (1978) *apud* STRALHER (1975).

Em escala de bacia hidrográfica, a mudança de uso e cobertura altera o sistema de resposta dos canais de drenagem em detrimento a redução da infiltração e aumento do escoamento superficial. Esse comportamento é registrado nos picos das hidrógrafas que, com a mudança na cobertura, reduz o tempo de resposta do canal submetido aos intensos volumes de chuva. NEWSON (1996) de forma esquemática representa abaixo da ilustração dois gráficos de vazão, um sem alterações de uso, somente com fluxo extra, pelo aumento normal da vazão sazonal e, outro, com picos acentuados e de rápida resposta após mudança na cobertura (Figura 4).

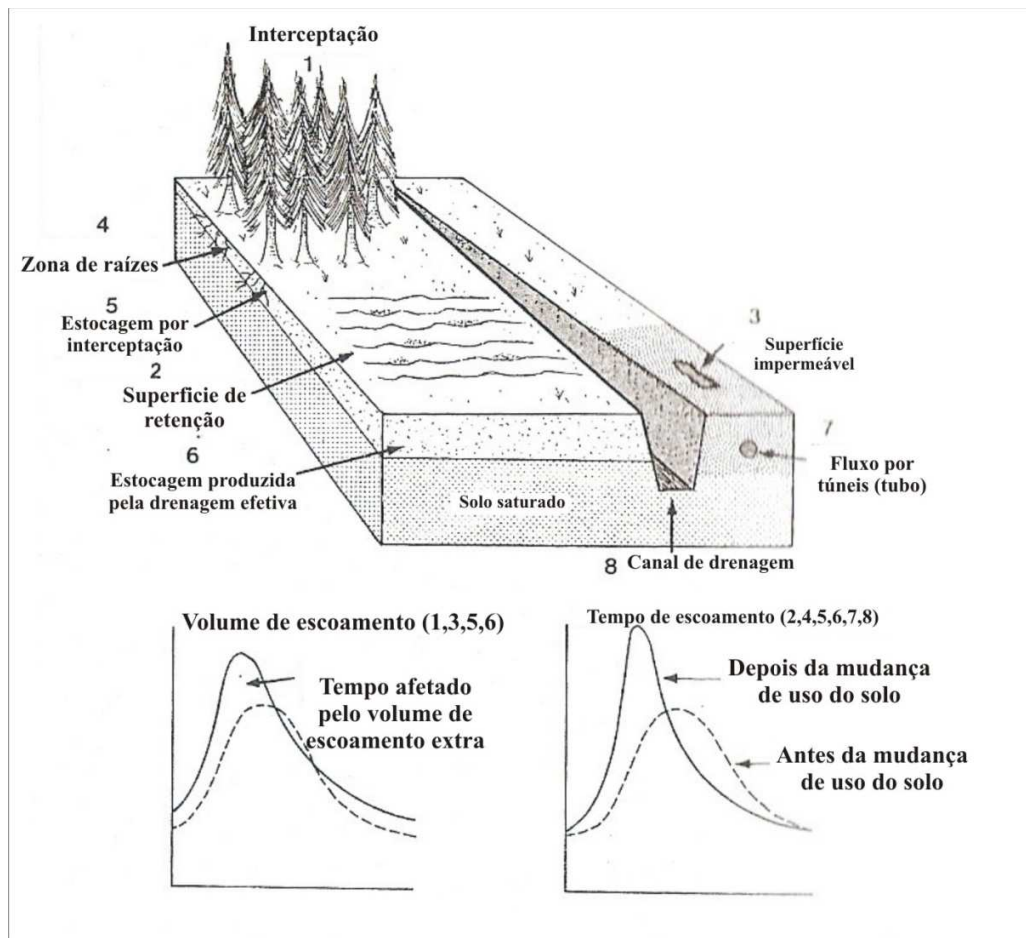


Figura 4: Representação dos picos de vazão e dos elementos da paisagem envolvidos. Modificado de NEWSON (1996).

Historicamente, os trabalhos de infiltração são amplamente empregados para fins agrícolas, auxiliando no manejo de solos agrícolas e planejamento da irrigação, (VIEIRA et al, 1981; WANG et al, 2006) e também para prevenção da erosão, que provoca prejuízo aos processos produtivos (ROTH, 2004; ARAÚJO FILHO e RIBEIRO, 1996; ANTONELI e THOMAZ, 2009).

No entanto, a infiltração tem despertado interesse de diferentes campos das Ciências Ambientais, da Terra e Engenharias que se voltam para questões como a produção de água, fluxo de contaminantes no solo, evolução da paisagem, dinâmica da água nas encostas e bacias, previsão de escorregamentos, dentre outros fatores.

Nas últimas décadas, a Hidrologia tem caminhado junto à evolução tecnológica na busca de novos métodos (tanto na modelagem quanto nas técnicas de campo) e abordagem que englobam a redução de tempo, custos e erros, melhorando a acurácia dos dados (SIDLE, 2006).

Paralelamente, esforços na linha dos trabalhos de campo são feitos para melhorar a eficiência das pesquisas, como em BODHINAYAKE et al (2004) que compararam dois instrumentos de campo que atuam com o mesmo processo, para verificar a estimativa de ambos na produção de dados de infiltração. O uso de traçadores, outra técnica bem utilizada, tem sido de grande valia para monitorar a infiltração e o caminho realizado pelos fluídos, relacionados a conectividade dos poros, como visto em LIPSIUS e MOONEY (2006) e MORAIS E BACELLAR (2008).

Métodos indiretos, pelas estimativas da infiltração através de outros atributos do solo são técnicas que estão sendo amplamente utilizadas, principalmente em função da redução de tempo e custos da pesquisa. Exemplos podem ser vistos em SALES et al (1999), que utilizaram a condutividade hidráulica e a densidade do solo para estimar a taxa de infiltração básica ou, PAIXÃO et al (2004) que estimaram a infiltração média através de modelos empíricos (Horton, Kostiaikov e Kostiaikov-Lewis) comparando os resultados obtidos com mensurações em campo experimental. WANG *et al* (2006) buscaram entender a influência da heterogeneidade dos solos e da escala no processo de infiltração, recorrendo às mensurações e simulações da entrada da água pelo modelo Cascade. RIBEIRO et al (2007) estimaram a relação entre porosidade drenagem e condutividade através de diferentes equações empíricas, calibrando com dados de campo, observando que, dentre oito equações testadas, somente uma, teve os menores erros de estimativa, aproximadamente 50% , quando comparado com os dados de campo.

Vale destacar que, a infiltração interage e acontece através da relação de pendência com as variáveis-controle sendo estas vinculadas as condições de

campo. A amostragem ou estimativas por outros atributos podem gerar dados superestimados ou subestimados, pela descaracterização dos processos *in situ*. Outro complicador, é a variabilidade espacial e temporal dada à heterogeneidade dos ambientes, especialmente em áreas tropicais e serranos, tornando um dos permanentes e atuais desafios das pesquisas hidrológicas e geomorfológicas (VIEIRA et al, 1981; WESTERN et al, 2004; SIDLE, 2006, dentre outros).

### **3.1.2 Métodos de obtenção da Taxa de Infiltração Básica**

A mensuração da taxa de infiltração básica (TIB) pode ser feita sob diferentes métodos diretos e indiretos, em campo ou laboratório. Os métodos de campo são mais utilizados em função do controle dos processos que prevalecem *in situ* (HEWLETT, 1982). Dentre eles, destacam-se os infiltrômetros de aspersão ou simuladores de chuva (ROTH et al, 1985), permeâmetros de carga constante (REYNOLDS et al, 1985a), infiltrômetros de tensão ou permeâmetros de disco (POTT e DE MARIA, 2003) e os infiltrômetros de anel (simples e duplo) (REICHARDT, 1987).

Dentre os métodos, o menos dispendioso, simples leitura, de fácil manuseio e transporte e que tem sido amplamente utilizado para estimar a taxa de infiltração básica em diferentes tipos de solos e ambientes, é o infiltrômetro de anel duplo. Este método consiste em dois cilindros concêntricos (medidas variadas) pelos quais são cravados no solo (aproximadamente 10 cm) onde a água é colocada até formar uma lâmina d'água variável entre 2 a 15 cm a qual, tem como finalidade manter o fluxo constante. As medidas são feitas no cilindro interno com uma régua ou bóia graduada que indica a altura de água (cm e mm) sobre o solo por uma determinada unidade de tempo (é o volume/tempo) (DUNNE E LEOPOLD, 1978, REICHARDT, 1987, COELHO NETTO, 1998), Figura 5.

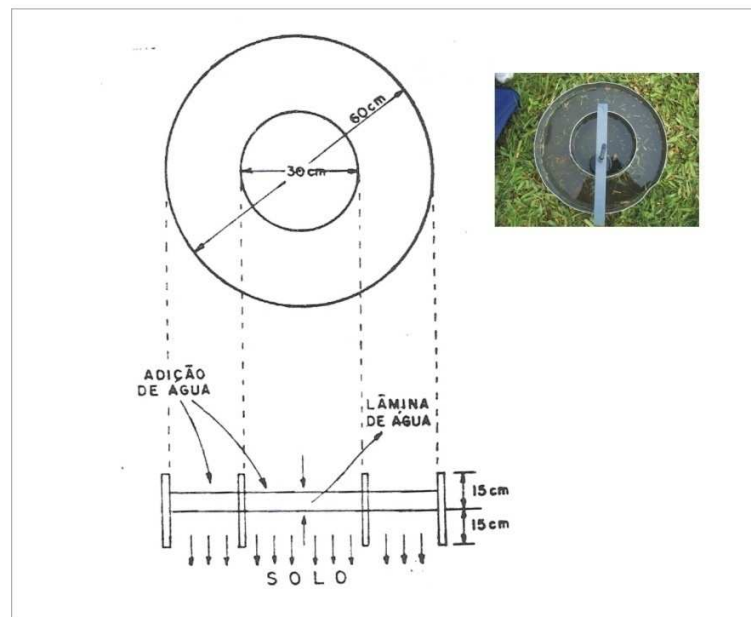


Figura 5: Infiltrômetro de Anel Duplo, dois cilindros concêntricos onde a leitura é feita no interno, a função do externo é saturar o solo ao redor e induzir o fluxo vertical do menor cilindro estimando assim a TIB. Adaptado de [REICHARDT, 1987], fotografia do arquivo pessoal, 2009.

Os dados registrados no equipamento são analisados seguindo a velocidade de infiltração ( $v$ ) onde se tem o volume de água ( $L^3 - cm^3$ ) que infiltra no solo ( $L - cm$ ) por um determinado tempo ( $t$ - seg/min/hora/dia) até alcançar o equilíbrio, resultando  $cm/s$ ,  $cm/min$ ,  $cm/h$  ou  $cm/d$ , podendo ser também registrada em milímetros (Equação 1). Assim temos:

Equação 1: Velocidade de Infiltração

$$V = \frac{h_1 - h_2}{t_2 - t_1}$$

$V$  = Velocidade de infiltração ( $cm/s$ );

$h$  = volume medido no infiltrômetro ( $cm^3$ );

$t$  = tempo (seg).

Os dados quantitativos são classificados qualitativamente através da escala de intensidade do volume infiltrado conforme as características do solo. A infiltração da água no solo pode se alta, média ou baixa, através dos valores considerados por REICHARDT (1987), na tabela 01.

Tabela 1: Valores e Taxa de Infiltração Básica dos solos. Adaptado de [REICHARDT, 1987]

<b>TAXA DE INFILTRAÇÃO BÁSICA</b>	<b>VALOR</b>
Muito alto	> 3 cm/h
Alto	1,5 – 3,0 cm/h
Médio	0,5 – 1,5 cm/h
Baixo	0,5 -0,1 cm/h
Muito baixo	< 0,1 cm/h

O infiltrômetro de anel duplo é instrumento de campo bem empregado para pequenas áreas e uma boa ferramenta para comparar diferentes tipos de uso e cobertura do solo. Os anéis concêntricos elucidam as mudanças dos ambientes através das características dos solos e do tipo de cobertura, transparecendo estas mudanças no comportamento e na taxa de infiltração. No entanto, eles podem superestimar dados em função da formação da coluna de carga constante uma vez que, na natureza, essa condição de concentração de fluxo e formação de carga hidráulica não é realística.

Todavia, deve-se ter ciência das potencialidades e limitações dos instrumentos e adequá-los a realidade das pesquisas de campo. Os instrumentos nos auxiliam na síntese ou estimativa do comportamento dos processos. Além da eficácia e acurácia, a escolha do método deve ser compatível ao objetivo da

pesquisa, as características da área de estudo e o financiamento para o custeio do equipamento. De qualquer forma, mesmo com limitações, as mensurações de campo envolvendo características do meio, devem ser valorizadas dada a natureza relacional dos processos.

### **3.1.3 Fluxo saturado de água no solo: condutividade hidráulica**

A condutividade hidráulica é uma das mais importantes propriedades hídras do solo sendo amplamente utilizada nas equações de fluxos de água e contaminantes no solo. Sinônimo de permeabilidade, a condutividade hidráulica (K) pode ser definida, simplificada, como a habilidade ou facilidade do solo em transmitir água (DUNNE e LEOPOLD, 1978; BRADY E WEIL, 2003, dentre outros). Em condição saturada (poros preenchidos com água), K atinge seu valor máximo, denominada de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), onde o fluxo se propaga de forma constante atingindo as camadas mais profundas do solo (REICHARDT, 1987).

É uma propriedade hídrica bem sensível as perturbações na estrutura dos solos provocadas por práticas de manejo, queimadas e mudanças de uso e cobertura as quais, podem alterar imediatamente a resposta hidrológica dos solos. Pela relação direta com as propriedades físicas do solo, K pode ser considerada como uma variável dependente das propriedades físicas, pela ligação com tamanho das frações granulométricas e principalmente, com arranjo dessas partículas no solo (HILLEL, 1980; JURY e HORTON, 2004).

Tradicionalmente, o estudo de K esteve vinculado à permeabilidade dos materiais, frações granulométricas, que compunham o solo. Desta forma, KLUTE E DIRKSEN (1986) apresentam à distribuição dos valores de K compatíveis as classes texturais do solo com magnitudes que variam entre  $10^1$  para frações mais permeáveis e  $10^{-9}$  cm/s para impermeáveis (Figura 6). Em detalhe, a magnitude de  $10^1$  a  $10^{-3}$  cm/s são atribuídas para cascalhos e areias qualificados como alta e média condutividade hidráulica, respectivamente. As magnitudes de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$



cm/s representam as texturas areia fina, argilo-arenosa, silte, franco-argilosa e argila estruturada, consideradas como baixa e muita baixa condutividade hidráulica. E por fim, entre  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  cm/s estão às argilas homogêneas, consideradas praticamente como impermeáveis.

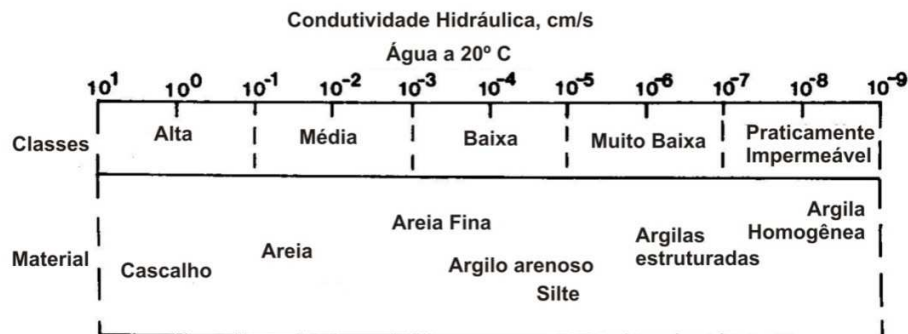


Figura 6: Tabela de classes de condutividade hidráulica conforme a textura do solo. Modificado de KLUTE E DIRKSEN (1986).

Com base na composição textural do solo, a movimentação da água no perfil será mais rápida em solos arenosos, média a alta condutividade, em detrimento aos argilosos, considerados como baixa. Esse exemplo é ilustrado na Figura 7 mostrando que, no solo franco-arenoso a frente de molhamento atingiu a profundidade de 180 centímetros com aproximadamente 24 horas de antecedência, quando comparado ao solo franco-argiloso.

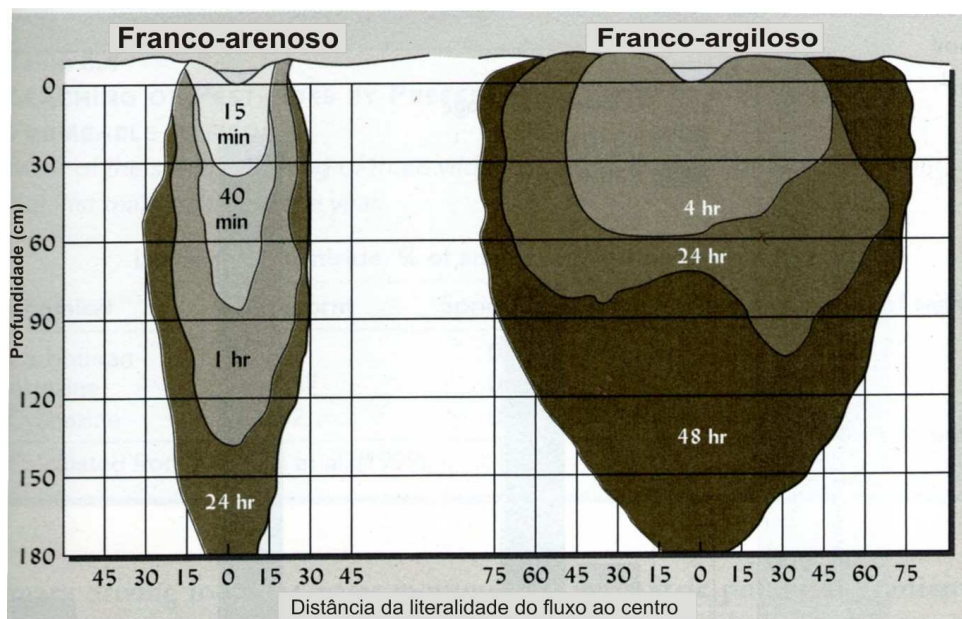


Figura 7: Fluxos de água no perfil em dois solos, franco-arenoso e franco-argiloso com relação a profundidade do solo e a lateralidade. Fonte: modificado de BRADY E WEIL (2010).

Por outro lado, na mesma Figura 7, aparece como destaque o movimento lateral mais representativo no solo franco-argiloso quando comparado ao franco-arenoso que teve seu movimento na descendente, vertical. O fluxo horizontal (lateral) é feito por diferença de potencial total onde a água flui de uma área de maior potencial para outra de menor por meio da atração capilar entre as partículas do solo (HILLEL, 1980; MANNING, 1982; REICHARDT, 1987 e outros).

Embora os valores de  $K$  estejam classificados conforme as frações granulométricas, a textura por si só não representa na íntegra o comportamento dos solos nos fluxos de água, como na infiltração. Relacionando diretamente a condutividade hidráulica, VIEIRA et al (1988) e REYNOLDS e ZEBCHUK (1996) MESQUITA e MORAES (2004), dentre outros, atribuíram o comportamento de  $K$  a estruturação dos solos, especialmente quando se trata das frações mais finas VIEIRA et al (1988).

A relação da classe textura com  $K$  nos auxilia a levantar hipóteses acerca do comportamento dos solos na dinâmica dos fluxos, mas, a condutividade

hidráulica é uma propriedade de grande complexidade resultando em variabilidade espacial, tanto horizontal de um ponto de ensaio para outro (SCHOENEBERGER et al, 1995), quanto vertical, seguindo o perfil (VIEIRA e FERNANDES, 2004); e ainda temporal, principalmente quando relacionada a atividades de manejo GENERAUX et al (2008).

Dada sensibilidade as mudanças no ambiente, inúmeros trabalhos no campo das ciências agronômicas têm recorrido aos dados de condutividade hidráulica para qualificar ambientes alterados dando respaldo às práticas de manejo para aumentar a produtividade e evitar impactos, como erosão dos solos. De tal modo, SILVA et al (2005) avaliaram, a condutividade hidráulica de diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar (sequeiro, vinhaça e irrigação) junto a área florestada como condição original, observando redução na  $K_{sat}$  entre os sistemas de manejo e a floresta, dada a compactação do solo. Porém, na comparação entre os sistemas de manejo, não foram encontradas alterações significativas, não comprovando, para esta variável, eficácia entre os diferentes manejos.

Em contrapartida, KLEIN e LIBARDI (2002) avaliaram a  $K_{sat}$  em solos com plantio direto irrigado, plantio direto sem irrigação e área florestal, através de métodos de campo e laboratório. Os autores constataram que, a influência do manejo se estendeu até 40 centímetros do perfil e, entre os sistemas, o de maior condutividade foi o plantio direto irrigado. Os autores combinaram técnicas de campo e laboratório observando maior representatividade dos dados quando avaliados em campo.

Com relação aos efeitos do manejo, BERTOLINO (2004) verificou redução no espaço poral dos solos arados conduzindo a formação de camada de impedimento (crosta) a 20 centímetros da superfície. Essa camada redistribui os fluxos saturados por lateralidade podendo reduzir a capacidade de infiltração na superfície, desencadeando a erosão hídrica dos solos.

Não somente por questões de manejo, MALAN ISSA et al (2004) testaram dois solos sendo que, em um deles, foi verificada camada de impedimento gerada pela mudança abrupta de textura por processo de eluviação da argila. Diferente do encrostamento formado por ação antrópica pelo uso de máquinas (arado), o de ordem natural foi visto a partir de 40 cm da superfície onde foi verificada redução em 40 cm, conforme esperado. A mudança abrupta de gradiente textural com concentração de frações finas (argila, principalmente) e conseqüente redução da condutividade nesta camada, pode potencializar a saturação da porção superior, reduzir o atrito dada a descontinuidade hidráulica, ativando os movimentos de massa em eventos extremos de precipitações, VIEIRA (2001)

Com relação os fluxos de água no solo, muitos estudos desenvolvidos em bacias florestadas têm relacionado à contribuição dos macroporos, formados a partir da biogenia do solo, aos maiores valores de K, mostrando a participação das florestas na redução do escoamento superficial, como em BUTLE e HOUSE (1997), ARYA et al (1998), JORDAN et al, 2008; LIN e ZHOU (2008). No entanto, no trabalho de WAHL et al (2003), os autores atribuíram valores baixos de condutividade em florestas de pinheiros na Alemanha sobre solos arenosos, em formação do caráter hidrofóbico das folhas de *pinus* que potencializam o escoamento superficial, reduzindo a infiltração. Em outro artigo, WAHL et al (2005) relaciona o caráter da *hidrofobicidade* das florestas de pinheiros a transformação da matéria orgânica que não beneficiou a formação de agregados e macroporos, reduzindo a infiltração. A condutividade hidráulica em 20 cm foi maior, em função da matriz arenosa dos solos.

Acrescido ao comportamento da permeabilidade na interface com a cobertura vegetal, a influências do relevo, da topografia e das características intrínsecas do perfil de solo são outros elementos que contribuem para a explicação da variabilidade espacial de k. Assim, WANG et al (2008) estudaram a topografia e o perfil do solo para fins de melhor contribuição da paisagem para recarga do aquífero em regiões semi-áridas. O emprego da  $K_{sat}$  possibilitou

verificar que há aumento dos valores conforme o aumento da profundidade do perfil (estudado até 100 cm) e, na topografia, os maiores valores foram encontrados nas áreas de topo das encostas. Já WEST et al (2008) verificou que, em Piedmont (EUA), a relação de  $k$  com o perfil do solo e suas características intrínsecas como material parental, estrutura pedogenética, composição mineral e grau de desenvolvimento do solo foram mais representativos nos valores de  $K$  com relação topografia. Sobre este dado, cabe considerar que, a topografia desta região é classificada como suave ondulada, com baixa declividade (4 a 10%), o que pode ter conduzido a maior participação dos aspectos pedológicos em detrimento aos geomorfológicos.

Dada a combinação de elementos para se caracterizar a condutividade hidráulica, torna-se cada vez mais importante a sua identificação em sintonia com o ambiente de ocorrência dos processos. O fluxo no solo ocorre em todas as direções, por isso, quando se extrai a amostra de solo em anel, além de isolá-la dos processos e relações de campo, os ensaios laboratoriais traduzem o comportamento vertical da condutividade, podendo induzir sérios erros e extrapolações equivocadas (REINOLDS e ELRICK, 1985; RUPP et al, 2004; RIBEIRO et al, 2007). Várias técnicas são testadas visando o aprimoramento da pesquisa de campo e, com isso, a valorização da mesma em meio à propulsão tecnológica com sofisticação dos modelos.

#### **3.1.4 Métodos de obtenção da Condutividade Hidráulica Saturada**

Como  $K_{sat}$  é uma propriedade física complexa e espacialmente muito variável, os métodos existentes buscam minimizar erros, custos, tempo de execução e estão sempre em constante aperfeiçoamento. VIEIRA (2001) apresenta uma tabela completa de métodos de obtenção de  $K_{sat}$  especificando as vantagens e desvantagens de cada um.

Acerca dos métodos em laboratório, estes são realizados com amostras de solo extraídas do ambiente por anéis cilíndricos de aço, amostras indeformadas,

onde são realizadas as mensurações da condutividade hidráulica. No trabalho de JANSEN et al (1987) foi aplicado este método com intuito de avaliar a condutividade não-saturada de amostras de solos sob diferentes estágios de sucessão florestal. PAIGE E HILLEL (1993) avaliaram para uma mesma área, três métodos distintos de estimativa de  $K_{sat}$ , dois baseados na obtenção de dados de campo, e um em laboratório observando que os dados de campo tiveram três a quatro ordens menores que os de laboratório, em solos bem drenados.

Dentre os métodos de campo, destacam-se os que utilizam o princípio do fluxo contínuo, como o furo de trado (poço) (BARRETO et al, 2001) o poço seco utilizado por PERREIRA et al (2001) e ainda o Permeâmetro de carga constante, , denominado de Permeâmetro de Guelph, por REYNOLDS e ELRICK (1985), seus inventores. Este último método, segundo VIEIRA (2001) tem dentre algumas vantagens, as de medir simultaneamente outros parâmetros hidráulicos do solo (como a sorptividade), permitir medidas em grandes profundidades, ter baixo custo quando comparado aos outros, ser portátil, utilizar pouca água, ser operado por uma única pessoa e causar perturbações mínimas no solo.

O desenvolvimento do método e do instrumento levou a uma série de publicações que reforçam o uso do equipamento para obtenção dos dados de condutividade inicialmente (REYNOLDS et al, 1983); em seguida a extensão para análise da capilaridade com potencial matricial (REYNOLDS et al, 1985a) e depois, a sorptividade e Parâmetro  $\alpha$  (alfa) (REYNOLDS et al, 1985b).

O aparelho, Figura 8, contém basicamente uma garrafa de mariotte que tem como finalidade controlar o nível constante da carga aplicada, um tubo de acrílico graduado onde recebe e controla a água e um tripé de sustentação. Na parte inferior do tubo de acrílico, a água é distribuída de uma ponta perfurada para saída da água do permeâmetro durante o ensaio (REYNOLDS e ELRICK, 1983;1985)

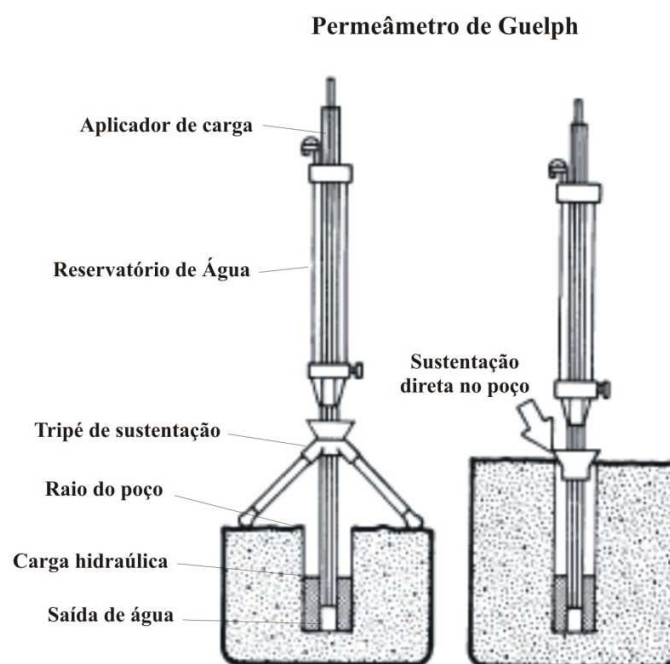


Figura 8: Utilização do Permeâmetro de Guelph, adaptado de Soil Moisture Equipaments, INC. (capturado em 06/2008)

O funcionamento consiste na abertura de um poço de raio ( $a$ ) e profundidade desejada, onde o permeâmetro é encaixado. Após posicionamento e sustentação, o reservatório é preenchido com água e então, se aplicada uma carga hidráulica ( $H$ ) de onde a água flui através dos intervalos constantes de tempo ( $t$ ) e de caimento ( $R$ ), que passam por uma determinada área transversal ( $A$ ). Após a formação de um bulbo saturado em volta do poço (Figura 9) o fluxo começará a ficar constante e após anotação de quatro repetições consecutivas da vazão ( $Q = \Delta R / \Delta t$ ) pode-se calcular os valores de  $K_{sat}$  nas fórmulas descritas por (REYNOLDS E ELRICK, 1985a; b; ELRICK *et al.*, 1989).

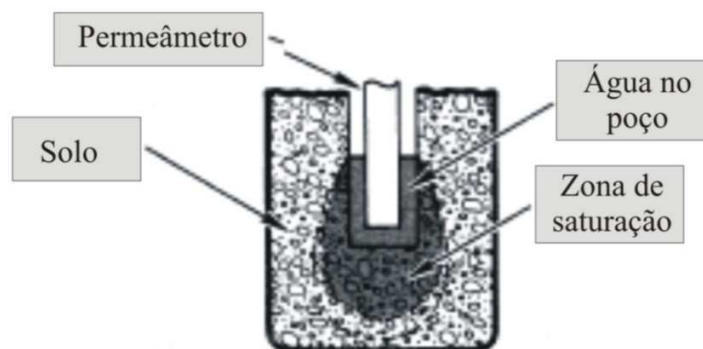


Figura 9: Formação do Bulbo de saturação no contato entre o poço com a carga hidráulica e o solo, modificado de Soil Moisture Equipaments, INC.

No Instituto Agronômico de Campinas através do Pesquisador Doutor Sidney Rosa Vieira, criou-se uma versão nacional do original Permeâmetro de Guelph que funciona sobre os mesmos princípios explicitados acima, mas, no entanto é bem mais prático tanto de manuseio quanto para a montagem. Denominado de Permeâmetro IAC (Instituto Agronômico de Campinas) este instrumento tem sido utilizado pelo presente trabalho (Figura 10).

Cabe ressaltar que, nos ensaios de  $K_{sat}$  *in situ* a formação de uma coluna ou carga hidráulica é condicionada pelo aparelho mantendo a pressão conforme o desejado e objetivado pelo pesquisador. No entanto, embora esteja em condições naturais para a mensuração, essa pressão concentração na carga hidráulica é inexistente, tal como o infiltrômetro de anel duplo. A água em condições normais incide diretamente ou é interceptada pela vegetação, mas atinge o solo sem retenção ou formação de coluna infiltrando-se, por isso, na literatura, esse ensaio de campo é conhecido como  $K_{fs}$ , ou seja, condutividade hidráulica saturada de campo.





Figura 10: Permeômetro IAC (Instituto Agronômico de Campinas), utilizado pelo presente trabalho, arquivo pessoal.

A obtenção dos valores absolutos de  $K_{sat}$  é encontrada através do uso das equações desenvolvidas por (ELRICK *et al.*, 1989). Nesta publicação citada, os autores fazem testes para validação da equação que utiliza apenas uma carga hidráulica. Isso garante menor tempo de execução das mensurações e é condizente para ambientes heterogêneos onde os valores, são em sua maior, negativos, quando utilizadas às duas cargas hidráulicas (Método das Equações Simultâneas), como ocorrido em VIEIRA (2001). Tomando como base a heterogeneidade dos solos em ambientes tropicais, agravada na região serrana, este trabalho que utiliza uma carga, desenvolvida por ELRICK *et al* (1989), Equação 2, sendo esta:

Equação 2: Condutividade Hidráulica Saturada de Campo

$$K_{sat} = \frac{CQ}{\left[2\pi H^2 + C\pi a^2 + \left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)\right]}$$

$K_{sat}$  = Condutividade Hidráulica saturada (cm/s)

C = constante de proporcionalidade adimensional

Q = vazão constante (cm<sup>3</sup>/s)

a = raio do furo (cm)

H = Carga constante aplicada (cm)

$\alpha$  = parâmetro de correção do meio poroso (cm/s)

O parâmetro C é um fator de geometria que depende do tipo de solo, microestrutura e macroporos, e da relação H/a (carga/raio do poço) podendo ser determinado de forma quantitativamente Equação 3 ou de forma analítica, Figura 11.

Equação 3: Constante de Proporcionalidade Adimensional

$$C = A \left(\frac{H}{a}\right)^B$$

onde A e B são os parâmetros de ajuste segundo a tabela 02.

Tabela 2: Parâmetros de ajuste A e B, para o cálculo do fator C.

Textura do Solo	A	B
1	0.59822327899	0.647467571
2	0.5939456566	0.6365011232
3	0.5697527087	0.6237229652

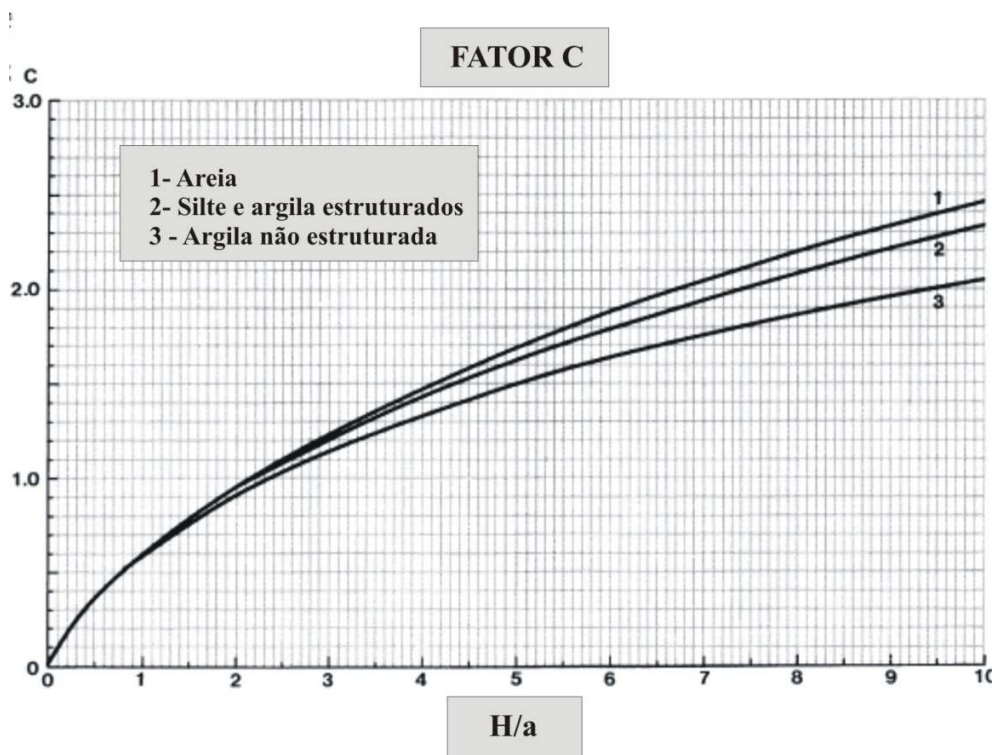


Figura 11: Método Analítico de obter o Fator C para uso na Equação de ELRICH et al (1989)

Em relação ao  $\alpha$ , ele é um parâmetro condizente aos aspectos físicos do solo relacionados com a granulometria e estrutura.

Tabela 3: Categorias de meios porosos para estimativa de  $\alpha^*$  (ELRICK et al. 1989)

<b>Categoria de meios porosos</b>	<b>Valor de <math>\alpha^*</math> (<math>m^{-1}</math>)</b>	<b>Valor de <math>\alpha^*</math> (<math>cm^{-1}</math>)</b>
Materiais argilosos sem estrutura (cobertura de mineração, depósitos marinhos ou lacustres)	1	0,01
Solos de textura fina e sem estrutura	4	0,04
Solos estruturados de argila a franco. Também inclui areais finas e outros meios sem estrutura	12	0,12
Areia grossa e muito grossa. Também inclui solos altamente estruturados com rachaduras e macroporos.	36	0,36

### 3.1.5 Estado de energia da água no solo: características de movimentação e retenção

Quando a água entra no solo, uma porção é estocada nos menores poros, enquanto aquela contida nos macroporos é drenada mais facilmente para o perfil por ação da gravidade (DUNNE e LEOPOLD, 1978; MANNING, 1992). Em solo seco, quando há entrada de água, inicialmente as forças capilares atraem e aprisionam a água nos poros do solo. À medida que o solo torna-se saturado, as forças capilares deixam de atuar sendo substituída pela gravitacional, responsável pela drenagem da água para o perfil, como ilustra a Figura 12, síntese do processo apontado em MANNING (1992).

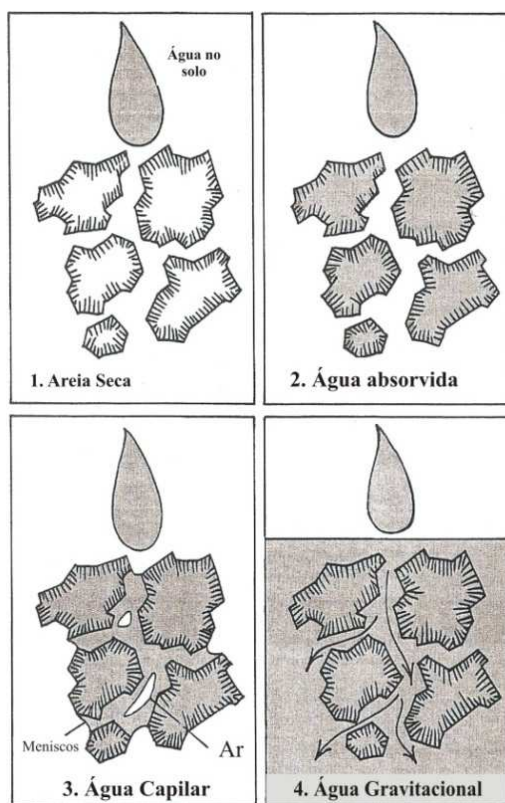


Figura 12: Entrada da água em areia seca (1), água é absorvida (2) e se desloca por força capilar (3). Finalmente, quando o solo atinge a saturação, a água flui através dos poros por força gravitacional. Adaptado de (MANNING, 1982)

A água no solo pode conter energia em diferentes quantidade e formas (HILLEL, 1980). Correlacionando as duas principais formas de energia e o movimento da água no solo, pode-se afirmar que, a energia cinética para este processo é nula, em função da baixa velocidade de locomoção dos fluídos no solo (HILLEL, 1980). Em detrimento a cinética, a energia potencial, que é aquela que o corpo possui em virtude de sua posição em campos de forças, é a que de fato contribui para essa movimentação (HILLEL, 1980; REICHARDT, 1987; BRADY e WEIL, 2003).

Para definir os estados de energia da água no solo, é necessário envolver diferentes campos de forças responsáveis pelos fenômenos ligados a interação entre a matriz do solo e água, sendo estas: força da gravidade ( $\Psi_g$ , potencial gravitacional), da atração da matriz do solo pela água ( $\Psi_m$ , potencial matricial), da presença de solos ( $\Psi_o$  –potencial osmótico) e de outros de menor importância (HILLEL, 1980, RICHARDT, 1987, LIBARDI, 1995). A soma dessas forças constitui o potencial total do solo ( $\Psi_t$ ).

A estocagem de água no solo ocorre quando existe uma força de retenção contra a gravidade (KNAPP, 1978). Assim, para a movimentação e retenção o potencial matricial e o gravitacional podem ser considerados como mais atuantes, podendo ser isolados.

A água é retida no solo por forças de atração bastante elevadas estabelecidas entre as moléculas de água e as partículas do solo. Nos poros mais estreitos, a retenção pode ser maior devido à atuação das forças de capilaridade e adsorção da matriz dos solos, as quais se interagem formando o potencial de pressão negativa (tensão ou sucção) entre as partículas do solo (HILLEL, 1980).

Na interface entre solo-água exercida pela força de adesão é gerada uma superfície de tensão também conhecida como menisco. Os meniscos apresentam-se como uma curvatura dada ao contato água-ar e é tanto maior quanto menor for o poro, sendo que, esta curvatura determina o estado de energia da água

(REICHARDT, 1987). Exemplo pode ser representado pela atração entre a superfície de um tubo de vidro com o líquido do recipiente. O contato entre a superfície sólida (tubo) e o líquido é tanto maior quanto menor for o diâmetro do tubo, assim como no solo; poros menores exercem força de adesão maior que os macroporos, que são mais drenáveis, Figura 13.

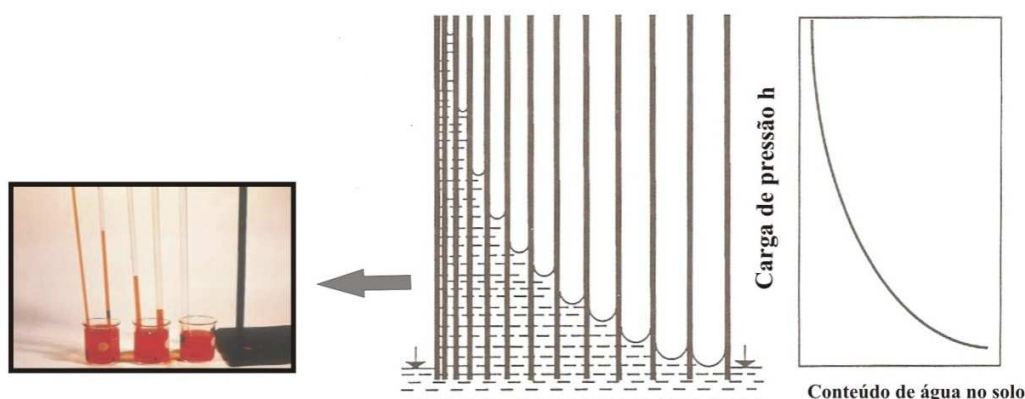


Figura 13: Ação da força capilar, ascensão nos tubos ilustrados no esquema e fotografia. Adaptada de [Kutílek and NIELSEN, 1994], fotografia de Van Genuchten (2008), notas de aula.

Através destes fatores, pode-se afirmar que, a água se movimenta de um ponto com maior energia para outro de menor, buscando o equilíbrio do sistema. A energia, depois da umidade, pode ser considerada como importante característica no solo (REICHARDT, 1987).

Tratando especificamente do potencial matricial ( $\Psi_m$ ), responsável pela capilaridade e adsorção, é influenciado pelas características das propriedades físicas dos solos como textura e principalmente do arranjo poroso na distribuição do tamanho dos poros. Em solos saturados, a energia é nula, logo, o potencial matricial é também nulo ( $\Psi_m = 0$ ), não havendo interface água-ar, pois os poros estarão todos preenchidos com água. Após a drenagem, o ar volta a atuar nos poros, gerando a interface água-ar, e a capilaridade começa atuar. Quanto mais

seco o solo, mais negativa é a energia, mais negativo o potencial matricial ( $\Psi_m \neq 0$ ) (HILLEL, 1980).

A associação entre a umidade do solo e o potencial matricial se faz pelos valores inversos, ou seja, quanto maior a umidade do solo (condições de saturação), menor é a energia da matriz, o potencial matricial. Quanto menor a umidade (solos secos) maior é a energia realizada pela matriz do solo para reter água, maior o potencial matricial.

Estudos do potencial matricial são extremamente importantes para o suprimento de água para plantas, aplicações de engenharia e, nos estudos da dinâmica hidrológica pelo monitoramento da trajetória da água no perfil bem como, a sua resposta frente aos eventos pluviométricos.

### **3.1.6 Monitoramento Potencial Matricial**

O instrumento utilizado com frequência para aferir o potencial matricial do solo tanto em condições de campo quanto de laboratório, é o tensiômetro. O tensiômetro consiste de uma cápsula porosa, saturada em água, instalada dentro do solo e conectada a um manômetro. Quando instalado (Figura 14), a água do instrumento entra em contato com a água do solo através dos poros da cápsula, e a equilíbrio tende a se estabelecer, ou seja, a tensão é feita do maior potencial para o menor potencial, permitindo assim, o registro da tensão necessária para alcançar o estado de equilíbrio do sistema (FERNANDES *et al.*, 1989; SAAD e LIBARDI, 1992; SOUZA, 2001).

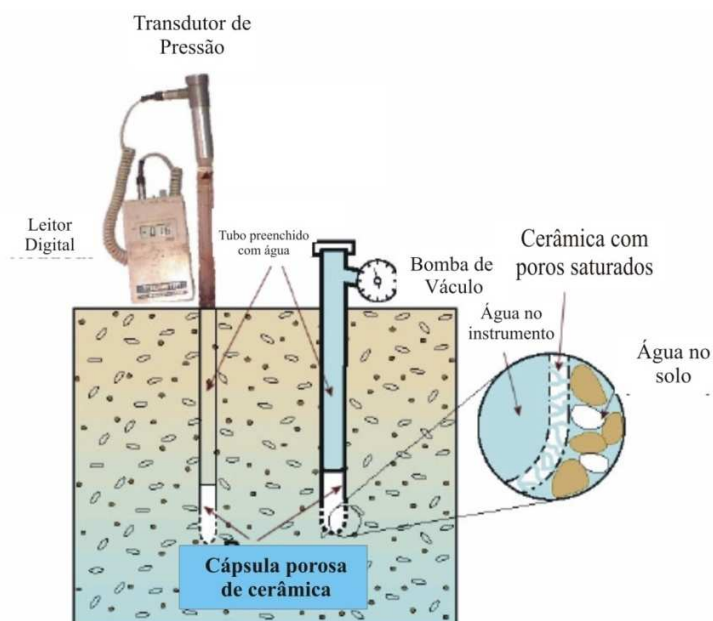


Figura 14: Tensiômetro instalado no solo, contato solo com a cápsula porosa de cerâmica, a água fluindo em direção ao solo não saturado e o registro ou na bomba de vácuo ou no leitor digital de mão. Adaptado de [Or et al., 2002]

Uma completa revisão dos tipos de tensiômetros mais utilizados em atividades de pesquisa foi realizada por SOUZA (2001), a qual descreve sobre o funcionamento, vantagens e desvantagens dos tensiômetros de manômetro de mercúrio, automatizado, de equivalência e por fim os sensores de matriz granular, também conhecidos de GMS (sensores de matriz granular), sobre os quais se dará maior ênfase.

Os sensores de matriz granular (GMS) foram desenvolvidos para auxiliar no processo de irrigação e aumentar a produtividade das culturas, a partir do controle indireto da umidade antecedente do solo frente ao processo de irrigação. As leituras do medidor indicam a tensão com que a água encontra-se retidas pelo arranjo das partículas do solo. A leitura é apresentada em cbar (centibar) que equivale a centésima parte de 1 bar. Cada centibar equivale a 1 kPa (kiloPascal) ou aproximadamente 0,1 mca (metro de coluna de água), 10 cmca (centímetro de coluna de água) e em geral, no campo pode ser interpretado como mostra a Tabela 4.



Tabela 4: Interpretação dos valores de GMS

LEITURA (cbar)	INTERPRETAÇÃO
0 – 10	solo próximo da saturação (capacidade de campo). Mais saturado que este valor (valores menores) o solo passa a perder água por drenagem, percolando para camadas mais profundas pela ação da gravidade
10 – 30	solo adequadamente úmido, exceto solos muito arenosos em que acima de 15-20 cbar já indica solo perdendo umidade tornando-se seco
30-60	faixa normalmente encontrada no campo em solos irrigados de textura média a argilosa.
> 60	solo tornando-se muito seco comprometendo desenvolvimento das plantas

Fonte: Adaptado de <http://www.tracom.com.br/lrrometer/pdf/watermark.pdf>

Esses sensores funcionam no mesmo princípio de resistência elétrica dos blocos de gesso e contém uma pastilha de gesso inserida na matriz granular (HILLEL, 2003). Segundo SHOCK (1998) e SHOCK et al (1998) os GMS reduzem os problemas inerentes aos blocos de gesso (utilizadas no tensiômetros) pois os eletrodos são inseridos nestes e envoltos por uma tela de metal para dar suporte ao material, como podemos perceber na Figura 15.

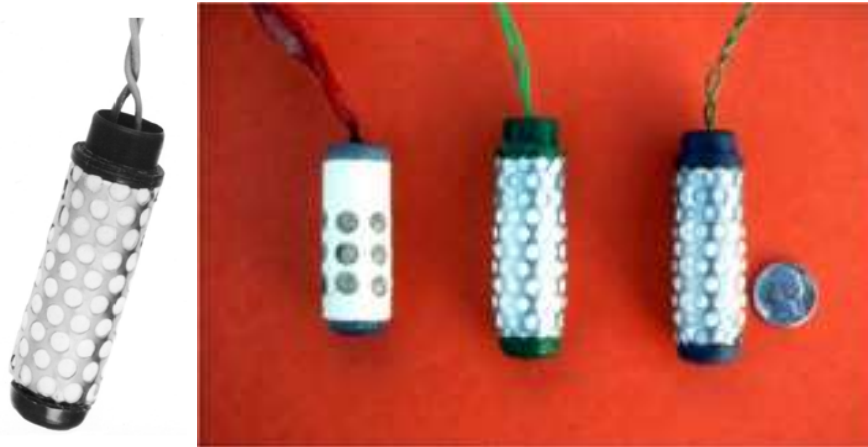


Figura 15: Sensor de Matriz Granular (GMS), cápsula porosa envolta a proteção de metal, à direita, e plástico, à esquerda.

Dentre as vantagens que este instrumento tem em relação aos tensiômetros tradicionais, discutido por BERTOLINO (2004) é que o GMS tem tempo de equilíbrio de minutos contra horas para o tensiômetro comum e com limite de medição de 0 a -200 kPa contra 0 a -80 kPa. Outro ponto positivo mas não exclusivo dos GMS, pode ser dado ao monitoramento automático onde os sensores são acoplados diretamente ao *datalogger*, onde os dados ficam registrados em intervalos de minutos, permitindo assim, menor frequência das atividades de campo, Figura 16.

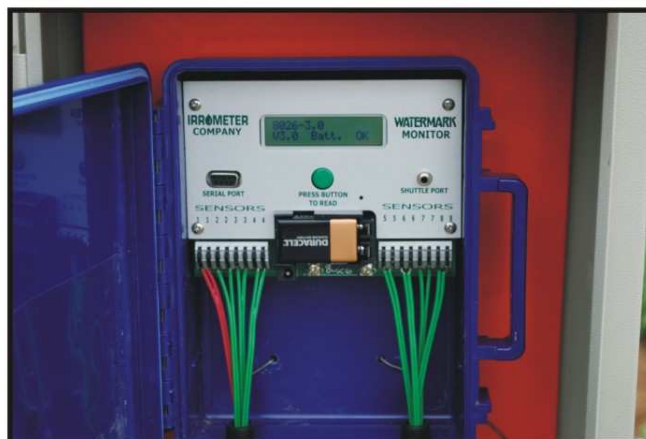


Figura 16: *Datalogger Watermark* modelo 900 capacidade de 8 sensores, 7 de potencial matricial e 1 de temperatura e sensor de matriz granular. Arquivo pessoal.

Poucos trabalhos são encontrados na literatura com relação aos GMS. Tradicionalmente, ainda são bastante difundidos os tensiômetros. Como exemplo, de trabalhos com GMS, BERTOLINO (2004) em sua tese de doutoramento monitorou a umidade do solo em parcelas experimentais sob o sistema sem cobertura, sistema convencional, sistema com utilização de tração animal e sistema de cultivo mínimo, em duas posições na encosta nas profundidades de 15 e 30 cm. A autora utilizou tanto tensiômetros quanto GMS, verificando a semelhança de resultados e bom funcionamento de ambos nas parcelas experimentais e ainda, percebeu que o cultivo mínimo e sistema convencional tiveram maior umidade em relação aos outros manejos.

MENDES et al (2007) apresentaram no Simpósio Brasileiro de Solos Não-saturados, testes realizados em laboratório envolvendo a saturação, instalação e

tempo de resposta dos sensores de matriz granular (GMS), para fins de organização de dados acerca das vantagens e restrições do equipamento comparado ao tensiômetro. Cinco sensores tiveram preparos distintos para instalação, em relação aos períodos de emersão e molhamento, verificando o mesmo comportamento para os sensores. As respostas dos sensores frente a irrigação foi sentida somente 48 depois do evento, levando aos autores a concluir que a resposta dos sensores foi mais retardada que o tensiômetro, porém mais eficiente com pela magnitude dos sensores, ultrapassando valores de 100 kPa.

Torna-se latente a necessidade de maiores e melhores dados e discussões acerca do monitoramento da dinâmica hidrológica realizado com os sensores automatizados (GMS), no intuito de analisar a eficiência dos mesmos e a confiança nos dados gerados. Estes fatores impulsionam a pesquisa para esse desafio.

### **3.2 O papel da cobertura vegetal na dinâmica hidrológica dos solos**

A vegetação funciona como uma capa protetora do solo minimizando os impactos diretos da gota da chuva pela interceptação, dispersando a água que alcança a superfície do solo (DUNNE E LEOPOLD, 1978; MANNING, 1992) e por consequência, atenuando os processos erosivos de encostas (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2008). Além da proteção com a quebra da energia cinética da gota e distribuição dos fluxos, o tipo de cobertura interfere no volume de água disponível para infiltração ativando (*input*) a dinâmica hidrológica dos solos.

Solos sob florestas apresentam uma infiltração de 15 a 25 vezes maior que os solos descobertos (usados em agricultura mecanizada, por exemplo). Nessas áreas infiltração média das águas das chuvas é da ordem de 150 mm/hora e em lavouras mecanizadas ou pastagens de grande lotação a infiltração é da ordem de 6 mm/hora (ROCHA e KURTZ, 2001). Logo, a retirada da vegetação altera significativamente as condições superficiais do solo gerando degradação na qualidade física dos solos.

Uma vez retirada à vegetação, o solo torna-se exposto, facilitando através do contato direto da gota, o salpicamento das suas partículas que, deslocadas podem preencher os macroporos, dificultando a entrada de água no perfil (GUERRA, 1999). Outro agravante pode ser indicado pela compactação uma vez que, solos compactados são mais densos pela redução do espaço poral podendo levar a diminuição considerável da permeabilidade dos solos (DEXTER, 1997; HILLEL, 1982; TROEH e THOMPSON, 2007).

A quebra do ciclo de matéria orgânica na superfície alimentada pela serrapilheira das áreas florestadas, também altera significativamente as condições de superfície infiltração. Não havendo mais fonte para a formação da serrapilheira, a fauna do solo migra ou pode deixar de existir no local em função da retirada de condições favoráveis a sua existência, pelo aumento da temperatura, mudança de pH e redução da umidade (BJÖRN e McCLAUGHERTY, 2003). A falta de serrapilheira conduz duas grandes mudanças na superfície. A primeira, ligada a quebra da difusão lateral e vertical dos fluxos auxiliados pela malha de raízes que se forma sob a serrapilheira COELHO NETTO, (1987). E a segunda, na redução da atividade biogênica na formação de macroporos e dutos (biocavidades) que atuam como verdadeiros condutores de água para o interior do perfil por formação de fluxo preferencial (NEWSOM, 1996).

A síntese dos efeitos da retirada da vegetal para as superfícies e propriedades físicas dos solos é posta por CASANELLAS et al (1994), em um fluxograma voltado ao desencadeamento do processo erosivos dos solos, Figura 17.

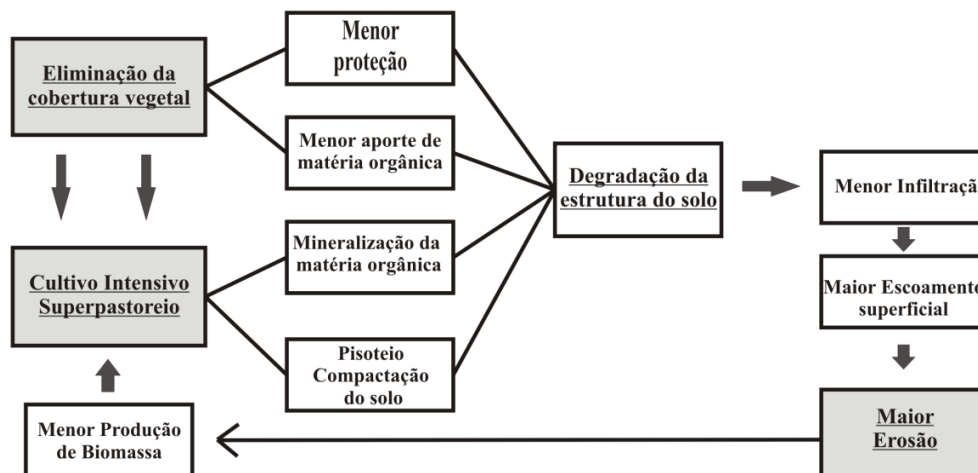


Figura 17: Fluxograma representativo da influência da retirada da cobertura nas propriedades físicas e processos hidrológicos desencadeantes. Modificado de CASANELLAS et al (1994)

No Fluxograma, pode-se observar o início do processo com a retirada da vegetação e mudança de uso do solo para pastagem. O topo do solo torna-se vulnerável à alterações das propriedades físicas pela ausência de proteção e redução do aporte de matéria orgânica. Aumento da compactação, pela exposição às gotas de chuva e pisoteio o que acarreta quebra da estrutura, aumento da densidade do solo e redução da porosidade total. A junção dos fatores resulta na queda da infiltração, aumento do escoamento superficial (processos inversos) podendo incidir em maior erosão hídrica do solo, gerando perda de material nas encostas e acumulação nos leitos dos rios.

Explicitamente, a exposição do solo desencadeia alterações na dinâmica hidrológica dos sistemas tanto local quanto regional. A distância entre as perturbações locais e regionais está no tempo de resposta de cada sistema e na conectividade dos mesmos. Assim, o estudo da dinâmica hidrológica local, (perfil dos solos) pode servir de base a resposta dos processos que ocorrem nas encostas e bacias hidrográficas. Nas últimas décadas, a interação dos ambientes tem sido retratada pela conectividade hidrológica (CAMMERAAT et al, 2002; SANTOS, 2009, dentre outros). A conectividade tem buscado entender e interligar escalas espaciais e temporais através das diferentes abordagens dos processos

hidrológicos e, criando subsídios para compreender a dinâmica das bacias hidrográficas.

Tradicionalmente, trabalhos em hidrologia têm buscado analisar as implicações da substituição da cobertura vegetal, no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas. Neste sentido, CUO *et al* (2008) analisando solos florestados e com clareira aberta por estrada de rodagem, em bacias hidrográficas da Tailândia, constataram que, com relação à vazão total, as duas tiveram volumes totais aproximados, a diferença ficou na distribuição dos fluxos e no aumento da estação seca, na bacia com clareira. Assim, na clareira os picos de vazão sofreram aumento de 3, 12 e 34% conforme a intensidade do evento simbolizando o aumento do escoamento superficial.

Do mesmo modo, LUIJTEN *et al* (2000) compararam diferentes usos em uma pequena bacia na Colômbia Andina, concluindo que, houve aumento da vazão do canal de 14% para terras que deixaram de ter cobertura florestal, 5% para agrícolas e 49% em solo exposto. A dinâmica das bacias hidrográficas com relação à infiltração e escoamento superficial foi verificada através da quantificação da vazão total e dos picos e por simulação de modelos alimentados pelo fluxo de canal e características da bacia, dando uma idéia geral do papel da vegetação. Dados mais específicos do escoamento efetivo nas encostas, não foram abordados.

Ao contrário, estudo feito por TIAN *et al* (2008), sobre a participação das fases de crescimento do pinheiro chinês em uma bacia reflorestada. Para avaliar a influencia deste tipo de vegetação na infiltração x escoamento superficial, os autores monitoraram 25 anos de crescimento da espécie e sua implicação na infiltração (análise da umidade e permeabilidade) e escoamento superficial (controle de encosta e no canal). Nas áreas de pinheiros, o aumento do volume de infiltração foi notificado somente após 20 anos de revegetação; entre 15 a 20 anos, os dados de escoamento foram maiores em função da mudança estrutural da espécie, intensificando a *hidrofobicidade*.

No Brasil, seguindo os efeitos do reflorestamento na dinâmica hidrológica, JANSEN et al (1987) avaliando as propriedades físicas e a permeabilidade da água no solo em diferentes estágios de recuperação de reserva de mata atlântica (10, 25, 150 e 250 anos de recuperação) pode perceber que, a qualidade das propriedades físicas do solo na mata de 25 anos era próxima das áreas de 150 e 250 anos, supostamente de sucessão.

É interessante destacar que, tanto em áreas de silvicultura, como na China quanto, em mata atlântica, a recuperação das propriedades com aumento da infiltração foi notificado após 20 e 25 anos. No entanto, uma vez retirada à vegetação, as alterações são instantâneas. E é justamente por representar esta instantaneidade que as propriedades físicas e hídricas do solo são amplamente utilizadas para qualificar ambientes e entender os processos.

Muitos trabalhos hidrologia, em escala de perfil, propõem-se entender a movimentação dos fluxos de água entre as partículas do solo e ao longo do perfil correlacionando os efeitos da cobertura e do tipo de manejo aplicado. Duas vertentes para esta escala são apontadas, aquela onde os trabalhos possuem um viés agrícola, na qualidade das propriedades físicas dos solos para aumento da produtividade (DEXTER, 1997; SOUZA et al, 2004; BERTOLINO, 2004; ABU-HAMDEK et al, 2006; NDIAYE et al, 2007; SO et al, 2008 e muitos outros); e aquela voltada para hidrologia e suas relações com paisagem, controlando o caminho e interação da água na paisagem (GODSEY e ELSENBEER, 2002; PARK e VAN DE GIESEN, 2004; RIBEIRO et al, 2007; HAYASHI et al, 2006, dentre outros).

Com relação a influencia do manejo, SO et al (2008) comparando o impacto de 14 anos de solos com manejo convencional e solos sem manejo através das propriedades físicas puderam denotar que, nos três primeiros anos, os solos com manejo e sem manejo não tiveram bruscas alterações nem na porosidade nem na condutividade hidráulica. No entanto, passados 14 anos, os solos com manejo apresentaram redução nas taxas de infiltração, compactação e redução de matéria



orgânica. Comportamento contrário foi observado por LIPIEC et al (2006) que constataram que em 6 anos, o manejo convencional melhorou a qualidade das propriedades físico-hídricas dos solos em relação a áreas sem manejo.

O manejo altera as propriedades físicas, há curto prazo pode apresentar melhora, principalmente pela aeração. No entanto, como defende CAVALIERI et al (2009), a longo prazo, o uso de máquinas e o revolvimento do solo podem formar crostas no pé de arado, camada de impedimento, alterando a percolação da água no perfil, como foi verificado por BERTOLINO (2004) notificando a camada de impedimento de 11 a 20 cm no plantio direto.

Trabalhando com diferentes sistemas, SOUZA et al (2004), em campo experimental na Amazônia, verificaram a resposta de uma classe de solos (latossolos) a substituição de cobertura nativa (floresta) para plantações de milho, laranja, pupunha, guaraná, pastagem e capoeira. Sobre os mosaicos, foram recolhidas amostras das camadas superficiais dos solos sendo analisadas propriedades físico-hídricas que, permitiram a verificação do comportamento da infiltração sendo que em ordem crescente, quando comparada à floresta, a capoeira, guaraná, milho, laranja, pupunha e pastagem tiveram maiores valores de densidade e menores de infiltração e aporte de matéria orgânica.

Pesquisas realizadas com ênfase na segunda vertente contemplam a zona vadosa relacionando os fluxos as propriedades e seus comportamentos em diferentes ambientes. Em resposta a mudanças com inserção de agricultura na Amazônia, GODSEY e ELSERBEER (2002), mesma classe de solos que SOUZA et al (2004), concluíram através de ensaios de condutividade hidráulica até ao longo do perfil que, a permeabilidade do solo significativamente alterada nos 10 primeiros centímetros no sentido floresta, agricultura e pastagem. Sendo que a floresta, em superfície possui os maiores valores. No entanto, em 50 cm, a pastagem obteve os maiores valores de condutividade que foram atribuídos a proximidade com o nível freático, faltando correlações mais aprofundadas com o

ambiente e outras avaliações das propriedades físicas que representam a permeabilidade.

GODSEY e ELSENBEER (2002) e SOUZA *et al* (2004), constataram que em superfície a pastagem apresenta menores valores de infiltração e permeabilidade. No entanto, à medida que o solo se distancia da superfície, outros fatores além do papel da vegetação devem ser envolvidos como a profundidade do perfil e topografia, abordada por WANG *et al* (2008).

Correlacionando a formação dos poros dos solos por processos primários (intemperismo) e secundários (interação com vegetação), HAYASHI *et al* (2006), em área de replantio florestal, com classes distintas de solos e posição do relevo, os autores buscaram identificar a relação do processo de reflorestamento com melhora na distribuição dos poros e com isso, aumento da percolação. Após estudo de retenção da água, condutividade, tamanho e conectividade dos poros, verificaram o dobro dos valores de condutividade encontrados nas áreas onde foi encontrada maior presença de poros secundários, na floresta recuperada. Corroborando, BUTLE e HOUSE (1997), testaram a eficiência dos macroporos na permeabilidade de dois solos, um argiloso (na encosta) e outra areia fina (vale), em área de araucária; constando maiores valores nos solos argilosos ativados pela atividade biogênica mais efetiva nas áreas de encosta.

Analisando a infiltração de áreas florestadas em relevo montanhoso, HARDEN e SCRUGGS (2003) em diferentes pontos da América (Porto Rico, Estados Unidos e Equador), constataram que, em florestas tropicais e subtropicais, a taxa de infiltração excedeu ao volume de precipitação simulada, até 60mm, gerando escoamento superficial nulo.

Muitos desafios são colocados, na contemporaneidade, com relação à escala dos processos, a conexão entre os espaços, a quantificação dos sistemas e os métodos aplicados na Hidrologia. Não obstante, a dinâmica hidrológica dos ambientes tropicais em diferentes escalas, tem se torando um grande desafio para

as próximas décadas uma vez que, a carência de dados a respeito do comportamento dos ambientes tem sido incompatível a intensa degradação orientada pela substituição de coberturas. Isso tem comprometido a qualidade e quantidade de solo e água para uso da população.

## 4 A BACIA HIDROGRÁFICA DO BONFIM

A caracterização da Bacia do Bonfim foi feita através dos atributos de localização geográfica e fatores históricos de uso e ocupação do solo. Em seguida é feita a caracterização ambiental envolvendo dados acerca dos fatores climáticos, geológicos, geomorfológicos, pedológicos regionais e locais.

### 4.1 Localização Geográfica e Processo de ocupação da Bacia do Bonfim

A bacia hidrográfica do Bonfim localiza-se na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, nos limites do distrito de Correias no município de Petrópolis. Ela integra uma das sub-bacias do Piabanha, sendo este o principal rio que corta a região, Figura 18.

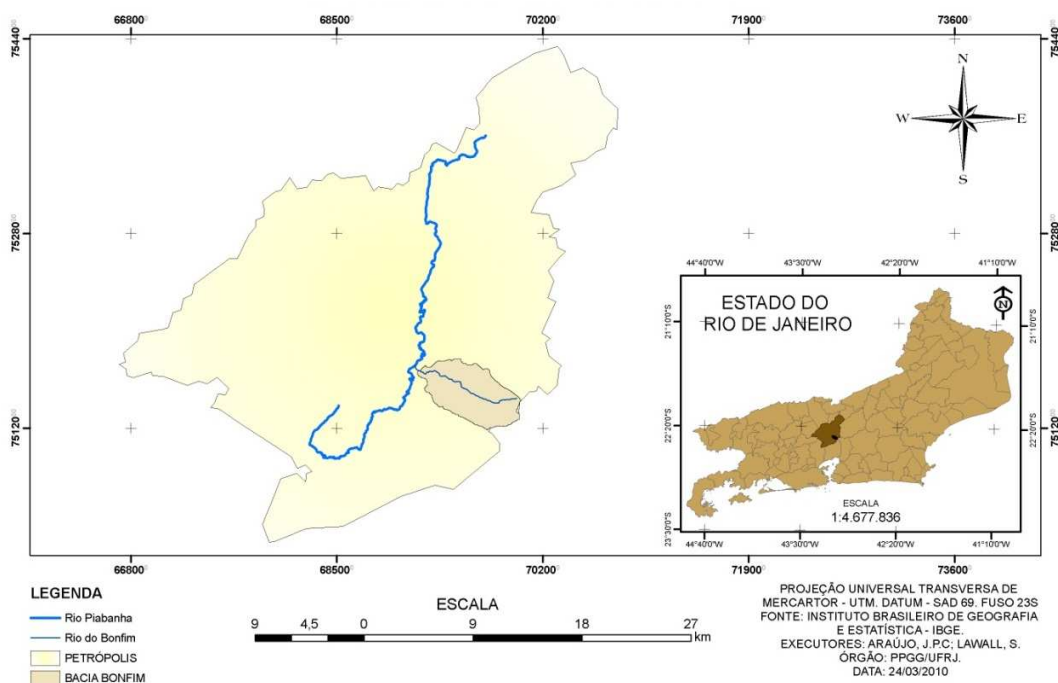


Figura 18: Localização da Bacia do Bonfim no município de Petrópolis e sua posição no Estado do Rio de Janeiro. Produzido por ARAÚJO, J.P.C e LAWALL, S. (2010).

Além da posição geográfica, parte da bacia está situada nos limites do Parque Nacional da Serra dos Orgãos (Parnaso), Unidade de Conservação criada em 1939 com intuito de preservar as nascentes e a Mata Atlântica da região serrana, garantindo a oferta hídrica às cidades do entorno e a preservação de paisagem cênica.

Especificamente, a Unidade de Conservação foi criada em 30 de novembro de 1939 através do Decreto-Lei nº 1822, totalmente em terras particulares e sem definição de seus limites reais. Este decreto estabelecia somente que as terras da UC estariam entre os municípios de Teresópolis, Petrópolis e Magé (Guapimirim se emancipou posteriormente de Magé) (ICMBio, 2007), Figura 19. Somente em 1984, através do Decreto nº 90.023, que as terras da UC foram delimitadas, gerando um lapso de tempo de 45 anos, o que permitiu que, neste tempo, as terras fossem ocupadas, deflagrando assim os conflitos fundiários persistentes na história do Parque.

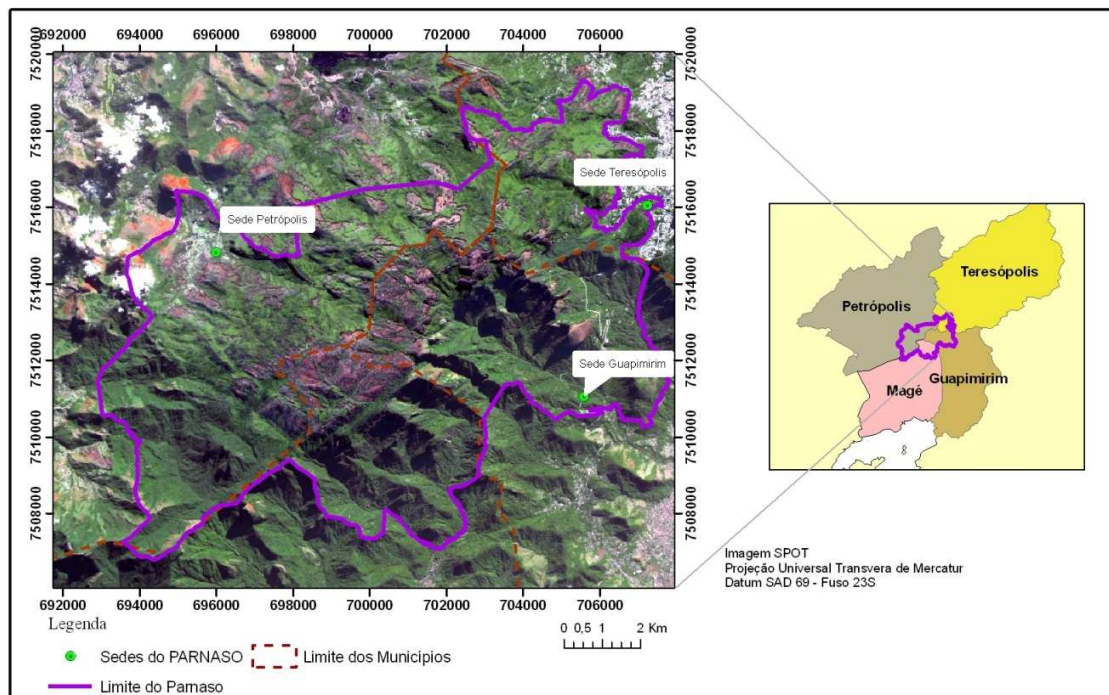


Figura 19: Limites do Parque Nacional da Serra dos Órgãos com as divisões municipais. Fonte: Kroeff, L. (2010).

Seis setores fundiários foram classificados por ROCHA (2002), utilizando principalmente as divisas dos municípios que, normalmente, passam pelas vertentes da serra e que, na maioria das vezes, também se constituem nas divisas das propriedades, Figura 20.

Dentre os setores, o Bonfim possui intensos conflitos fundiários com o Parnaso pela posse das terras de antigos agricultores que defendem suas posições. Os mesmos alegam que o uso e ocupação das terras do Bonfim são anteriores a delimitação dos limites do Parnaso, o que seria uma incongruência a inclusão dessa comunidade em uma Unidade de Preservação Integral, como aponta (CORRÊA, 2009).

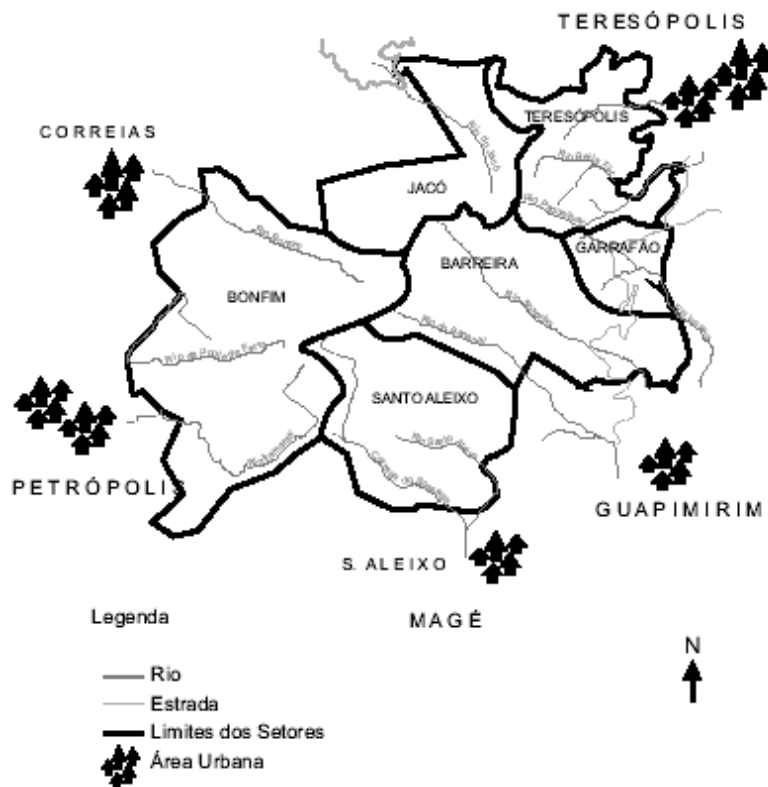


Figura 20: Divisão dos seis setores fundiários nos limites do Parque Nacional da Serra dos Orgãos. Fonte: ROCHA, 2002.

O histórico da questão fundiária do setor Bonfim inicia no final do século XIX, como apresentado por ROCHA (2002), com a compra da Fazenda Bonfim ou Fazenda da Palha pelo Banco Construtor do Brasil, pertencente à Família Sampaio. Após período de auge no processo produtivo (hortaliças e roseiras), houve processo de decadência com progressivo abandono das terras pelos herdeiros, sendo então, ocupadas por apossamento pelos próprios empregados da fazenda, como conta a seguinte passagem:

*“...Os salários atrasaram, o “barracão” deixou de vender fiado e em pouco tempo fechou as portas. Muitos empregados deixaram a área nessa ocasião, indo buscar trabalho em propriedades vizinhas. Outros, proletários rurais, privados do solo mensal, passaram a explorar a terra para extrair seu sustento, constituindo-se, com o passar do tempo, em posseiros...”*  
(ROCHA, 2007)

Essa história é retratada pelos moradores locais em conversas informais, sendo que, em entrevista com o jornal Tribuna de Petrópolis, tem-se:

*Na opinião dos produtores rurais, o principal marco da antiguidade da ocupação da área é a Igreja Nosso Senhor do Bonfim, que começou a ser construída no final do século XIX, sendo concluída em 1903. Segundo registro da comunidade rural, desde o início do século XX existia na região a Fazenda Bonfim, de propriedade da família Sampaio, amiga do então presidente Getúlio Vargas, o qual costumava visitar e se hospedar com freqüência no local. Após a morte do presidente, em 1954, os proprietários da fazenda teriam começado a abandonar o local, deixando, inclusive, de pagar aos funcionários. Estes, visando o sustento das famílias, começaram a ocupar as terras, iniciando a produção rural, dando início assim à Comunidade Rural do Bonfim (Tribuna de Petrópolis, 2009).*

Os antigos herdeiros, tentaram na década de 1970, a retomada da posse da terra, com embargos de construções tendo o apoio da Prefeitura de Petrópolis, não havendo êxito. No início da década de 1980, foi criada a primeira Associação de Moradores e Produtores, unindo-se em prol da manutenção da posse da terra.

Em 1984, data de início dos limites reais do Parnaso, houve uma tentativa em adquirir a Fazenda Bonfim para incorporá-la ao Parnaso. Segundo ROCHA (2002) talvez tenha sido este o motivo da inclusão de grande parte das comunidades nos limites do parque em 1984, pois a região já se encontrava explorada e ocupada, não apresentando atributos que justificassem a sua incorporação. A não ser, quando há outros representantes da sociedade com interesses na incorporação das terras ao Parque, como foi o caso do Grupo de Diretores Lojistas e da Prefeitura de Petrópolis que queriam desenvolver no Bonfim, um complexo turístico, promovendo assim, o financiando para remanejar os posseiros para outras localidades.

Na época a comunidade se mobilizou para tentar impedir a incorporação, mas a falta de transparência na condução do processo influenciou na decisão de incluir, equivocadamente, o vale do Bonfim nos limites do Parnaso. Além da Associação dos Moradores e Produtores; em 1989 foi criada da Associação de



Produtores Rurais do Bonfim que, hoje, representa os interesses da comunidade junto ao Parnaso; contando ainda com a defesa da Comissão de Defesa dos Direitos Humanos (CDDH) e da EMATER-RJ.

É perceptível a apreensão dos produtores rurais com relação à atuação e presença do Parnaso na bacia. Os primeiros contatos para a realização da pesquisa foi pouco amistosa. Os moradores desconfiavam da ligação do projeto com interesses de “desapropriação” do Parnaso, necessitando apresentações formais, comprovantes da filiação da pesquisa a Universidade Federal do Rio de Janeiro e estabelecimento de uma relação de confiança entre a equipe e os agricultores. Tal como explana BRASILEIRO et al (2006), acerca da comunidade do Bonfim que, têm uma relação “pouco amistosa e de desconfiança” com o Parnaso.

A comunidade rural do Bonfim conta com 387 residentes (Tribuna de Petrópolis, 2009), sendo que a maioria absoluta é composta de posseiros e destes, somente sete moradores possuem o título de propriedade por meio de processo de usucapião, dentre eles, o médico-veterinário Antônio Geraldo de Barros que, contribuiu com a pesquisa realizada, permitindo mensurações e instalação de estação de monitoramento automático do potencial matricial e ainda, cedendo sua casa por uma semana para estadia da equipe da dissertação.

Em mapeamento realizado por LOURENÇO (2008) para o Projeto Nutricional, “Bonfim na Balança”, foi realizado um censo na bacia, catalogando 523 domicílios com total de 1700 residentes. Este registro foi realizado seguindo curso do canal principal dividindo-se em alto, médio e baixo Bonfim.

Cabe ressaltar que, neste registro são incluídas as residências urbanas, que atualmente, estão em crescente processo de expansão, no baixo curso do rio Bonfim. Através da divisão estabelecida entre baixo, médio e alto curso do rio Bonfim, a bacia apresenta-se bem segmentada com relação ao tipo de uso e cobertura, com representações paisagísticas concentradas nos compartimentos

da bacia. Isso facilita o desenvolvimento de pesquisas experimentais com relação à dinâmica hidrológica de ambientes serranos em diferentes tipos de uso e cobertura do solo.

#### **4.1.1 Uso e cobertura do solo**

Acompanhando o curso do rio Bonfim, no alto curso encontra-se cobertura vegetal florestal por replantio pós-ciclo intensivo de produção agrícola, em contato abrupto com afloramentos rochosos (Figura 21). A recuperação da área degradada é variável na bacia, com média de 25 anos de replantio, com exceção da propriedade do Sr. Ildebrando com 40 anos de recuperação. O replantio foi realizado em ação conjunta da comunidade rural com o Parque, fazendo parte das ações preservacionistas e manutenção de recursos, como a água, que além de abastecer todo vale, é utilizada para abastecimento de Corrêas e Nogueira, distritos de Petrópolis. Originalmente, a localidade possuía quatro fitofisionomias da Mata Atlântica, Floresta Pluvial Baixo-Montanha, Floresta Pluvial Montanha, Floresta Pluvial Alto-Montanha e Campos de Altitude (ICMBIO, 2007).

Ainda no alto curso, se consolida a segunda maior atividade da bacia do Bonfim, o turismo de aventura e o ecoturismo, os quais são reconhecidos pelo Ministério do Turismo, como um dos 15 pólos de turismo de aventura em implantação no país. Na região, é desenvolvida uma série de atividades por quatro pousadas e um campo de aventuras (Tribuna de Petrópolis, 2009). Uma das atividades mais procuradas na região e que tem início na sede de Petrópolis (localizada no Bonfim) do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, é a famosa “Travessia Petrópolis-Teresópolis”.

No terço médio do rio Bonfim, concentra-se a produção agrícola. Nessa sessão o vale, que no geral apresenta-se limitado em áreas de baixadas, suaviza-se permitindo a formação de solos mais profundos e algumas colinas de topos convexos que dividem espaços entre as atividades de plantio, residências e os

galpões das cooperativas que, preparam e distribuem as hortaliças no mercado inter e intra-estadual, Figura 21.

E no baixo curso, há intensa área urbanizada a qual se divide em dois momentos: primeiro, as casas e condomínios luxuosos de veranistas próximas à confluência com o Piabanha, e, segundo, uma intensa área de expansão urbana irregular, desordenada, fazendo contato desta sessão com a tradicional porção agrícola, Figura 21.

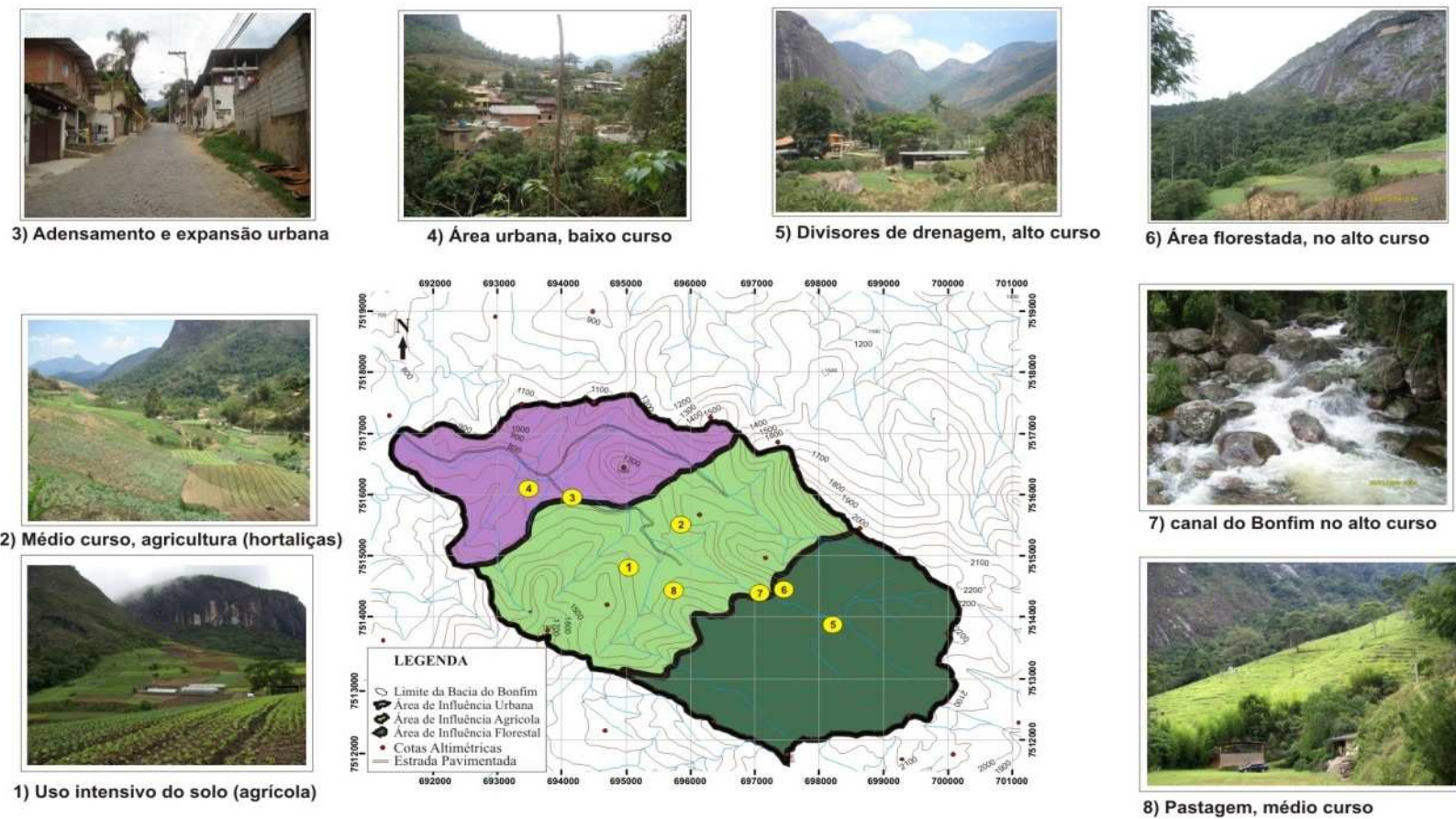


Figura 21: Mapa com divisão dos cursos da bacia do Bonfim com fotografias de paisagens representativas dos compartimentos.

Acrescido ao tradicional conflito fundiário, a cobrança pelo uso da água é outro de tensão na bacia e que tem afligido a comunidade do Bonfim. A cobrança é um instrumento previsto pela Lei. 3.239/99, que institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, tendo sido regulamentado pela Lei 4.247/03, tendo o INEA como órgão responsável pela arrecadação e administração deste recurso que são recolhidos ao Fundo Estaduais de Recursos Hídricos (FUNDRHI) e aplicados de acordo com o estabelecido pelos respectivos Comitês de Bacia Hidrográfica, dentre eles está o Piabanha o qual o integra a sub-bacia do Bonfim.

#### **4.1.2 Manejo das atividades agrícolas**

Como apresentando, a bacia do Bonfim é reconhecida pelo caráter rural, na produção de hortaliças, como principal atividade, seguida de rosas, mudas de arvores, plantas ornamentais, apicultura e etc.

No trato com a terra, há rotação de cultura com descanso curto do solo após ciclos de plantio e colheita, em média 2 meses, como ditos pelos agricultores locais. Encontram-se como principais produtos, a alface, salsa, cebolinha, agrião, couve mineira e brócolis.

A adubagem é orgânica com uso de esterco de animais e restos da colheita anterior que, auxilia na fertilização do solo. No entanto, segundo relato dos agricultores, há uso de fertilizantes químicos para aumento da produtividade e agrotóxicos para evitar pragas.

O preparo da terra é realizado com arados mecânicos (Figura 22) e a irrigação, por aspersão, sem controle de vazão ou tempo, variando com relação aos períodos de estiagem e mais chuvosos.



Figura 22: Manejo do solo e água na comunidade rural do Bonfim. A) exposição do solo á erosão; B) Cicatriz de escorregamento; C) Captação direta da água para agricultura; D) Irrigação por aspersão; E e D) Arados mecânicos. Arquivo Pessoal.

Dois impactos são diretamente indicados pelo manejo do solo na comunidade do Bonfim. Um deles é atribuído a erosão hídrica, potencializada pela declividade local e exposição do solo a ação da chuva ou irrigação. Outro fator, a contaminação da água e solo pela falta de controle no uso de fertilizantes e agrotóxicos, além do aumento da turbidez pelo transporte de sedimentos. Cabe enfatizar que, a água do Bonfim é captada a jusante da produção agrícola para o abastecimento urbano do entorno.

A geração de impactos relacionados a manejo de solo e água na Região Serrana motivou pesquisadores da área de hidrologia e correlatas, a proporem um

projeto de geração de dados hidrológicos de diferentes naturezas de bacias experimentais da Região Serrana. Dentre elas, a bacia do Bonfim representa os processos em ambientes serranos com uso e cobertura predominantemente agrícola.

O Projeto, conhecido como EIBEX (Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro) foi aprovado em 2006, e desde então, vem sendo desenvolvido com apoio do MCT/ FINEP/CT-HIDRO e CPRM – Serviço Geológico do Brasil tendo como instituição executora a COPPE-UFRJ e CPRM, além das instituições colaboradoras tais como, IGEO – UFRJ e CATO-UERJ (COPPETEC, 2007). O EIBEX tem como objetivo entender a dinâmica hidrológica da região, nas variadas escalas temporais e espaciais, sobre diferentes tipos de uso e ocupação do solo. Esse projeto tem financiado toda a instrumentação e monitoramento hidrológico dos solos apresentado neste trabalho de dissertação de mestrado.

## **4.2 Caracterização Ambiental**

### **4.2.1 Clima**

Segundo a classificação de Köppen, na região serrana o clima pode ser classificado como mesotérmico brando superúmido com temperatura média variando entre 13° a 23°C e índice pluviométrico médio anual entre 2.300 mm a 2.500 mm, caracterizando verões brandos sem estação seca com abundância das precipitações nos meses de inverno (ICMbio, 2007; INMET, 2009)

No Bonfim, os altos índices pluviométricos são encontrados próximos aos divisores de drenagem, com média anual ultrapassando 2000 mm, decrescendo

abruptamente no baixo curso do Bonfim para 1.300 mm podendo atingir 900 mm nos períodos de secas (entre os meses de abril a agosto) (GOULART, 1999).

A localização da bacia, na região tropical e a proximidade da superfície oceânica não explicam por si só a elevada pluviosidade da região. A esses fatores, que criam pré-condições à alta pluviosidade, está associado mecanismos dinâmicos, de massas de ar polares e oceânicas e linhas de instabilidade, e fatores estáticos orográficos proporcionados pela orientação SO/NE da Serra do Mar (ICMBio, 2007).

Observando-se o mapa de isoietas da bacia hidrográfica sobre o mapa topográfico, Figura 23, constata-se a influência do relevo na distribuição pluviométrica total, como exemplo, nas encostas íngremes a pluviosidade média anual ultrapassa os 2.500mm. O relevo acidentado condiciona também a variação das temperaturas, em pontos de formação rupestre e campos de altitude próximos a Pedra do Sino e Açú, a incidência de geadas no inverno torna-se comum, com temperaturas negativas.



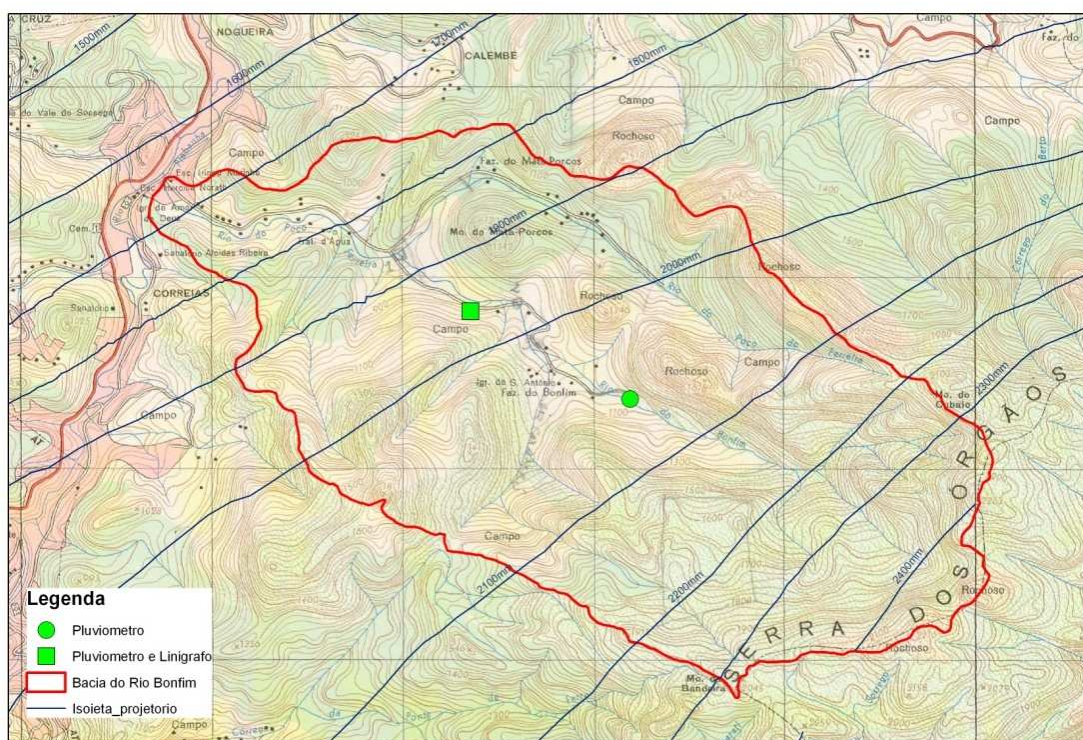


Figura 23: Isoietas transpostas na carta topográfica de Itaipava com limites da bacia do Bonfim. Fonte: IBGE (1986); Projeto Rio de Janeiro (2000); adaptado por Daniel Medeiros, 2009.

#### 4.2.2 Geologia

Na região serrana as litologias pré-cambrianas e eopaleozóicas estão individualizada em unidades de mapeamento. No Bonfim, há predomínio Batólito Serra dos Órgãos representado por biotita granitos a granodioritos gnáissicos; seguido de leucogranitos gnáissicos e; e em menor porção, os granitos pós colisionais (granitos Andorinha) ICMBio (2007), Figura 24.

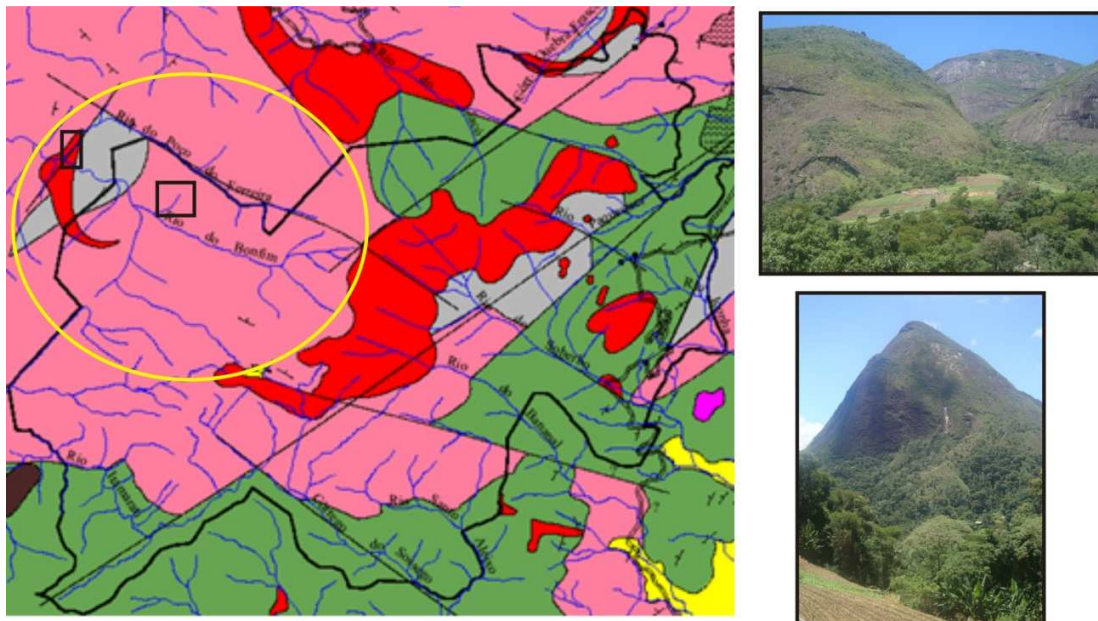


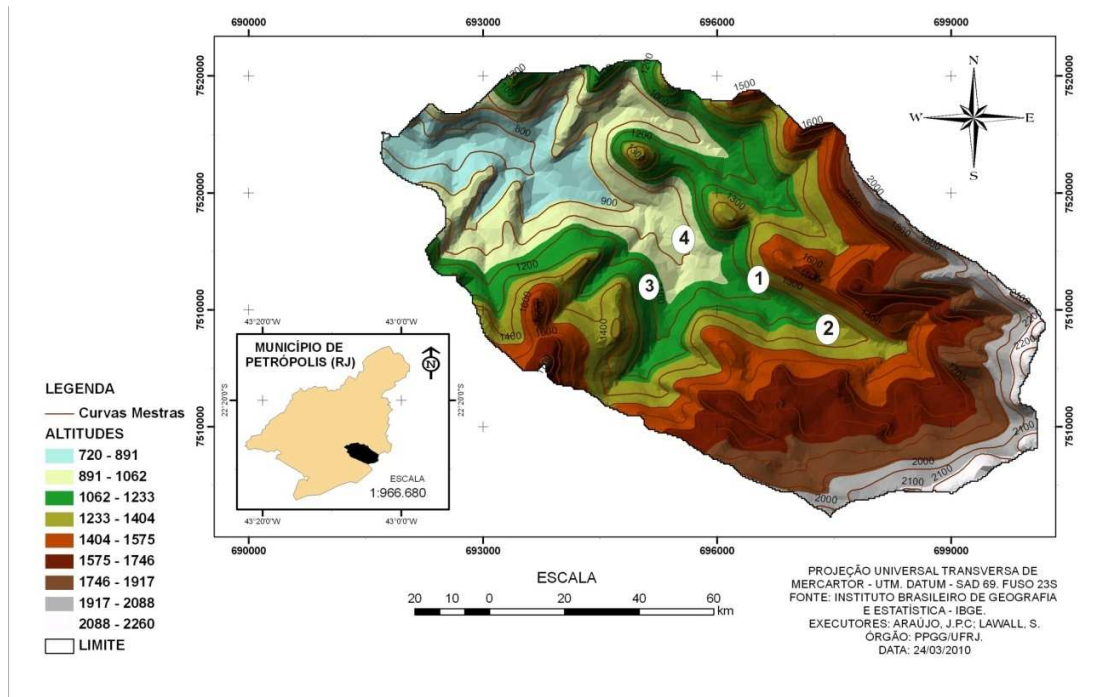
Figura 24: Recorte do Mapa geológico do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, com ênfase na bacia do Bonfim. Batólito Serra dos Órgãos (rosa); Presença de leucogranitos gnáissicos (cinza) e granito Andorinha (vermelho), representados na fotografia. Fonte: ICMBio, 2007.

Corpos intrusivos de provável idade mesozóico-cenozóica cortam essas unidades (ICMBio, 2007). Segundo GOULART (1999) O Departamento de Recursos Minerais (DRM, 1981), realizou levantamentos geológicos básicos para o mapeamento do estado do Rio de Janeiro na escala de 1:50.000, onde na folha Itaipava (SF-23-Z-B-I-4 - IBGE, 1986), insere-se a bacia hidrográfica do Bonfim. O Batólito Serra dos Órgãos é a litologia predominante, ocupando a porção central e noroeste desta folha, com ramificações para SW e SE, correspondendo a 2833,0ha (93,1%). Cabe considerar que na bacia do Bonfim há intenso sistema de falhas e fraturas atuando na formação de fluxos preferências na bacia.

### 4.2.3 Relevo e Solos

Geomorfologicamente a região está situada na Unidade Serra dos Órgãos (CPRM, 2000). O reverso deste conjunto topográfico é definido por seu aspecto morfoestrutural, caracterizado por lineações de vales estruturais de cristas serranas, maciços graníticos, morros com desníveis altimétricos acentuados e alvéolos intermontanos (CPRM, 2000). Essas feições refletem áreas de dobramentos remobilizados sob forma de blocos justapostos. A drenagem da Serra dos Órgãos se desenvolve sob o controle lito-estrutural, apresentando padrões paralelos e sub-paralelos (GOULART, 1999).

Em visão geral dos aspectos geomorfológicos da bacia hidrográfica do Bonfim, ela pode ser considerada como típica de regiões serranas com colinas, zonas montanhosas e, vertentes extremamente escarpadas com paredões abruptos; vales estruturais encaixados obedecendo ao controle lito-estrutural, seguindo planos de falhas e fraturas; áreas deposicionais fluviais pouco expressivas, restringindo-se basicamente às proximidades da foz e as áreas de baixas declividades junto aos vales fluviais, no médio e alto curso. No terço superior, a drenagem, apresenta-se extremamente densa, assemelhando-se ao padrão dendrítico (GOULART, 1999), Figura 25.



1 Contato abrupto afloramento-encosta



2 Divisores de drenagem - Planaltos dissecados



3 Tálus na encosta (em meio agrícola)



4 Colinas, suavização do vale

Figura 25: Modelo Digital de Elevação com respectivas feições geomorfológicas identificadas na Bacia do Bonfim

OLIVEIRA et al (2007) através da formação de unidades de paisagem baseadas nas características morfodinâmicas locais, subdividiu os limites do Parnaso em seis classes Geossistêmicas, onde parte da Bacia do Bonfim se enquadra em duas classes: planaltos dissecados e vale do Bonfim.

Com relação ao Vale do Bonfim, definindo-se como a área do terço médio da bacia, segundo caracterização feita por OLIVEIRA et al (*op.cit.*), possui altitudes variando entre 910 a 1.405 metros com amplitude topográfica total de 495 metros e declividade variando entre 0° a 45°. Destaque para assimetria de suas encostas onde uma possui uma ruptura abrupta com paredões rochosos subverticais, enquanto a outra, lado oposto, apresenta uma declividade relativamente menor, Figura 26.

Esta secção da bacia é entrecortada por dois planos de falhas geológicas com encaixe da drenagem do sistema Bonfim, permitindo a suavização e formação de mantos mais espessos, onde se concentra a principal atividade econômica da bacia. No Modelo Digital de Elevação dois perfis transversais foram produzidos seguindo os planos de falha (Figura 27).

Dentre os afloramentos rochosos que delimitam bacia estão dos pontos de referencia regional com cotas bem altas, um é a Pedra do Sino (2.263m) e outro a Pedra do Açú (2.230m), que são explorados pelo turismo de aventura.

As encostas possuem formato retilíneo a côncavas sendo que na sua base, encontram-se espessos depósitos de tálus sob uma cobertura de alteração intempérica com formação de solos mais profundos provenientes de uma contínua decomposição de materiais e alteração das rochas com uma subsequente pedogênese (OLIVEIRA, *op.cit.*).

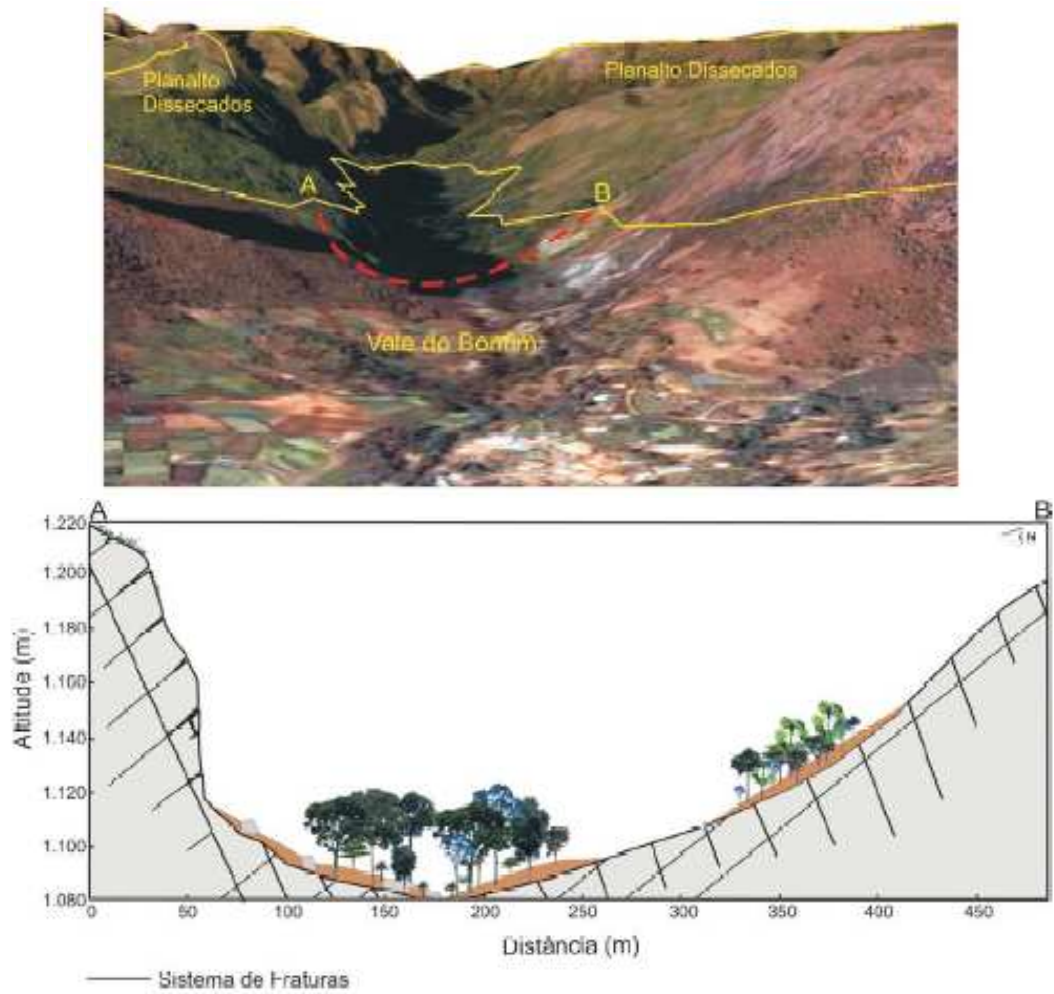


Figura 26: Assimetria das encostas no vale do Bonfim representada por imagem de satélite e em perfil. Fonte: MARTINS et al, 2007.

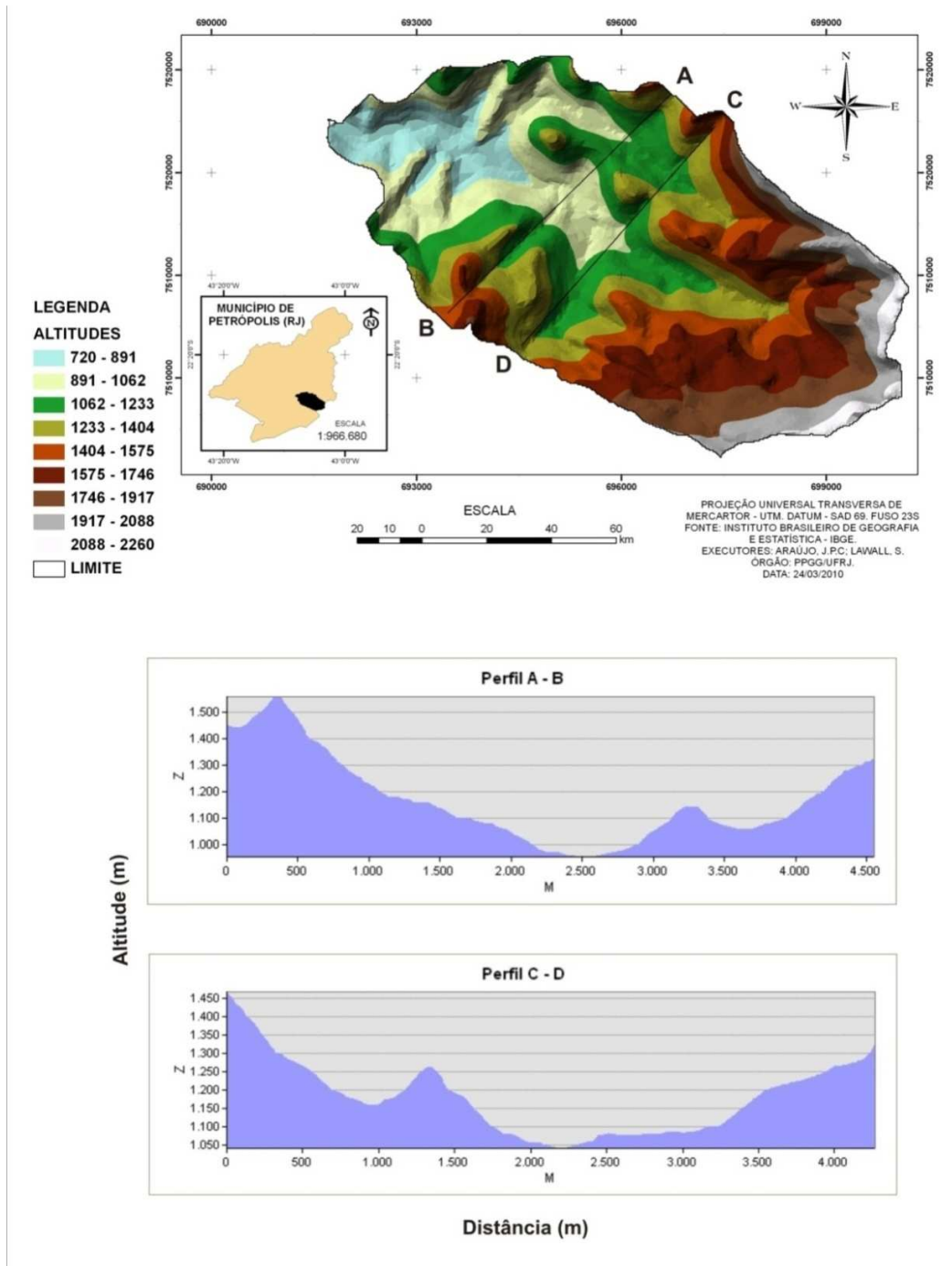


Figura 27: Modelo Digital de Elevação com perfis de relevo em meio a duas falhas geológicas. Suavização do vale do Bonfim. Elaborado por ARAÚJO e LAWALL, 2010.

Em se tratando de evolução dos solos, estes na bacia do Bonfim estão fortemente ligados aos aspectos geológico-geomorfológicos e dos processos dinâmicos em ambientes serranos. Especificamente, não há na Bacia do Bonfim mapa de solos em escala de detalhe, o que facilitaria os estudos hidrológicos propostos. No entanto, MARTINS et al (2007) através de pesquisa de campo, com coletas e análises físico-químicas, na trilha da Travessia Petrópolis-Teresópolis, acrescido aos fatores geoambientes da área do Parnaso, puderam elaborar um mapa esquemático de solos do Parque em escala 1:100.000 com base nas sete unidades de mapeamento constituídas, sendo estas: Afloramentos Rochosos (RA1); Neossolo Litólico distro-úmbrico (RLdh1, RLdh2); Cambissolo Háplico distrófico (CXbd1, CXbd2, Cxbd3) e Latossolo Amarelo distrófico (LAd1).

Seguindo essa delimitação, no vale do Bonfim predominam, os afloramentos rochosos, Neossolos Litólicos distro-úmbrico, Cambissolos Háplico distrófico e Latossolos Amarelo Distrófico, como apresentado na Figura 28 e Figura 29.

Essas classes também são apontadas por GOULART (1999) em sua dissertação de mestrado o qual, apresenta a participação em hectares das classes na bacia onde, 33,7% correspondem aos Neossolos Litólicos, 23% aos Cambissolos e apenas 10% para os Latossolos, com distribuição do restante dos valores entre afloramento rochoso e menor participação, aluvião.



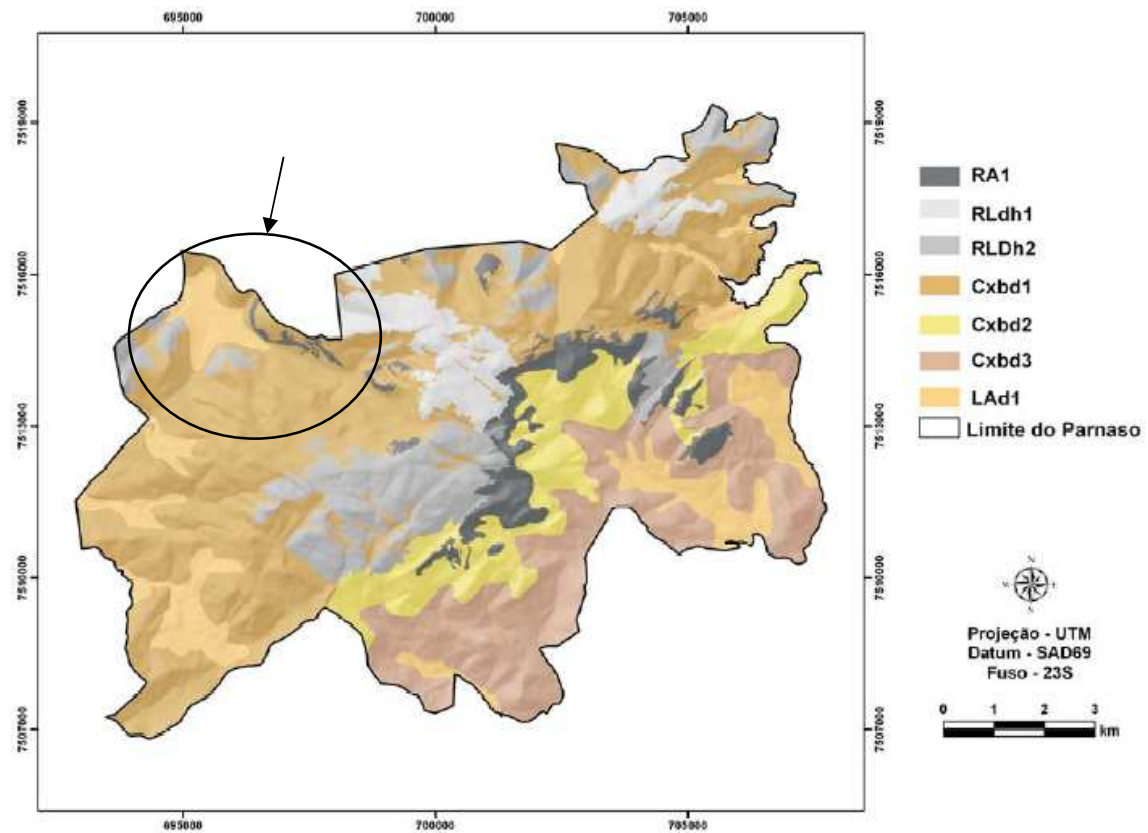


Figura 28: Unidades de Mapeamento de Solos no Parque Nacional da Serra dos Orgãos com delimitação da bacia do Bonfim com as classes RA1, RLdh2, Cxbd1 e LA1. Fonte: Martins et al, 2007.



Figura 29: Solos mais profundos na Bacia do Bonfim. Visão geral da encosta com recorte do perfil observado. Arquivo pessoal.

Vale destacar que, mesmo havendo alguns levantamentos nos limites do Parnaso e parte da bacia do Bonfim, torna-se de suma importância para a geração de dados detalhados não só como suporte as pesquisas ambientais, mas, também para subsidiar práticas de manejo já que a principal atividade da bacia é a agricultura.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia empregada se fundamenta na mensuração e monitoramento dos processos hidrológicos do solo em campo. Nos itens abaixo são descritos os métodos empregados para realização do estudo da hidrológica dos solos em diferentes tipos de cobertura. O primeiro passo foi à escolha das áreas a serem monitoradas na bacia. Em seguida, há detalhamento dos métodos de mensuração da taxa de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada e, métodos de coleta e análise das propriedades físicas conferindo as características do meio poroso. E por fim, o monitoramento automático do potencial matricial do solo sustentando a análise da movimentação da água no perfil do solo nos diferentes tipos de uso e cobertura.

### 5.1 Áreas de mensuração e monitoramento hidrológico: Unidades de Resposta Hidrológica (URH)

Inúmeros trabalhos em hidrologia são desenvolvidos a partir de intensivos trabalhos de campo que, através de mensurações, monitoramentos e coleta de amostras *in situ*, procuram entender a interação entre a ocorrência dos processos hidrológicos (geração de escoamento superficial e infiltração) e os elementos da paisagem, como solos e relevo, que integram a bacia hidrográfica (TROMP-VAN MEERVELD e McDONNELL, 2006; TICEHURST et al, 2007; LIN e ZHOU, 2008; SANTOS, 2009, dentre outros).

Apesar da relevância dos dados originários de pesquisas de campo, é consenso que estas, além de serem dispendiosas, demandam tempo e podem incidir em erros por sub ou superestimação de valores encontrados pela alta variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas como colocado por PARK e GIESEN (2004). A redução de custos, tempo e erros pode ser precedida pelo

planejamento das atividades envolvendo a delimitação das áreas a serem monitoradas. Com isso, no estudo da dinâmica hidrológica de sistemas, a formação de unidades de paisagem (THOMAZ, 2008), unindo processos hidrológicos dominantes as características intrínsecas da paisagem podem ser uma forma eficaz de otimização e acurácia dos monitoramentos, como defendido por PARK E VAN DE GISEN (2004).

Estes autores dividiram a encosta em seis unidades hidrológicas (unidades de resposta hidrológica) para estudo da variação da umidade nestes segmentos afirmando que, além da redução da variabilidade pela junção de caracteres e processos similares na paisagem, a delimitação explicou até 73% da variação da umidade quando combinado com os elementos da paisagem.

Dentro desse contexto, a escolha das áreas de monitoramento hidrológico esteve baseada na formação das unidades de resposta hidrológica como em PARK E VAN GIESEN (2004), com adaptações uma vez que a bacia de Tarawarra (Austrália) possui um relevo suavemente ondulado e com predomínio de pastagem, como tipo de uso do solo.

Neste sentido, a escolha e constituição das Unidades de Resposta Hidrológicas (URH) na bacia hidrográfica do Bonfim teve como princípio as características similares com relação a profundidade do solo, declividade, posição da encosta, curvatura da encosta, processos hidro-geomorfológicos atuantes mas, com a variável uso ressaltadas, sendo estas, floresta, agricultura e pastagem.

Nove Unidades de Resposta Hidrológica foram formadas sendo, quatro Unidades de Resposta Hidrológica Florestal (URHF), quatro Unidades de Resposta Hidrológica Agrícola (URHA), e uma Unidade de Resposta Hidrológica Pastagem (URHP), justificada pela reduzida área de pastagem existente na Bacia do Bonfim.

Na formação das URHs contou-se com apoio técnico dos pesquisadores da EMBRAPA-Solos José Francisco Lumbreras e Uebi Jorge Naime que fizeram o reconhecimento e descrição local dos perfis de solos sob os tipos de uso e cobertura na bacia do Bonfim. Além de visita técnica de reconhecimento da área, materiais de outros estudos realizados na bacia tiveram sua contribuição como o diagnóstico ambiental feito por GOULART (1999) em sua dissertação de mestrado; os estudos da relação solo-relevo em vertentes assimétricas realizado por MARTINS et al (2007) e o próprio Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (ICMBio, 2007). E ainda, o modelo digital de terreno (MDT) e cartograma de declividade elaborados com base na carta topográfica de Itaipava (1:50.000) com equidistância das curvas de 20 metros.

Dentre as características escolhidas para formação das URHs, quanto aos solos, não foi possível estabelecer a mesma característica para os três tipos de uso. As florestas estão localizadas mais próximas aos afloramentos rochosos e no curso superior do rio Bonfim. Já a agricultura e pastagem, estão em áreas de solos mais rasos, na suavização do relevo. A distinção é feita na Tabela 5, onde são agrupados os elementos de formação das unidades.

Quanto às feições das encostas, as unidades foram constituídas em encostas convexas, no terço médio, estando estas com declividade de 20 a 45° onde processos de remoção e transporte são predominantes. Exceção pode ser vista em uma das URHF (área florestada) devido à ausência de acesso a encostas e, uma na URHA (agrícola) pela indicação do proprietário na instalação dos sensores de matriz granular. As informações acerca da formação das URHs foram didaticamente organizadas no Tabela 5 a seguir, e distribuídas na Figura 30.

Tabela 5: Caracterização das Unidades de Resposta Hidrológica na bacia hidrográfica do Bonfim. Baseada em PARK e VAN DE GIESEN (2004).

<b>UNIDADE DE RESPOSTA HIDROLÓGICA (URH)</b>	<b>TOTAL DE ÁREAS AVALIADAS</b>	<b>POSIÇÃO NA ENCOSTA</b>	<b>SUPERFÍCIE GEOMORFOLÓGICA TÍPICA</b>	<b>PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS DOMINANTES</b>	<b>PROCESSOS HIDROLÓGICOS DOMINANTES</b>	
Unidade Resposta Hidrológica Florestal (URHF)	Quatro (três repetições em cada)	Terço Médio	Encosta- convexa - retilínea  Declividade – 30%  Solos rasos (Neossolos)  Presença abundante de matacões (tálus)		Infiltração, escoamento superficial, fluxo subsuperficial	
Unidade Resposta Hidrológica Agrícola (URHA)	Quatro (com três repetições em cada)		Encosta- convexa - retilínea  Declividade – 30%  Solos Intermediários a profundos (Cambissolos-Latossolos)  Presença isolada de tálus		Transporte de material para a base da encosta por fluxo ou escorregamentos. Alta intensidade de superfície de erosão, impacto da água da chuva.	Infiltração, escoamento superficial, fluxo subsuperficial e subterrâneo
Unidade Resposta Hidrológica Pastagem (URHP)	Uma (com três repetições)					

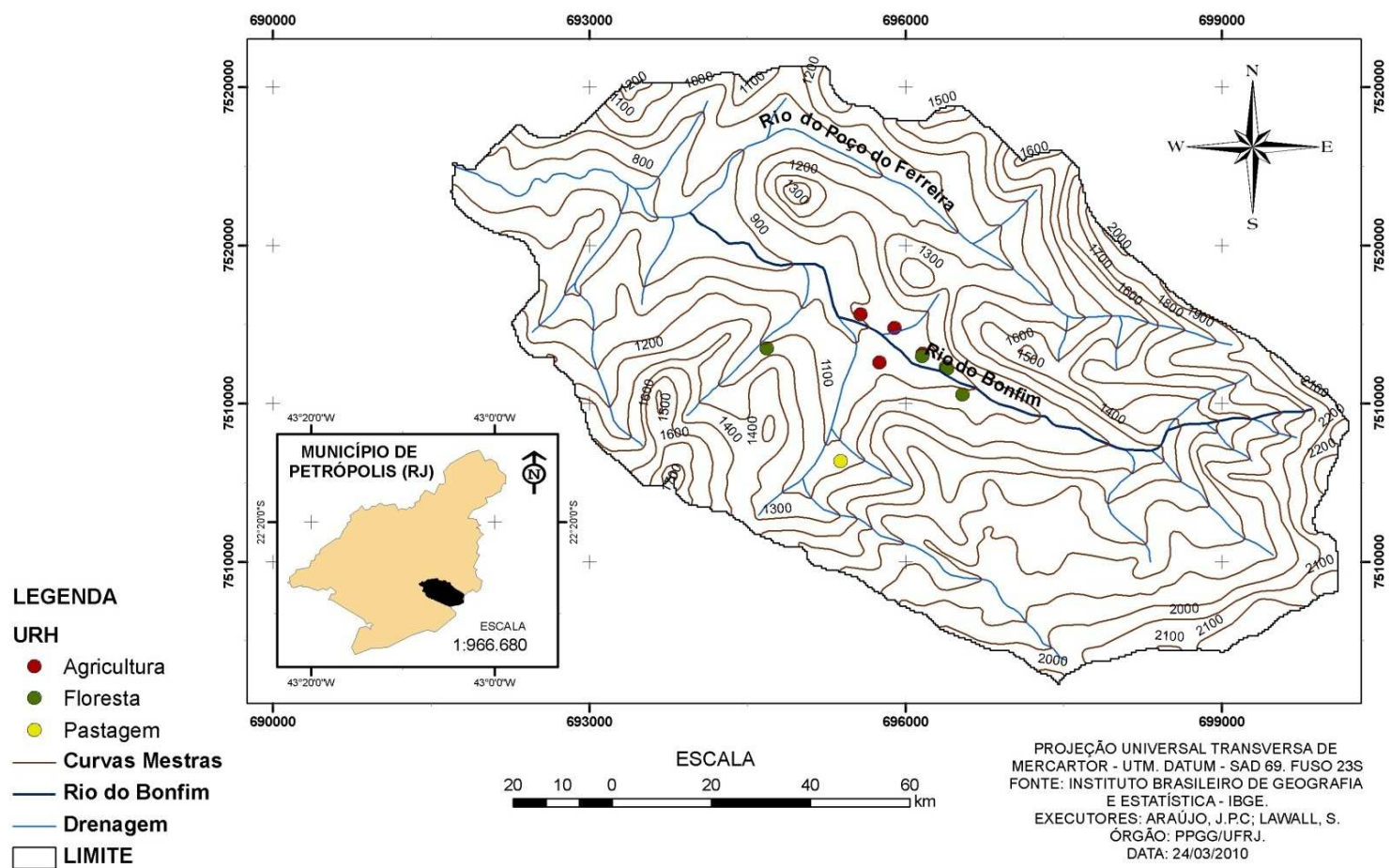


Figura 30: Mapa altimétrico da Bacia do Bonfim com distribuição das URHs. Produzido por ARAÚJO e LAWALL, 2010.

## **5.2 Mensurações e Monitoramentos Hidrológicos nas Unidades de Respostas Hidrológicas**

No interior de cada URHs, foram selecionados três pontos representando as repetições dos procedimentos de mensurações e coletas de amostras. A distância entre um ponto e outro foi de 10 metros aproximadamente, seguindo a área abrangida pelo EPE (erro de posição estimado) na captura das coordenadas UTM pelo GPS (System Position Global).

Em cada ponto, foram realizados simultaneamente mensurações de infiltração através do infiltrômetro de anel duplo e condutividade hidráulica saturada com uso de permeâmetro de Guelph e ainda, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos solos ilustradas no esquema da Figura 31. Esses procedimentos são detalhados nos subitens 5.3, 5.4 e 5.5.



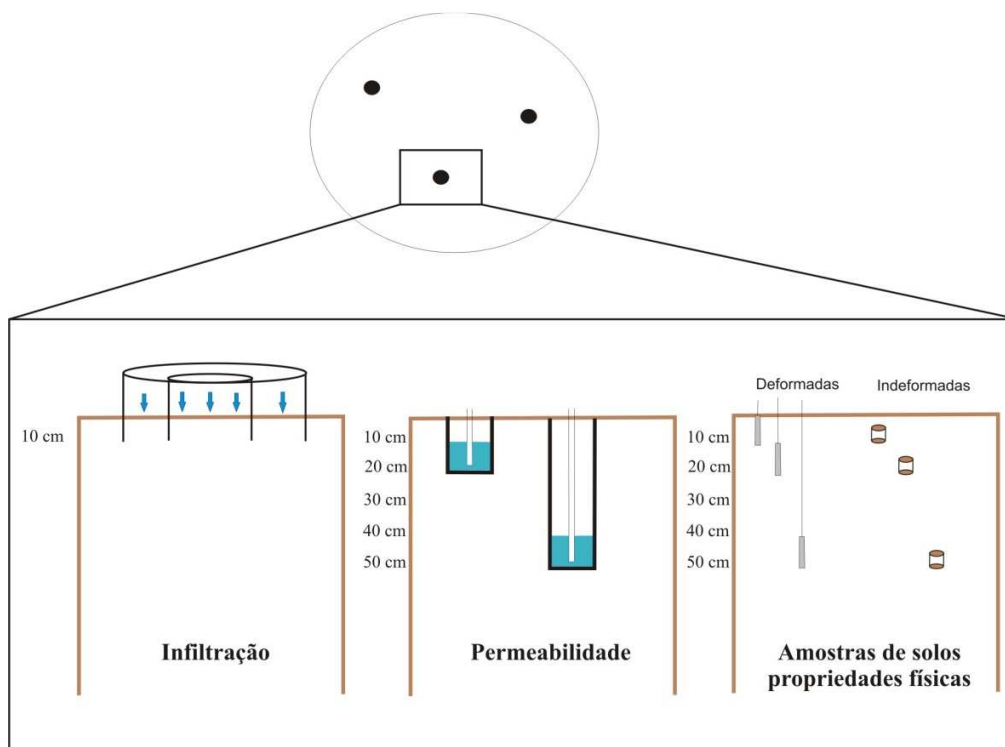


Figura 31: Esquema metodológico das mensurações e coletas realizadas nas Unidades de Resposta Hidrológica indicando o procedimento feito para um ponto de repetição, com execução nos outros dois.

Os dados de mensuração com as respectivas amostras de solo foram catalogados com indicação da URH, do ponto de mensuração e da repetição em que foram realizadas análises. As URHs estão simplificada e representadas pelas letras F (floresta), A (agricultura) e P (pastagem); em seguida, utilizam-se os números arábicos para indicação específica da URHs já que, a floresta e agricultura possuem 4 URHs e a pastagem, apenas 01. Por fim, as repetições são indicadas pelas letras do alfabeto. Como exemplo, a amostra F1A possui a seguinte orientação: pertence a Unidade de Resposta Hidrológica Florestal, na primeira área monitorada e, primeiro ponto de repetição. Já em A2B tem-se Unidade de Resposta Hidrológica Agrícola, segunda área monitorada e, segundo ponto de repetição.

### 5.3 Taxa de Infiltração Básica

A entrada da água da superfície para o interior solo foi medida através da taxa de infiltração básica (TIB). O instrumento utilizado foi o Infiltrômetro de Anel Duplo o qual é constituído de dois anéis concêntricos com diâmetros de 20 cm e 40 cm (centímetros). Ambos são cravados a 10 cm da superfície com auxílio de martelo, (Figura 32a), sendo devidamente nivelados e preenchidos com água, conforme a Figura 32b). O primeiro anel a ser preenchido é o externo e em seguida o interno forçando o fluxo vertical para o interior do perfil.

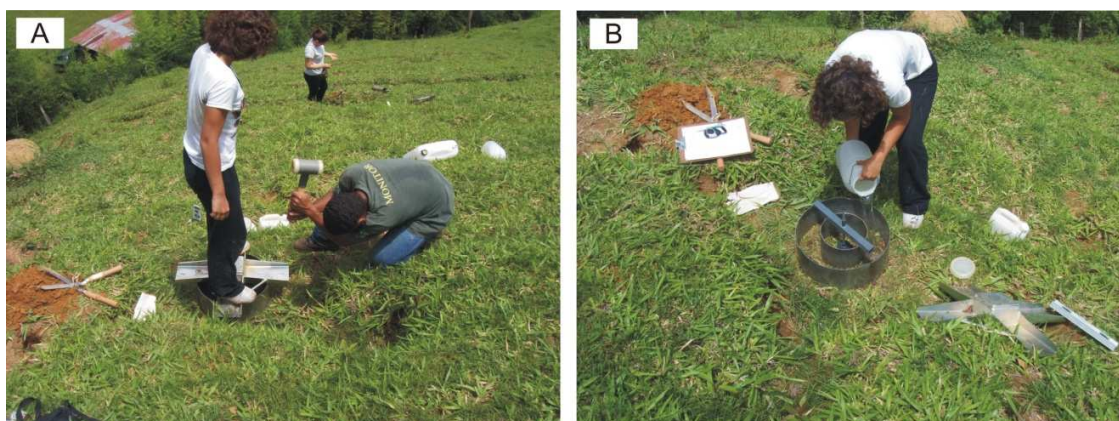


Figura 32: Instalação do Infiltrômetro de Anel Duplo na URHP. (a) Infiltrômetro sendo cravado com auxílio de martelo; (b) anel externo sendo preenchido. Fonte: arquivo pessoal, 2009.

A função do anel externo é evitar a superestimativa do fluxo uma vez que ele condiciona o fluxo em todos os sentidos. Já no anel interno, onde as medidas são realmente aferidas, o fluxo preferencial é o vertical, possibilitando assim a leitura da entrada da água em centímetros por unidade de tempo, Figura 33.



Figura 33: Leitura realizada no anel interno do infiltrômetro de anel duplo. Arquivo pessoal, 2009.

A coluna de água ou carga hidráulica escolhida para todos os ensaios foi de 10 cm compatível a carga utilizada na condutividade hidráulica saturada, a ser abordada. As leituras foram feitas através de uma régua graduada ligada a uma bóia colocada no cilindro interno, em intervalos de tempo que variam conforme o uso e cobertura de análise e velocidade de infiltração. Como exemplo de intervalo de leitura, na área florestal os registros foram feitos de 30 em 30 segundos, já para áreas sob uso de pastagem, esses intervalos eram de 10 em 10 minutos. Cabe ressaltar que foi avaliada a umidade antecedente.

Os ensaios foram realizados até que a quantidade de água infiltrada fosse aproximadamente constante com o tempo. Os dados obtidos foram tabulados em planilha eletrônica, para facilitar os cálculos, permitindo assim, a obtenção da taxa básica de infiltração através da Equação 4:

Equação 4: Taxa de Infiltração Básica

$$TBI(cm/h) = \frac{\text{variação}(cm)}{\text{tempo}(min)} \times 60$$

onde,

TIB = a taxa de Infiltração Básica, variação em segundos é o valor observado na régua graduada em um determinado tempo (expresso em minutos), com fator de multiplicação (60) gerando dados em cm/h.

#### **5.4 Condutividade Hidráulica Saturada de Campo**

A condutividade hidráulica saturada de campo ( $K_{sat}$ ) foi realizada com auxílio do Permeômetro de Carga Constante de Campo, modelo IAC o qual foi desenvolvido por Dr. Sidney R. Vieira do Instituto Agronômico de Campinas com bases no original Permeômetro de Guelph produzido na Universidade de Guelph, Canadá (VIEIRA, 2001). Em sua composição, tem-se uma garrafa de Mariotte que tem como finalidade controlar o nível constante de água dentro do furo, um tubo de acrílico onde se insere a água e um tripé para sustentação (Figura 34).



Figura 34: Permeômetro modelo IAC, mensuração da condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ), arquivo pessoal.

Os ensaios foram feitos nas profundidades de 20 e 50 cm permitindo a avaliação do fluxo de água saturado na zona de raiz, mais próxima da superfície e outra, na zona não saturada.

A  $k_{sat}$  não é obtida diretamente no campo; os valores extraídos no processo de operacionalização do instrumento alimentam as equações de fluxos saturados, através das variáveis, gerando de forma secundária, o valor final da  $k_{sat}$ . A equação empregada foi a de ELRICH *et al* (1989), descrita pela Equação 2, no capítulo 03.

Na tentativa de reduzir erros super ou subestimação dos dados, buscou-se padronizar a instrumentação e aquisição das variáveis necessárias para a equação através da seguinte seqüência descritiva e ilustrada (Figura 35):

Abertura de 2 poços (20 e 50 cm) com **raio de 5 cm (a)** utilizando trado tipo caneco. Esse poço foi limpo e escarificado a fim de, evitar a selagem no orifício do ensaio, conforme indicação do Manual de Instruções (*Soilmoisture*, 1986).

- a) Posicionamento e nivelamento do instrumento sobre o poço e preenchimento do reservatório de água para a verificação dos encaixes e vedações, evitando assim, a entrada de ar.
- b) Início da instrumentação é feita com a aplicação gradual da **carga hidráulica (h)** até atingir os 10 centímetros, evitando a formação do fluxo de turbilhonamento o qual, pode agitar as partículas mais finas do solo e preencher os poros alterando os resultados da condutividade hidráulica saturada.
- c) A leitura é feita com uso de cronometro e planilha para anotação dos valores. Em intervalo constante de tempo (conforme a velocidade inicial do fluxo) são lidos, em milímetros, os valores de caimento do reservatório de água, constituindo a variável **vazão constante (Q)** da equação de ELRICH *et al* (1989). A vazão constante é obtida a partir quatro leituras iguais ou com tendência a estabilização por um determinado tempo.
- d) As demais variáveis, ou seja, o  $\alpha$  e parâmetro C são obtidos através da caracterização da permeabilidade do meio poroso.

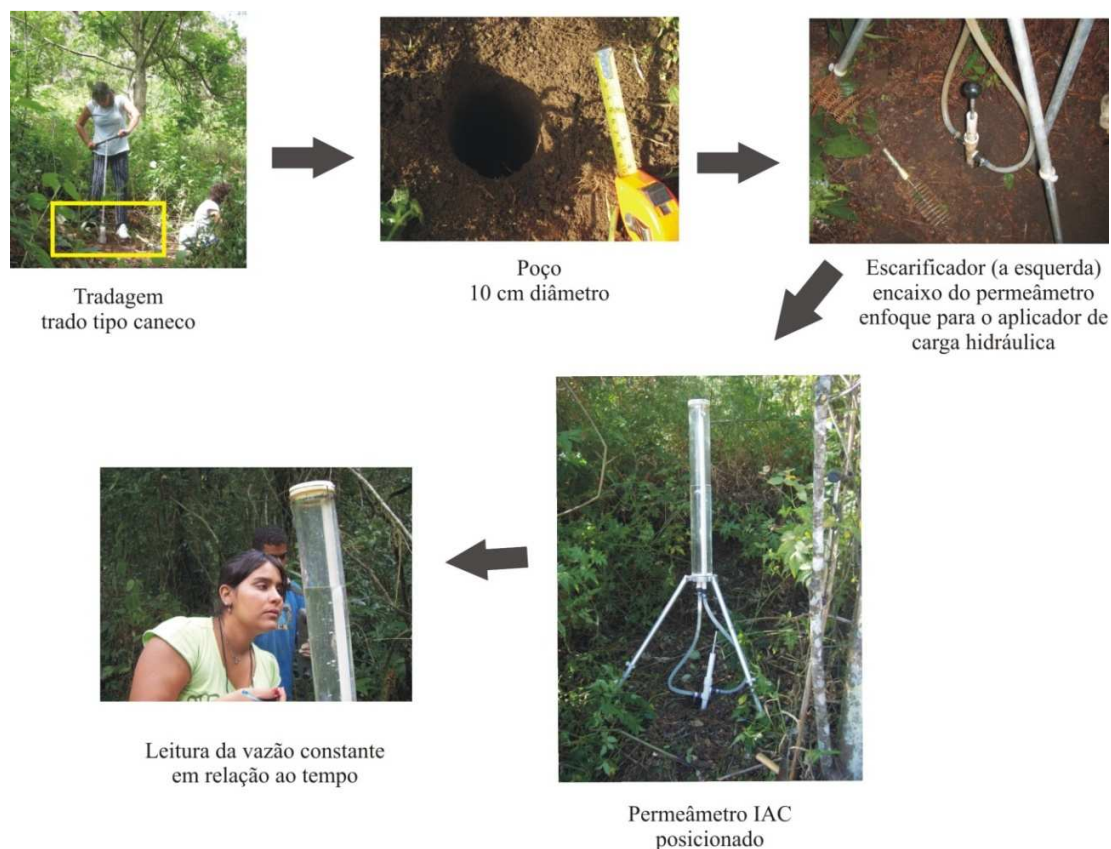


Figura 35: Seqüência de montagem e controle do ensaio de condutividade hidráulica saturada de campo, arquivo pessoal.

Cabe ressaltar que, o tempo de instrumentação pode variar de local para local conforme a umidade antecedente, o tipo de uso e propriedades dos solos, mas, em média, esse ensaio varia de 60 a 120 minutos.

## 5.5 Propriedades Físicas dos Solos

### 5.5.1 Amostras Deformadas

Com auxílio de trado holandês de 3" (polegadas), foram coletadas amostras deformadas para análise granulométrica e densidade real (partículas) nas profundidades de 0-10, 20-30 e 40-50 cm nas 9 URHs e suas três repetições. No total, foram coletadas 81 amostras que foram enviadas para o Laboratório de

Geomorfologia para análise granulométrica das frações segundo método da EMBRAPA (EMBRAPA, 1996).

Além da granulometria, a densidade real (Equação 5) foi obtida, no entanto, cabe considerar que, para este tipo de dado, não foram realizadas três apenas uma em cada URH. As 25 amostras foram submetidas ao método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1996). Este método consiste em medir a quantidade de álcool necessária para completar a capacidade de um balão volumétrico, contendo solo seco em estufa.

Equação 5: Densidade real do solo

$$\rho_r = \frac{\rho_s}{50 - V_{at}}$$

$\rho_r$  é a densidade real;

$\rho_s$  o peso seco da amostra e

$V_{at}$  o volume do álcool gasto

### 5.5.2 Amostras Indeformadas

Com uso de trado tipo Uhland (Figura 36) utilizando anéis cilíndricos de aço inoxidável com 50 mm de diâmetro, 53 mm de altura com 100 cm<sup>3</sup> de volume. Foram coletadas amostras indeformadas nas 9 UHP com três repetições para cada nas seguintes profundidades: 0-5 cm, 25-30 cm e 45-50 cm. As mesmas foram embaladas em plástico filme, colocadas em caixa de isopor com serragem molhada para manter a umidade e estrutura do solo na amostra.





Figura 36: Seqüência de coleta de amostra indeformada. Arquivo pessoal, 2009.

Destas foram extraídos dados de porosidade total e densidade do solo (aparente) conforme a indicação do Manual da EMBRAPA (EMBRAPA, 1997).

Para porosidade total, foi obtida através da divisão da densidade real e aparente e, divisão do valor pela densidade real, multiplicada por 100. Assim, a porosidade total ou volume de poros totais (VPT), foi obtida através da Equação 6.

Equação 6: Porosidade total

$$VPT\% = \frac{Dr - Da}{Dr} \times 100$$

VPT% Porosidade Total

Dr Densidade real ( $g/cm^3$ )

Da Densidade aparente ( $g/cm^3$ )

A densidade do solo, expressa em  $\text{g/cm}^3$  é obtida através do peso dos sólidos sobre o volume total do solo, através da Equação 7:

Equação 7: Densidade Aparente

$$\rho_{ap} = \frac{ps}{vt}$$

onde,

$\rho_{ap}$  densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ )

$ps$  peso dos sólidos

$Vt$  volume total

## 5.6 Potencial Matricial do Solo

Os dados de potencial matricial foram obtidos através de monitoramentos contínuos com uso de sensores de matriz granular (*watermark, irrometer, Inc*). Dentre as nove Unidades de Resposta Hidrológica, cinco foram selecionadas sendo duas URHF (unidade de resposta hidrológica florestal), duas URHA (unidade de resposta hidrológica agrícola) e uma URHP (unidade de resposta hidrológica pastagem) localizadas na bacia do Bonfim, Figura 37.

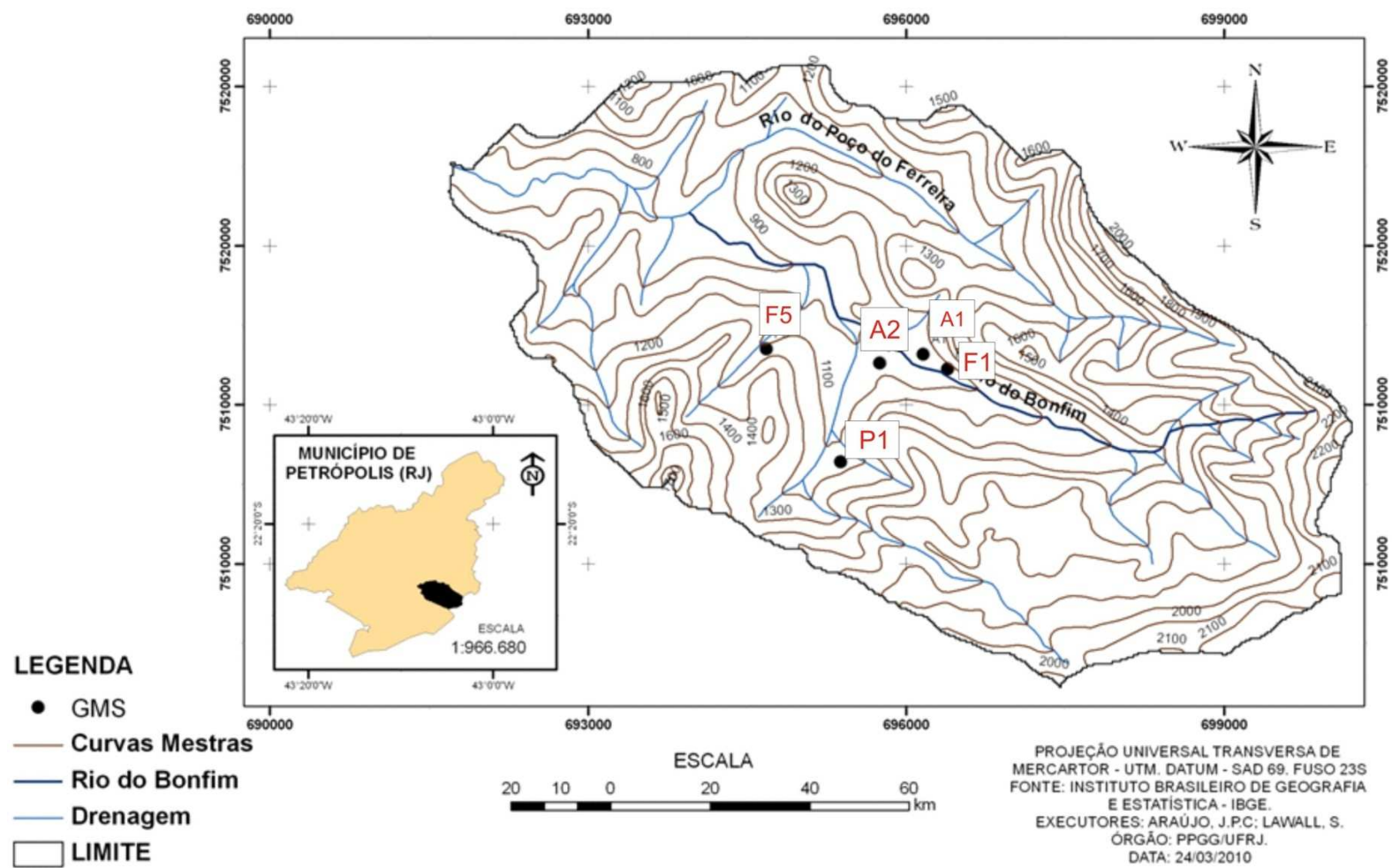


Figura 37: Localização das estações de GMS na Bacia do Bonfim identificadas pelas letras F de floresta, A para agricultura e P para pastagem.

Em cada URH foi instalado um *Kit* completo de oito sensores (7 watermark e 1 de temperatura) acoplados a *datalogger* (aparelho que armazena os dados registrados pelos sensores) específico para registro de dados de potencial matricial.

O *datalogger* foi posicionado em uma altura de 150 cm da superfície e os sensores enterrados ao longo do perfil a sua montante, Figura 38. Com relação à profundidade, os sensores foram inseridos a 10, 20 e 50 centímetros a esquerda *datalogger*; 80 cm e temperatura na posição central e; 50, 20 e 10 cm a sua direita. O esquema da Figura 38 ilustra didaticamente o posicionamento adotado nos cinco *kits* completos de *watermark* instalados nas URH da bacia do Bonfim.

Na instalação, os sensores passaram por 48 horas de preparação alternando entre períodos de emersão e secamento. Conforme a profundidade escolhida, poços de 2" (polegadas) foram abertos com trado rosca e depois preenchidos com água para introdução vertical do sensor. O poço é fechado com o solo extraído da tradagem e os cabos conectados ao *datalogger* para as leituras. Cabe destacar que, a calibração utilizada foi a do próprio aparelho conforme indicação do manual de instrução.

Os sensores foram instalados entre os dias 07 a 10 de setembro de 2009 inicialmente configurados com intervalos de leitura de 15 em 15 minutos. Os dados apresentados estão contidos no intervalo de 07 de setembro a 30 de janeiro de 2010. A variação do potencial matricial (indiretamente a umidade do solo) nas profundidades estudadas é observada em resposta aos eventos pluviométricos. Na bacia do Bonfim, foram instalados dois conjuntos de pluviômetros e pluviógrafos que são mantidos pelo Projeto EIBEX, sendo os dados disponibilizados pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil).

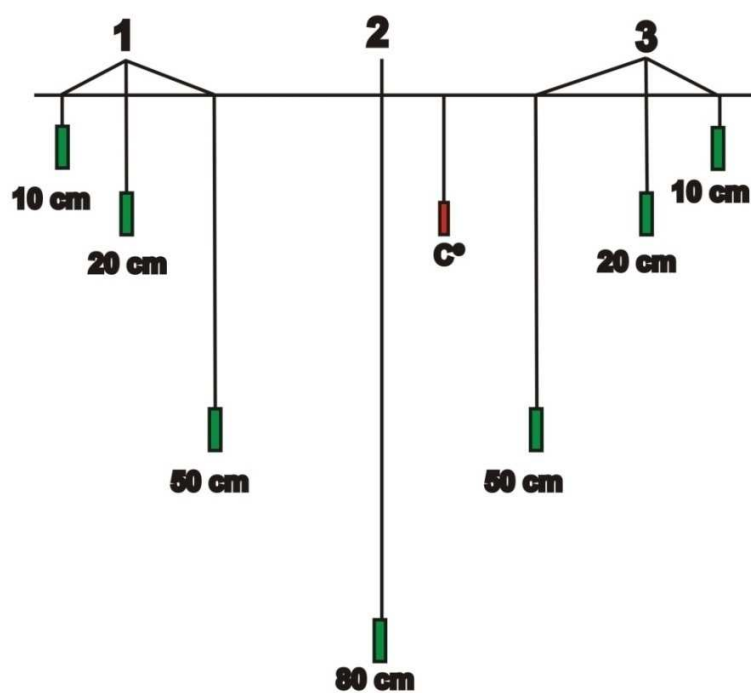


Figura 38: Kit completo watermark instalado na URHA com esquema de posicionamento dos sensores no solo.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A apresentação dos resultados segue uma ordem, ou seja, no primeiro momento são apresentadas as propriedades físicas e hídricas, estabelecendo comparações entre as URHs, entre os tipos de cobertura distintos e, internamente. Em seguida, foram descritas as leituras dos dados de GMS (watermark, potencial matricial) com relação à precipitação de forma agrupada, agricultura-pastagem e, depois floresta. Cabe destacar que, para melhor compreensão do funcionamento dos sensores de matriz granular, fez-se um detalhamento do comportamento hidrológico dos solos a partir do intervalo de 9 dias. E por fim, na discussão dos dados, buscou-se realizar um agrupamento das propriedades mensuradas e monitoradas, acentuando a influencia dos tipos de uso e cobertura na hidrologia dos solos.

### **6.1 Análises das Propriedades Físicas nas Unidades de Resposta Hidrológica (URH)**

Neste sub-capítulo são apresentadas as propriedades físicas encontradas nas nove unidades de resposta hidrológica estudadas seguindo a análise da granulometria, a densidade real, aparente e porosidade total.

#### **6.1.1 Granulometria das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)**

No total de 81 amostras analisadas na bacia do Bonfim, a fração predominante foi a areia, em comparação com silte e argila. Os menores valores de areia foram encontrados na pastagem com média de 41%, e os maiores, na floresta, média de 68% atingindo 81% em URHF5. Na Tabela 6 são apresentados os percentuais das frações granulométricas obtidas através da média total de

todas as análises obtidas em área floresta, agrícola e pastagem, nas específicas profundidades, ou seja, 0-10, 10-20 e 40-50 cm.

Tabela 6: Valores médios totais das repetições das URHF, URHA, URHP por profundidade com destaque para fração areia.

PROF.	FRAÇÕES	MÉDIA URHF	MÉDIA URFA	MÉDIA URHP
0-10	Areia	70.2	53.92	43.89
	Silte	26.73	32.62	27.76
	Argila	3.07	13.45	28.35
10-20	Areia	68.03	49.32	38.08
	Silte	27.81	34.09	26.62
	Argila	4.16	16.59	35.29
40-50	Areia	66.89	48.11	38.28
	Silte	26.53	30.16	25.55
	Argila	6.58	21.72	39.17

Do mesmo modo, as Figura 39, 40 e 41 trazem as representações gráficas dos valores médios totais obtidos, ilustrando, didaticamente, a distribuição das frações nos solos estudados. Além do destaque para fração areia, maior percentual nas três coberturas, vale destacar que, houve aumento da fração argila da floresta com relação a agricultura e a pastagem, com maiores valores. Quanto à fração silte, observou-se similaridade dos percentuais verificados para cada URH, com limites entre 25 a 38%, como mostra a Tabela 6 .

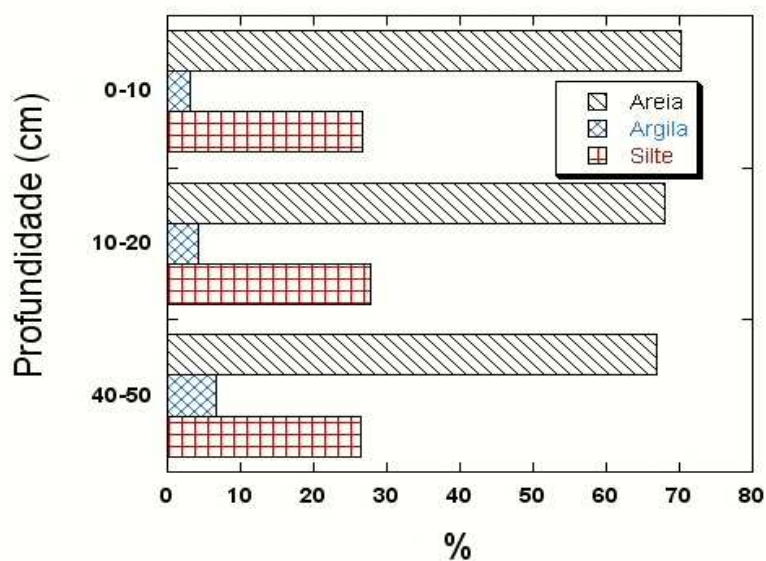


Figura 39: média total das frações granulométricas analisadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Floresta representada por profundidade em percentual.

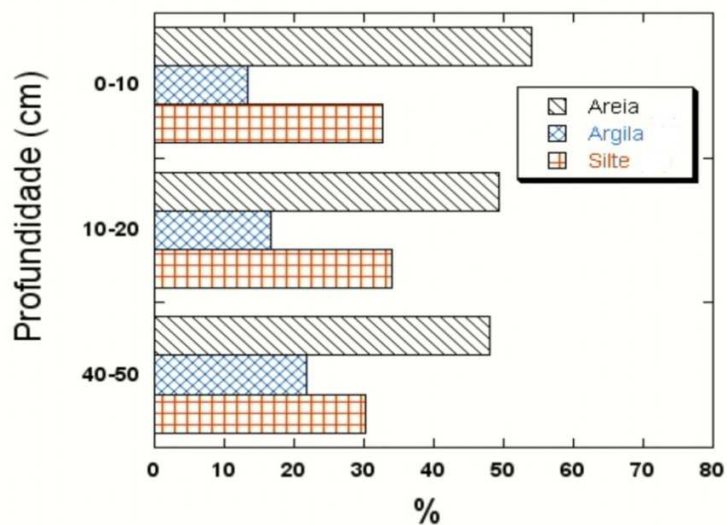


Figura 40: média total das frações granulométricas analisadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Agricultura representada por profundidade em percentual



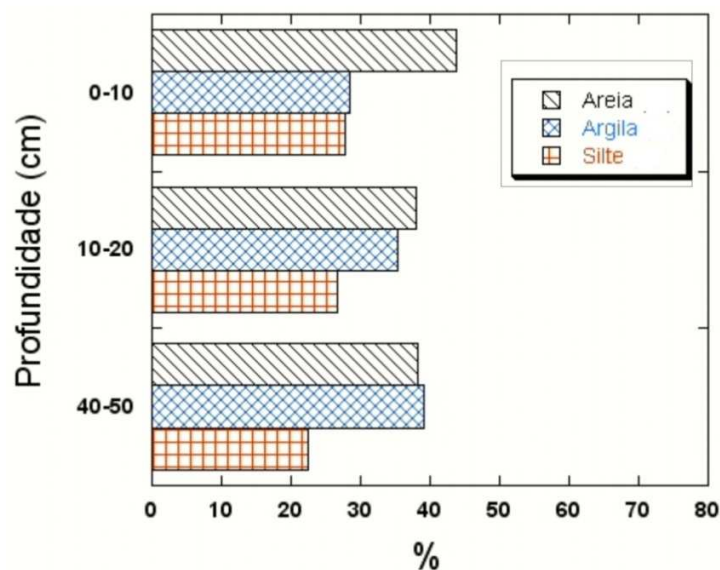


Figura 41: média total das frações granulométricas analisadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Pastagem representada por profundidade em percentual

Partindo dos valores encontrados, a textura dos solos nas URHs pode ser considerada como média especificamente, textura franco-arenosa, com média total dos valores de areia girando em torno de 53%, 33% silte e 14% argila. Na classificação realizada por unidade de resposta hidrológica através do triângulo textural (Figura 42), obteve-se para os solos em áreas florestadas, textura franco-arenosa; na agricultura, textura franca e, na pastagem, franco-argilosos em função do perceptível aumento de argila, já destacado.

Similar comportamento pôde ser visto em MIRANDA (2008) com relação à granulometria de solos de uma vertente em ambiente serrano, no município de Bom Jardim, Rio de Janeiro. Dentre as amostras indeformadas analisadas a textura franco-arenosa foi a mais representativa. Neste mesmo estudo, os solos foram enquadrados na classe dos Cambissolos e Argissolos, sendo o segundo com menor expressividade areal.

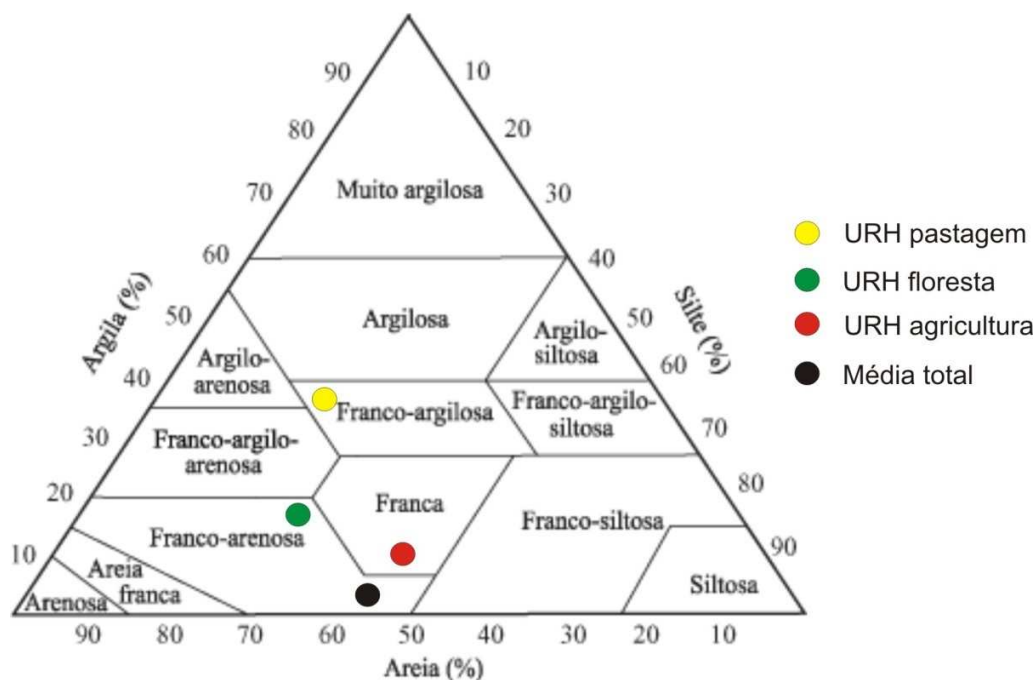


Figura 42: Triângulo de distribuição de classes texturais com relação a média total das amostras por fração analisada e classificação por unidade de resposta hidrológica, adaptado de LEMOS et al (2005).

Na Bacia do Bonfim, GOULART (1999) classificou os solos do vale do Bonfim a fim de elaborar um diagnóstico aplicado à suscetibilidade destes à processos erosivos. O autor delimitou áreas com predomínios de Neossolos, Cambissolos e Latossolos utilizando para isto, análise subjetiva de dados cartográficos e descrição de seis perfis completos. No entanto, não há explanação dos resultados destes perfis, o que dificulta a compreensão e a interface entre as classes. Contribuições para esta análise foram encontradas em MARTINS et al (2007) que estudaram a relação solo-relevo em vertentes assimétricas de áreas limítrofes do PARNASO (Parque Nacional da Serra dos Órgãos). Os autores (op.cit) coletaram amostras representativas das unidades de paisagem do parque nacional, em localidades próxima a trilha da travessia Petrópolis-Teresópolis. Foram realizadas análises químicas e físicas que, em conjunto à interpretação de imagens, sustentaram a definição das classes de solos encontradas na região. Nas amostras representativas, pode-se verificar percentual de areia total superior a 60% em todas as classes representadas que englobam áreas da bacia do

Bonfim, concordantes com valores encontrados. No entanto, os valores de silte são destoantes, inferiores a 15% e a argila, variando entre 9 e 30% das amostras analisadas no vale do Bonfim e planaltos dissecados, o que também concorda com os valores encontrados.

Na interpretação da dinâmica hidrológica dos solos, as características intrínsecas das frações condicionam os mecanismos de retenção e movimentação da água. Na correlação entre a textura e comportamento hidrológico do solo, segundo HILLEL (1980), BRADY e WEIL (2004) a areia é reconhecida pelas características de baixa retenção, baixa compactação e alta movimentação. Ao passo que, silte e argila, possuem comportamentos inversos, ou seja, média a alta retenção e compactação e baixa e muita baixa movimentação. Com base na teoria e nas características das frações observadas, deduz-se que a maior movimentação e baixa retenção estejam associadas às áreas florestadas e, o oposto, movimentação mais lenta e alta retenção, na pastagem.

Na movimentação da água no solo, a fração granulométrica não responde sozinha por toda dinâmica, assim, outras propriedades devem ser consideradas como, tal como a estrutura. Os trabalhos de VIEIRA et al (1988), ARAÚJO FILHO e RIBEIRO (1999) e MESQUITA (2004), discutem a influência da estrutura atribuindo a fluidez da água no solo ao arranjo poroso e não da constituição granulométrica. Mesmo assim, a caracterização da granulometria é um suporte aos estudos hidrológicos e as separações dos grãos mais grosseiros dos médios e finos auxiliam na dedução da probabilidade de maior ou menor movimentação e retenção da água no perfil do solo.

Dada a relação para hidrologia das frações finas e mais grosseiras, como areia, as finas foram somadas na tentativa de melhor expressar, numericamente, a relação entre as distintas frações. Nas unidades com cobertura florestada, a soma entre silte e argila não se mostrou expressiva, permanecendo a areia com o dobro Tabela 7. Na agricultura, o somatório se aproximou dos percentuais de areia, mas, na pastagem, a junção de silte e argila ultrapassaram os valores obtidos da areia

total, ampliando a diferença do topo para as camadas mais distantes nos perfis estudados, 40-50 cm, Tabela 7. Nas Figura 43, 44 e 45, estão contidos os valores em percentuais da média das repetições por frações granulométricas nas profundidades do perfil estudadas para cada unidade de resposta hidrológica. Cabe ressaltar que, as médias das repetições serviram para agricultura (Figura 44), URH A1, A2, A3 e A4; na floresta (Figura 43), URH F1, F2, F3, F5 e não na pastagem (Figura 45), onde foram plotados os valores de cada ponto absoluto, uma vez que, este ambiente possui somente uma URH com cinco repetições, consideradas por A,B,C,D e E, apresentado na legenda.

Tabela 7: Valores médios das URHs floresta, agricultura e pastagem com destaque para o somatório de silte e argila.

PROF.	FRAÇÕES	MÉDIA URHF	MÉDIA URHA	MÉDIA URHP
<b>0-10</b>	<b>Areia</b>	70.2	53.92	43.89
	<b>Silte</b>	26.73	32.62	27.76
	<b>Argila</b>	3.03	13.45	28.35
	<b>Silte+argila</b>	<b>29.8</b>	<b>49.07</b>	<b>56.11</b>
<b>10-20</b>	<b>Areia</b>	68.03	49.32	38.08
	<b>Silte</b>	27.81	34.09	26.62
	<b>Argila</b>	4.16	16.59	35.29
	<b>Silte+argila</b>	<b>31.97</b>	<b>50.68</b>	<b>61.91</b>
<b>40-50</b>	<b>Areia</b>	66.89	48.11	38.28
	<b>Silte</b>	26.53	30.16	25.55
	<b>Argila</b>	6.58	21.72	39.17
	<b>Silte+argila</b>	<b>33.11</b>	<b>51.88</b>	<b>64.72</b>

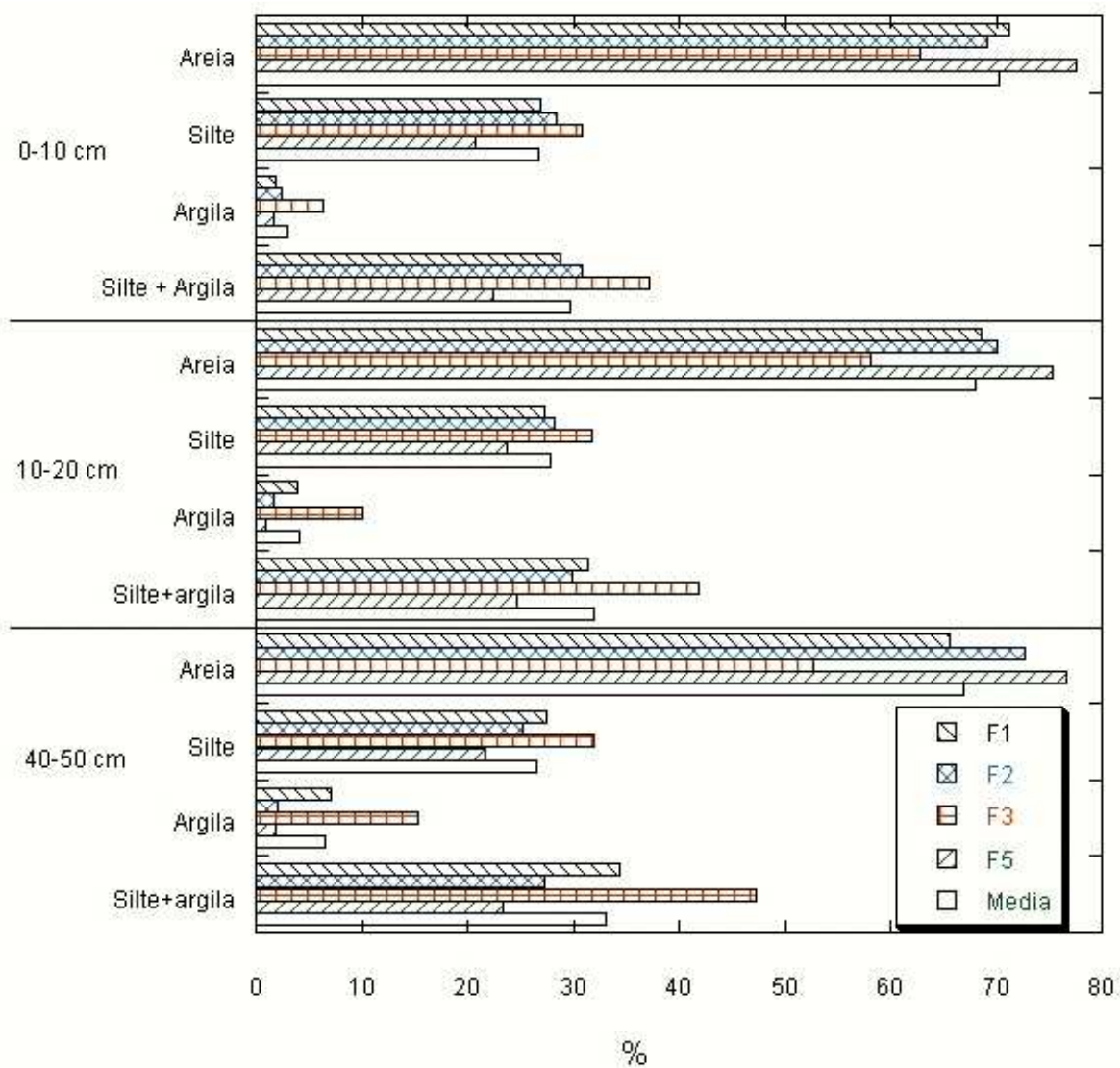


Figura 43: média dos três pontos de repetição para cada URH em área florestada com soma de argila e areia, separada por profundidade.

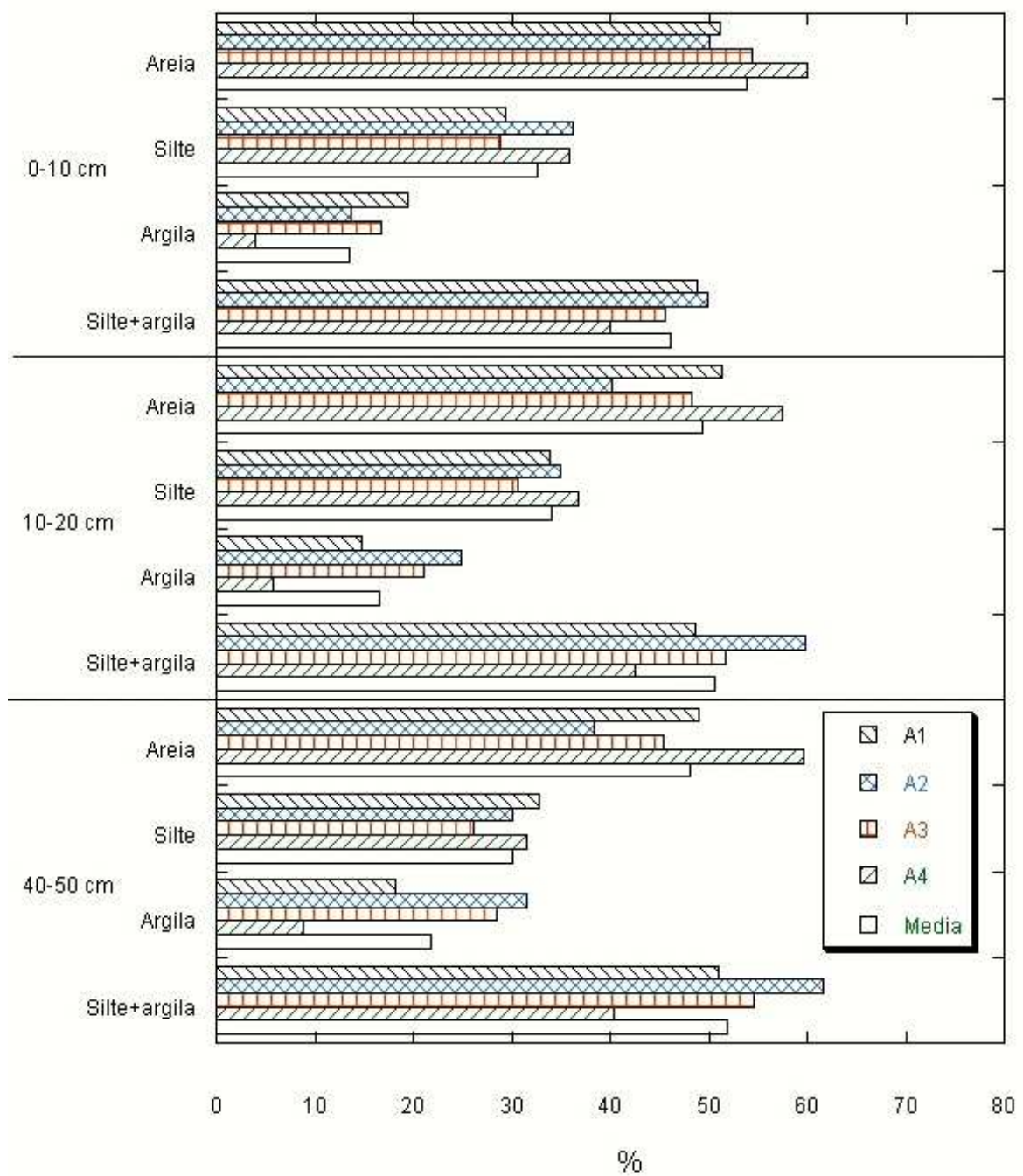


Figura 44: média dos três pontos de repetição para cada URH na agricultura com soma de argila e areia, separada por profundidade.

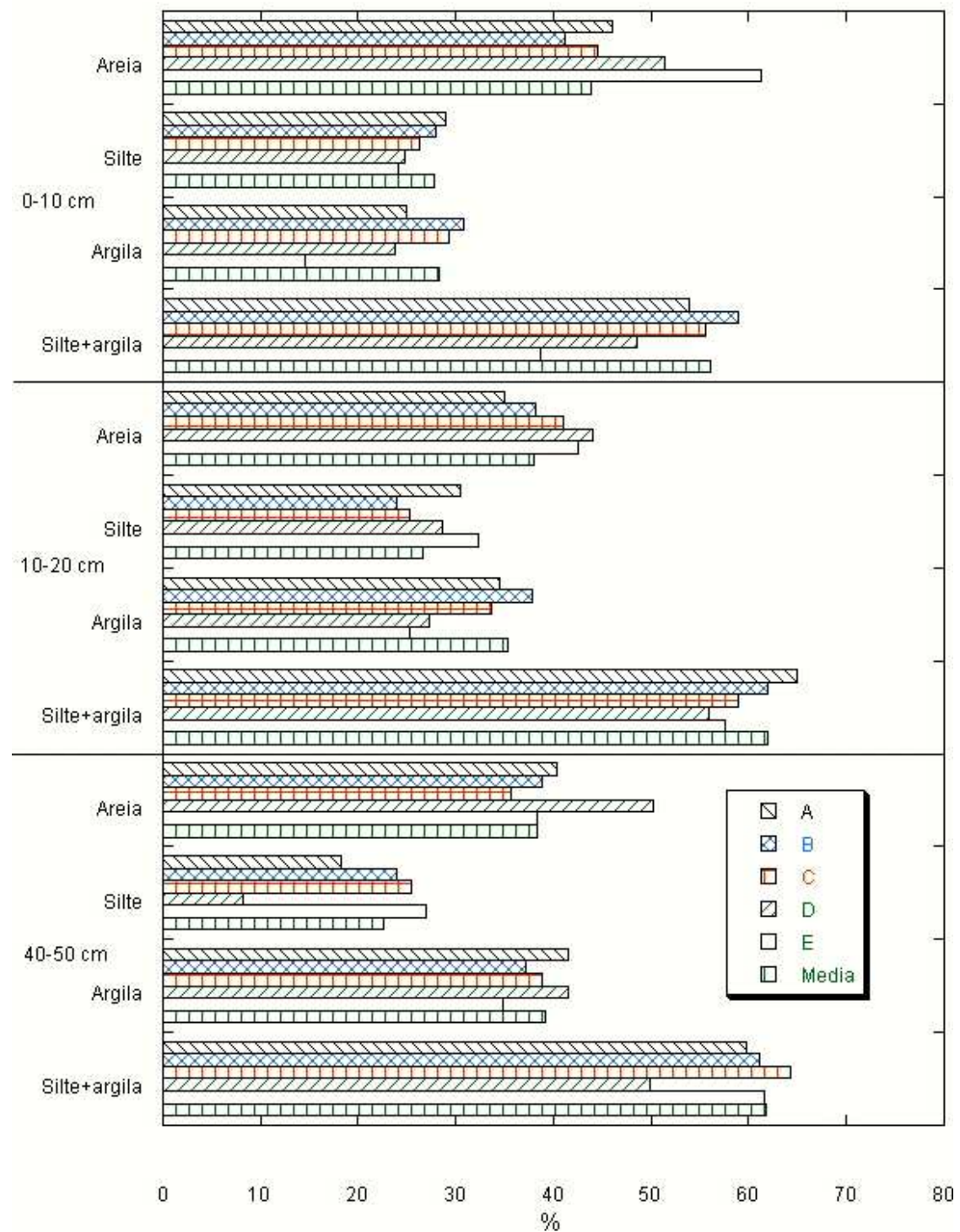


Figura 45: valores totais das cinco repetições da URH pastagem, com média total e soma de argila e areia, separado por profundidade.

### 6.1.2 Densidade real, aparente e porosidade total das Unidades de Resposta Hidrológica

A densidade real ou de partículas nos solos analisados não apresentou variações significativas, segundo análise de variância, com relação às unidades de resposta hidrológica e profundidades. Os valores encontrados variaram entre 2.29 a 2.47 g/cm<sup>3</sup>, concordantes aos verificados por MIRANDA (2008) em ambiente serrano do Rio de Janeiro. Essa é uma propriedade ligada às características intrínsecas do material de origem, não sendo influenciada pelas mudanças de cobertura ou práticas de manejo. No entanto, os resultados obtidos nesta propriedade constituem junto com a densidade aparente (solo), o cálculo da porosidade total. A Tabela 8 apresenta os valores médios de cada URHs, plotados por profundidade do perfil. Concomitantemente, na Figura 46, são apresentados dados com perspectiva de perfil, onde pode ser observada a proximidade dos valores.

Tabela 8: densidade de partículas (real) dos solos das unidades de resposta hidrológica

Prof. (cm)	URHF	URHA	URHP
	g/cm-3		
0-5	2.29	2.46	2.41
15-20	2.43	2.38	2.50
45-50	2.47	2.42	2.47



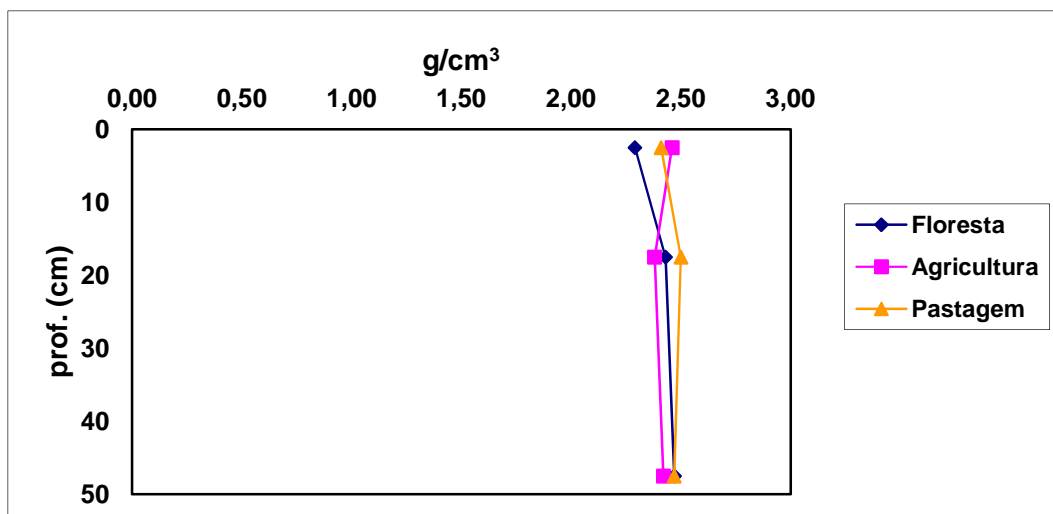


Figura 46: valores médios de densidade de partículas das amostras analisadas em cada Unidade de Resposta Hidrológica.

Os valores encontrados aproximam da densidade de partículas do quartzo, 2.6 a 2.7 g/cm<sup>3</sup> e feldspato com 2,56 g/ cm<sup>3</sup> (HILLEL, 1980), minerais presentes em rochas gnáissicas e graníticas, sendo o quartzo, mais resistente ao intemperismo químico. O menor valor de densidade de partículas foi encontrado nas URHF, 2.29 g/cm<sup>3</sup> podendo ser justificada pela presença de matéria orgânica, que pode influenciar nos dados de densidade, reduzindo, portanto, os valores encontrados como aponta CAVALIERI et al (2009).

Diferente da densidade de partículas, a densidade aparente e a porosidade total são duas propriedades sensíveis a mudança ocorrida na estrutura do solo seja por atividade de manejo ou mesmo pela retirada da cobertura vegetal, influenciando na distribuição e direção dos fluxos de água no solo. Tomando como base a porosidade total, dentre os valores médios das diferentes unidades de resposta hidrológica, a pastagem obteve os menores valores, mantendo-se ao longo do perfil entre 43 e 44%. CAMBRA (1998) em estudo em áreas de pastagem no Vale do Paraíba encontrou valores similares de porosidade total em média encosta, com declividade de 20°, verificando redução da macroporosidade da superfície para profundidade a 60 cm. SOUZA et al (2004), em áreas de substituição de floresta amazônica para atividade de superpastoreio (12 anos),

verificaram redução da porosidade total de 56% para 48% em 0-20 cm, e de 53% para 45% em 20-40 cm, em Latossolos.

Por outro lado, a floresta apresentou os maiores valores na superfície, com média 55% reduzindo para 52% em 45-50 cm, como previsto, em função da atividade biogênica no topo do solo que favorece a formação dos poros, especialmente os macroporos como aponta CASTRO JR (1991). De forma similar, MIRANDA (2008), com o mesmo método utilizado nesta pesquisa (densidades), apresentou porosidade total em área de mata de 40 anos próximo a 60% na superfície, reduzindo na profundidade a 30 cm para 45%. Já NEGREIROS (2006), em encosta florestada no Maciço da Tijuca, identificou porosidade em Floresta secundária tardia com percentuais em torno de 70%, em 0-5 cm e 60%, em 10-15 cm; sendo valores bem próximos encontrados em área de revegetação inicial, entre 60 a 70% da porosidade total.

E na agricultura, observou-se comportamento contrário da floresta, com aumento da porosidade total do topo para maiores profundidades, médias de 53% para 55%, Figura 47. Em diferentes sistemas de manejo no noroeste fluminense, BERTOLINO (2004) encontrou maiores valores em superfície, entre 55 a 65%, com redução para 55% em média na profundidade de 30 cm, constatando a influencia do manejo, principalmente com presença de tração animal, nesta propriedade. Já em POTT e DE MARIA (2003) em áreas de plantio direto sob culturas anuais em solos de textura média, encontrou valores a 40% de porosidade, sem variações de 0 a 40 cm. Em CAVALIERI et al (2009), encontra-se valores similares ao encontrados nesta pesquisa, em torno de 55% de porosidade total, com redução em 20-30 cm, sugerindo formação de crosta mantida como consequência do uso sob cultivo convencional ao longo dos anos. Os autores afirmam que a troca de manejo (convencional para direto), melhorou a qualidade do sistema poroso, não aumentou o percentual, mas, reduziu a densidade e aumentou a macroporosidade, tendo reflexos na hidrologia dos solos.

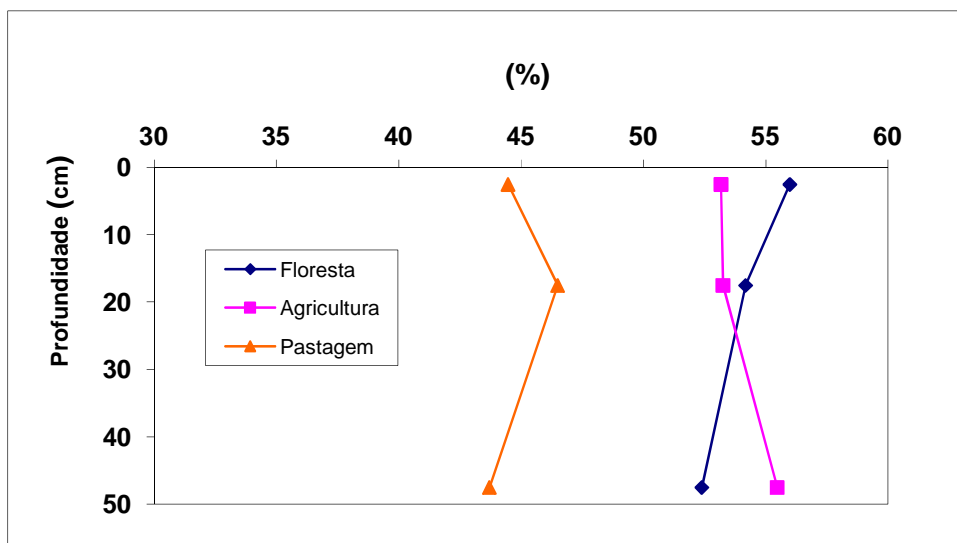


Figura 47: valores médios de porosidade total das URHF e URHA com valor bruto da URHP com relação às profundidades, em função de amostragem única na pastagem.

Diferenças inter URHs devem ser apontadas uma vez que auxiliam na interpretação da dinâmica hidrológica dos solos analisados na bacia do Bonfim. Com isso, no total da porosidade vista em F2 e F5, os resultados se enquadraram ao comportamento da média, com alta porosidade na superfície, acima de 60%, com redução nas demais profundidades, Tabela 9. No entanto, em F1 e F3 verificou-se valores similares aos encontrados na pastagem e agricultura, respectivamente, tornando os valores das médias das URHFs próximos aos da agricultura.

A presença de maior percentual de areia em F2 e F5 contribui para maior porosidade encontrada nestes ambientes. Em F2, mesmo apresentando tempo de recuperação menor que em F5 (25 e 40 anos), os solos sob a unidade são bem rasos, não ultrapassando 60 cm de profundidade, com contato abrupto com a rocha em meio à intensa malha de raízes. A soma dos fatores pode ter contribuído para o aumento da porosidade total, especialmente na macroporosidade, contendo esta unidade florestada, os maiores valores.

Já na agricultura, a porosidade total das unidades individualizadas ficou concordante aos valores das médias. Em A3 e A4 há redução de 5% na

porosidade de 0-5 para 15-20 cm, sugerindo adensamento dessa camada em resposta ao manejo com uso de maquinários, como apontado por BERTOLINO (2004) e CAVALIERI et al (2009).

Com exceção de A1 que apresentou aumento próximo de 10% na profundidade de 15-20 cm, podendo ser justificado pelo revolvimento do solo ocorrido em dias próximos a coleta das amostras neste ambiente. Outro fator de destaque em A1 e A2, notificada em campo, foi a manutenção de biomassa que adicionada ao solo auxilia no percentual de matéria orgânica uma vez que, solos mais arenosos como no Bonfim, podem perder matéria orgânica com mais facilidade (TROEH e THOMPSON, 2007). Tal fato, foi acusado nos estudos de LIPIEC et al (2006) que com altos valores de matéria orgânica em manejo convencional perceberam maior formação de agregados nas camadas próximas a superfície, beneficiando a entrada de água, em detrimento ao plantio direto.

Tabela 9: valores brutos com média de densidade aparente das unidades de resposta hidrológica

Porosidade total (%)											
Unidade de Resposta Hidrológica											
Prof. (cm)	Floresta					Agricultura					Pastagem
	F1	F2	F3	F5	F Média	A1	A2	A3	A4	A Média	P1
0-5	46.19	62.41	51.90	63.45	55.99	51.27	54.45	54.44	52.54	53.17	44.47
15-20	47.16	62.22	56.36	50.99	54.18	59	55.85	50.20	47.40	53.25	46.50
45-50	46.36	56.02	59.78	47.39	52.39	51.14	58.48	55.23	57.03	55.47	43.70

Estatisticamente, na análise de variância (ANOVA) realizada nos dados de porosidade total sem distinção de profundidade, foram apontadas diferenças significativas, com  $P_{valor}$  de 0.026 com grau de confiabilidade acima de 90%. No teste de comparação de múltiplas comparações entre as médias, diferenças significativas foram encontradas entre pastagem-floresta, pastagem-agricultura, no entanto, essa diferença não foi vista entre agricultura-floresta, Figura 48. Na

variância separada pela profundidade e tipo de uso, não foram identificadas diferenças significativas. O Box plot (Figura 48) apontou maior amplitude de distribuição dos dados na floresta, e o menor, na pastagem, abaixo de 50%. No entanto, a mediana da floresta e pastagem é similar, ilustrando a ausência de diferenças encontradas pelo teste TUKEY.

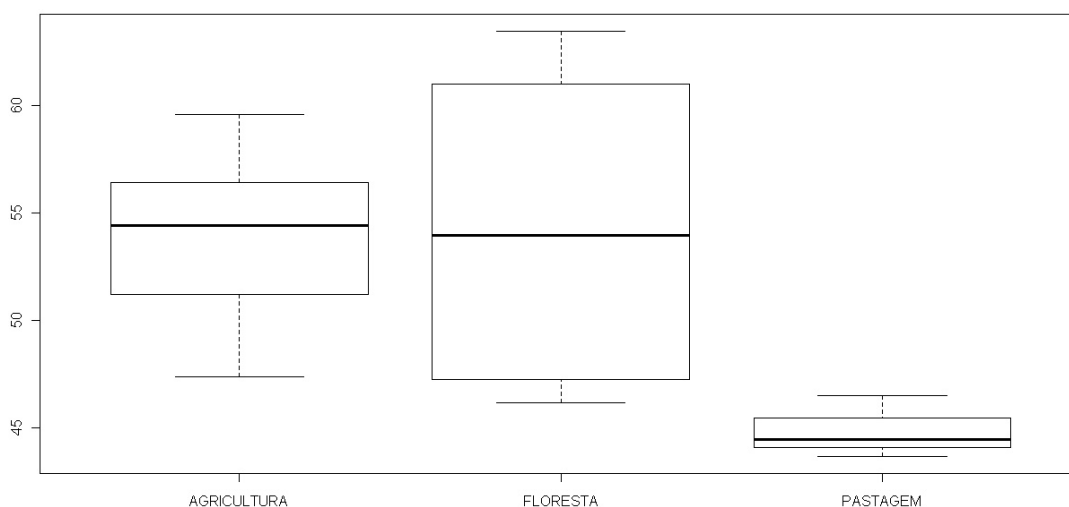


Figura 48: Box plot dos valores, em percentual, de porosidade total divididos por tipo de uso, sem distinção de profundidades.

Concomitantemente, a redução da porosidade total leva ao adensamento do solo sendo estas propriedades diretamente proporcionais. Assim, a densidade aparente das unidades de resposta hidrológica pastagem, como previsto,  $1.34 \text{ g/cm}^3$  em 0-5 e 15-20 cm e,  $1.39 \text{ g/cm}^3$ , verificando aumento da superfície para camada mais interna, concordante com valores encontrados em CAMBRA (1998), com variações de  $1.40$  a  $1.48 \text{ g/cm}^3$  em área de pastagem. O adensamento da superfície da URHP pode ser visto na Figura 49. O aumento da densidade na profundidade de 50 cm pode ter duas justificativas, influencia da exploração intensiva do solo na área que, possui histórico agrícola, seguida de roseiral e por fim, pastagem; ou pelo aumento da fração argila adensando a camada mais distante da superfície com formação de microporos.



Figura 49: Adensamento da camada superficial da URHP, com redução da porosidade total.

Na floresta, a densidade do solo foi menor em superfície, com média entre as URHF de  $1.01 \text{ g/cm}^3$  e  $1.18 \text{ g/cm}^3$  em 45-50 cm. No entanto, percebeu-se aumento da densidade nas profundidades de 15-20, para  $1.12 \text{ g/cm}^3$  igualando aos valores obtidos na mesma profundidade em áreas agrícolas.

Em MIRANDA (2008) a densidade do solo em área de floresta (40 anos) na superfície foi menor que  $1,0 \text{ g/cm}^3$  aumentando o adensamento do topo a profundidade de 30 cm, alcançando  $1,2 \text{ g/cm}^3$ , próximo aos valores encontrados nesta pesquisa na media de 50 cm. Já em tabuleiro costeiro, em mata subperenifólia, como aponta SILVA et al (2005) a densidade do solo mesmo com percentuais menores nas áreas de mata que em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar, a densidade aparente, foi de  $1,29 \text{ g/cm}^3$  no topo, atingindo  $1,38 \text{ g/cm}^3$  m 80 cm do perfil. Destaca-se que a tendência foi mantida nos distintos ambientes, confirmando aumento da densidade no interior do solo, onde a atividade biológica torna-se menos atuante ou ausente.

Vale considerar que, MEDINA (1985) avaliando os efeitos da derrubada de mata e enleiramento na Amazônia, através dos parâmetros de densidade do solo e infiltrabilidade após um ano de substituição de cobertura, não verificou diferença significativa na densidade do solo da área modificada com a preservada, na

parcelas estudadas. Os valores da mata virgem se enquadraram de 1.15 a 1.12 g/cm<sup>3</sup> e, no enleiramento mecanizado, 1,22 a 1.20 g/cm<sup>3</sup> em do topo para 30 cm. No entanto, a taxa de infiltração foi afetada, sugerindo mudança na forma da porosidade de macro para microporosidade não influenciando na densidade do solo, no tempo analisado.

Entre a pastagem e floresta, a agricultura foi o tipo de uso intermediário nesta propriedade, reduzindo a densidade do topo para profundidade de 45-50 cm, com valores médios de 1.15, 1.11, 1.08 g/cm<sup>3</sup> em resposta ao aumento da porosidade total. No mesmo comportamento, em plantio de cana-de-açúcar, MEDINA (2005) encontrou maiores valores em superfície com relação à profundidade de 40 e 80 cm, no entanto, em solos no tabuleiro costeiro, a densidade variou de 1,61 para 1,55 g/cm<sup>3</sup>, acima dos encontrados na região serrana com plantio de hortaliças, sendo os primeiros mais argilosos. Em sistema de rotação anual em São Paulo, em solos de textura média, a densidade foi concordante aos do tabuleiro costeiro, superiores ao encontrados nesta pesquisa, de 1.55 para 1.45 g/cm<sup>3</sup>, porém, a tendência torna-se equivalente mantendo a superfície mais densa, influenciando a infiltração na superfície.

CAVALIERI et al (2009), como na porosidade total, apresentou valores similares aos encontrados, variando entre 1,12 a 1,17 e máximo de 1,23 g/cm<sup>3</sup> na camada de 20 cm. Na Figura 50, apresenta-se o gráfico com valores médios das unidades de resposta hidrológicas floresta, agricultura e pastagem plotados por profundidade.

Os valores médios das densidades dos solos serviram como base para panorama geral do estado do solo, no entanto, respondendo a porosidade total, algumas particularidades típicas de ambientes heterogêneos e formas de manejo aparecem, cabendo serem discutidas pois podem auxiliar na interpretação da dinâmica hidrológica dos solos.

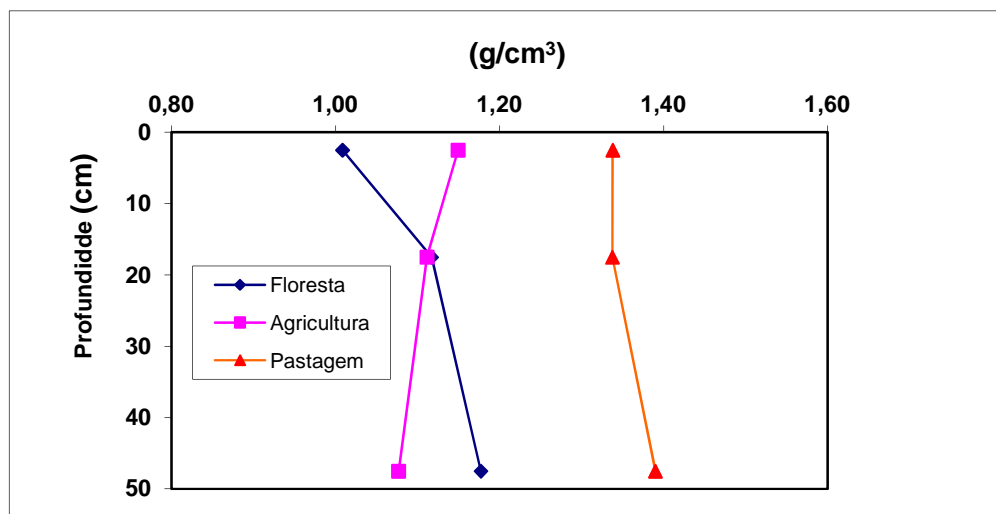


Figura 50: Valores médios de densidade aparente nas Unidades de Resposta Hidrológica

Com os dados da Tabela 10, a densidade aparente de F1 ficou próxima aos valores encontrados nas áreas agrícolas na profundidade de 0-5 cm e, da pastagem nas demais profundidades. Similar comportamento foi visto em 0-5 cm de F3, mas com redução do adensamento do solo nas outras profundidades. Já em F2 verificou-se a mais baixa densidade do solo das áreas florestada em todo perfil e em F5, houve adensamento em torno de 30% de 0-5 para 45-50 cm. Valores de granulometria não justificam o aumento da densidade nestes ambientes florestais, principalmente em F1. No entanto, a reestruturação das propriedades físicas neste ambiente pode não ter sido atingida, como já comentado, F1 encontra-se em recuperação pós-atividade agrícola, sendo a sua cobertura menos adensada que F5, com recuperação de 40 anos. Clareiras são vistas e a contribuição das espécies a formação de serrapilheira é visualmente reduzida, quando comparada com demais ambientes. Na Figura 51, apresenta-se uma fotografia da superfície de URHF1.

Na agricultura, duas unidades tiveram densidade aparente maior em 15-20, A3 e A4, ao passo que A2 reduziu em 20% de 0-5 a 45-50 cm. Em A1, duas medidas foram similares, 0-5 e 45-50cm, no entanto, a profundidade de 15-20 cm foi 20% menor, opondo-se ao visto em A3 e A4, na mesma profundidade.



Tabela 10: valores brutos com média de densidade aparente das Unidades de Resposta Hidrológica distribuídos pelas profundidades

Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )											
Unidade de Resposta Hidrológica											
	Floresta					Agricultura					Pastagem
Prof. (cm)	F1	F2	F3	F5	F Média	A1	A2	A3	A4	A Média	P1
0-5	1.21	0.84	1.16	0.83	1.01	1.20	1.15	1.11	1.13	1.15	1.34
15-20	1.34	0.87	1.05	1.21	1.12	0.99	1.05	1.20	1.21	1.11	1.34
45-50	1.34	1.03	1.02	1.32	1.18	1.19	0.99	1.08	1.05	1.08	1.39



Figura 51: Superfície em URHF1, horizonte orgânico com 3 centímetros, menor acúmulo de serrapilheira com relação a URHF5.

Na análise de variância com base nos diferentes tipos de uso, incluindo todas as profundidades, foram encontradas diferenças significativas entre os tipos de cobertura foram apontadas na análise de variância, com P valor em 0.0264, com grau de confiabilidade de 90%. No teste Tukey, foram identificadas diferenças significativas entre a pastagem-floresta e pastagem-agricultura, mas, com relação à floresta-agricultura, não apresentaram diferenças significantes, com grau de 95% de confiabilidade. Na Figura 52, são representados dados de densidade do

solo divididos em tipo de uso, sem distinção de profundidade, como no primeiro teste estatístico. Nota-se que a maior distribuição dos dados na floresta, no entanto, a mediana da floresta e agricultura é praticamente igual, representando a análise do teste Tukey, que não encontrou diferenças significativas entre essas coberturas. E a pastagem, apresenta-se superior.

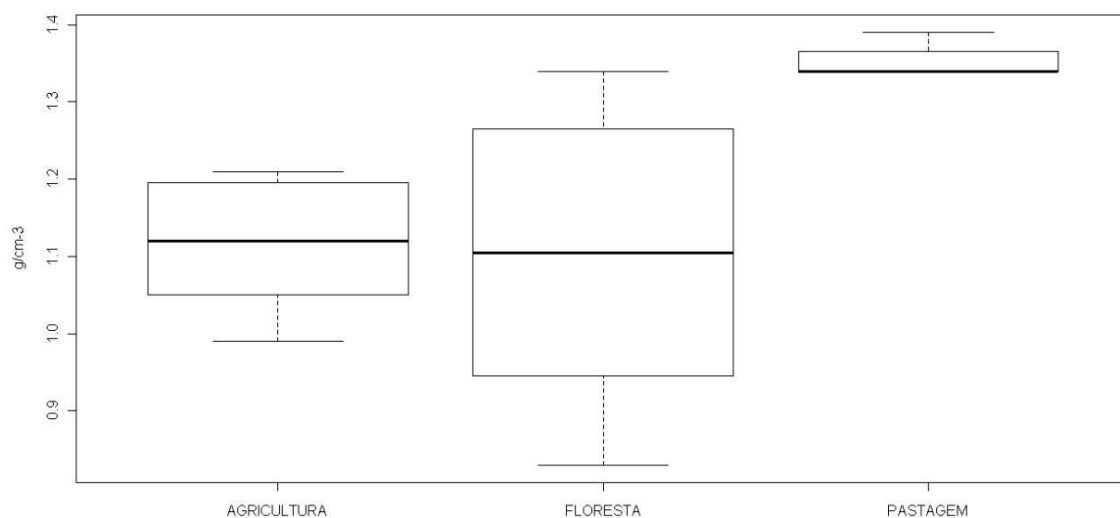


Figura 52: Box plot dos dados de densidade aparente separados por tipo de uso e cobertura.

Estatisticamente, nos testes realizados separando as profundidades, não foram encontradas diferenças significativas com relação às profundidades do solo entre os tipos de uso e cobertura, tanto para ANOVA quanto em TUKEY.

## **6.2 Análise das propriedades hídricas nas unidades de resposta hidrológica**

### **6.2.1 Taxa de infiltração básica (TIB)**

O comportamento da taxa de infiltração no tempo analisado apresentou a seguinte ordem decrescente floresta>agricultura>pastagem, concordante com o previsto com base na literatura, em geral. Os dados da Tabela 11 a seguir, apresentam os valores brutos da taxa de infiltração básica mensurados nas unidades de resposta hidrológica, seguindo a avaliação da influencia do tipo de uso e cobertura na hidrologia dos solos. Paralelamente, foram inseridos os valores de média das repetições com o desvio padrão.

As taxas de infiltração básica das unidades com cobertura florestadas e agrícolas podem ser consideradas como muito alta, pois ultrapassam os indicados em REICHARDT (1987) para esta classe com velocidade superior a 3 cm/h de infiltração. Por outro lado, a pastagem é considerada como muito baixa, enquadrando na classificação do autor supracitado com velocidade de infiltração menor que 0,1 cm/h.

Comparando a floresta com agricultura, os maiores valores foram encontrados na floresta, como esperado, atingindo 144 cm/h ao passo que, o máximo na agricultura atingiu 72 cm/h, observando os dados brutos ou absolutos, sendo a floresta duas vezes maior que a agricultura. Com relação à média, na floresta houve variação de 50 a 132 cm/h enquanto na agricultura, 3 a 40 cm/h, mantendo a diferença de duas a três vezes a TIB dos ambientes florestados com relação à agricultura. Já na pastagem os resultados foram muito baixos para o tempo de medição de 120 minutos, ampliando a diferença entre os tipos de cobertura para TIB. Comparando os resultados da pastagem com agricultura e floresta, pode-se considerar que a TIB foi de 2 a 100 vezes maior, afinal, a

infiltração vista na pastagem foi próxima a zero, com base na sensibilidade do equipamento utilizado, infiltrômetro.

Tabela 11: dados totais da taxa de infiltração básica (TIB) dos pontos mensurados nas unidades de resposta hidrológica seguida das médias de cada unidade e desvio padrão (DP) correspondente.

URHF	TIB (cm/h)	MÉDIA E DP	URHA	TIB (cm/h)	MÉDIA E DP	URHP	TIB (cm/h)	MÉDIA E DP
F1	60	50 (12,48)	A1	12	40 (30,19)	P1	0,1	0,06(0,05)
	54			36			0,1	
	36			72			0	
F2	36	100 (56,70)	A2	36	40 (6,92)			
	144			48				
	120			36				
F3	144	132 (20,78)	A3	0	3 (3,46)			
	144			6				
	108			0				
F5	72	84 (36)	A4	30	26 (6,92)			
	36			30				
	144			18				

Na Figura 53 apresentada em gráfico do tipo *box plot*, foram plotados os valores absolutos da TIB o que permitiu qualificar a distribuição e relação entre os dados de infiltração dos tipos de uso. A partir disso, nota-se que na floresta, além de apresentarem as maiores taxas, a amplitude também foi maior, quando comparada a agricultura. A mediana dos dados da agricultura toca o valor mínimo dos dados da floresta contidos no primeiro quartil e, os seus valores máximos não atingem a mediada das unidades florestadas. A pastagem, próxima a zero assemelha-se ao 1º quartil da agricultura.

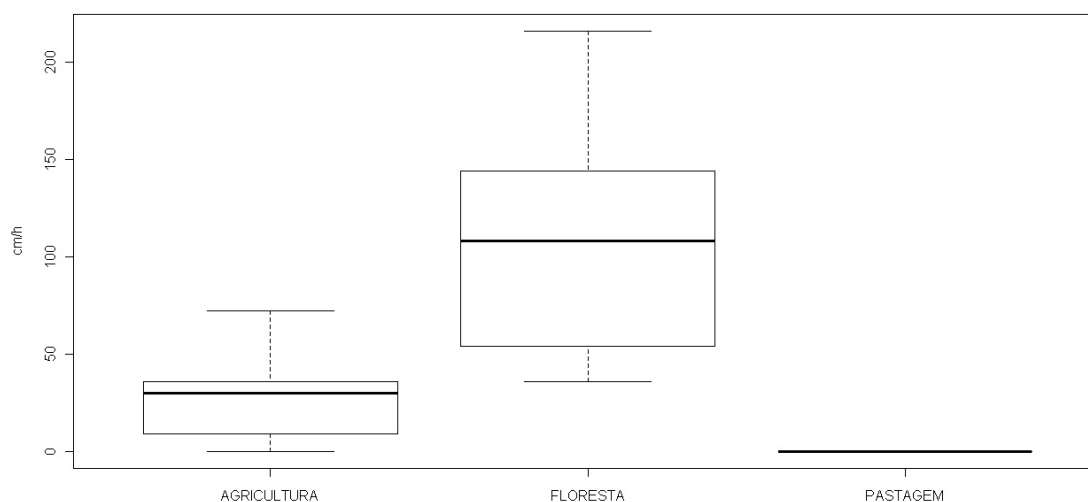


Figura 53: Box plot das taxas de infiltração básica das unidades de resposta hidrológica agricultura, floresta e pastagem com relação aos valores totais encontrados.

Estatisticamente, foram encontradas diferenças significativas entre as URHs ( $P_{\text{valor}} = 0.0002877$ ) na análise de variância (ANOVA), sendo que, na comparação múltipla de médias (TUKEY), não foram encontradas diferenças significativas entre agricultura-pastagem com relação à pastagem-floresta, agricultura-pastagem que foram diferenciadas. A alta variabilidade espacial intrínseca a propriedade hídrica analisada e principalmente, a proximidade de alguns resultados da floresta com a agricultura, como na URHF1 com TIB próxima as obtidas na agricultura, pode ter gerado a ausência de diferenças significativas.

Maiores esclarecimentos acerca dessa similaridade entre floresta-agricultura são feitos perante o aumento da amostragem uma vez que, diversos autores afirmam que, pela retirada da cobertura e manejo do solo, diferenças entre as dois tipos de coberturas tornam-se relevantes (SOUZA et al, 2004; SILVA et al, 2005; BORMAN e KLAASSEN, 2008). Por outro lado, o fato da cobertura florestada do Bonfim compor áreas de recuperação, advindas de intensas e prolongadas atividades agrícolas, as características dessa exploração pode deflagrar nesses resultados, como mensurado em F1.

Observando a URHF1 notou-se que as três repetições foram similares a agricultura, ao contrário das outras unidades florestais que tiveram uma das repetições próxima à agricultura, em meio a outros valores acima 100 cm/h. Já em URHF3 foram registrados valores de TIB superiores a 100 cm/h nas três repetições.

Os resultados de F1 correspondem aos encontrados na densidade do solo e porosidade total (discutido no item 6.1.2.) os quais, estiveram abaixo dos encontrados nas outras unidades florestadas e, por conseguinte, mais próximos das áreas agrícolas. A declividade mais acentuada desta encosta, o menor desenvolvimento da cobertura vegetal após 25 anos, com aspecto similar a capoeira, associada à baixa formação da serrapilheira e o maior adensamento do solo com redução da porosidade, podem ter conduzido a diminuição dos valores de TIB. A diferença entre floresta e capoeira na TIB foi vista em ANTONELI e THOMAZ (2009) que verificaram redução de aproximadamente 30%. Do mesmo modo, COSTENARO et al (2009) identificaram em torno de 40% de diferença na infiltração de duas matas em estágios distintos de regeneração.

As florestas apresentam as maiores taxas de infiltração pela manutenção de ambiente favorável a organização dos poros, os quais conduzem água para o interior do solo. Sobre isto, HARDEN E SCRUGGS (2003) nos seus estudos acerca das florestas em ambientes montanhosos, em três diferentes países buscando correlacionar a influencia da topografia, solo e cobertura na dinâmica da água, puderam constatar a importância das florestas tropicais no aumento da infiltração e na denudação do relevo. Esse controle serve de base a manutenção de produção de água pelas nascentes e canais de primeira ordem, que aparece no Bonfim, como agente motivador da recuperação florestal, uma vez que, todo abastecimento das comunidades e da produção agrícola é realizada por captação direta.

O extremo da infiltração é visto na pastagem, embora, em BORMANN E KLAASSEN (2008) tenham obtido dados onde a pastagem apresenta infiltração na

superfície superior a 20% dos valores da floresta e 100% com relação à agricultura. Neste caso, os autores expuseram que, na floresta, uma camada de impedimento por eluviação foi formada, reduzindo a entrada de água e, a agricultura é realizada sob forte mecanização, o que tem alterado significativamente a superfície, deixando-a compactada. Comparando floresta com pastagem, JORDÁN et al (2008) identificaram redução de 15% na infiltração dada mudança do primeiro ambiente para o segundo em termos de cobertura. Nas mesmas coberturas, ANTONELI e THOMAZ (2009), encontraram redução de 70% e, no solo franco-arenoso nos estudos de BORMANN E KLAASSEN (2008), a redução da floresta temperada para a pastagem foi de 120%. De fato, em se tratando do processo de infiltração, a pastagem é o tipo de uso com menor taxa de infiltração podendo, sobre forte volume de chuva, desencadear intensos processos erosivos. Além desses autores, EGUCHI et al (2003), em Lavras, realizando ensaios somente em pastagem para aplicação de técnicas de geoestatística para extrapolação de áreas, encontrou em média o valor de 7,25 cm/h, sete vezes maior que o encontrado pela pesquisa sendo menor somente em BORMANN E KLAASSEN (2008) que encontraram 38,42 cm/h.

A compactação do solo por pisoteio e sucessões de cultivos e manejos inadequados gera alta densidade do solo, responsável pela redução do espaço poral das partículas. Fato este que compromete a entrada de água e os movimentos gravitacionais da água no solo.

Entre os dois extremos (floresta-pastagem), a agricultura tem seu papel intermediário quanto à redução da infiltração, como indica os artigos, em função do uso intensivo de maquinário desacompanhado, em geral, por atividades de conservação, como encontrado no Bonfim. SILVA et al (2005) embora tenha recorrido a técnicas laboratoriais, encontraram redução de 50% dos valores de mata, em tabuleiros costeiros, com relação aos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. Exatamente na mesma porcentagem, SOUZA et al (2004) em sistema amazônico verificou redução da infiltração da floresta para as plantações

de milho. No entanto, cabe considerar que, ANTONELI E THOMAZ (2009) verificaram maiores taxas de infiltração na plantação de aveia, sendo 10% superior que a floresta com araucária. Os autores atribuem o resultado aos benefícios da aeração do solo a curto prazo, uma vez que a terra revolvida há aumento da infiltração, instantaneamente. No entanto, como o infiltrômetro é um instrumento de superfície, não foi possível identificar efeitos de médio e longo prazo na formação da camada de impedimento (pé-de-arado), constituída pelo constante uso de maquinário, como foi visto no trabalho de BERTOLINO (2004).

Cabe considerar que, pela grande amplitude e diversidade dos dados entre os apresentados na literatura e aqueles da pesquisa apresentada, a confrontação foi realizada a partir de análise em percentuais atribuídos a redução ou aumento da taxa de infiltração básica. Com exceção de COSTENARO et al (2009) e SILVA et (2005), os outros dados, mesmo os de mesma metodologia, não aproximaram dos mensurados nesta pesquisa. Na Tabela 12, foram reunidas informações gerais e reais dos resultados dos artigos indicando a autoria, localização da pesquisa, tipo de uso, textura do solo, método utilizado, valor de TIB e interpretação em percentual, a qual foi utilizada na discussão.

Os dados mensurados podem estar superestimados em função do tempo de observação do processo no campo. Para otimizar tempo acrescido do objetivo de extrair a TIB e não a curva de infiltração, optou-se pelo cessar quando o sistema entrasse em equilíbrio, através fluxo constante. No geral, os ensaios tiveram duração de 45 a 60 minutos com exceção da pastagem e em F3, com 150 minutos aproximados. THOMAZ (2008) recomenda que o infiltrômetro seja usado para comparar a taxa de infiltração entre sistemas de usos ou como medida indireta de compactação do solo, que é justamente o que se propõe este trabalho.



Tabela 12: Dados acerca da autoria, tipo de uso, textura, método, resultados de TIB e análise em percentual dos artigos escolhidos para discussão dos dados.

AUTORES/ LOCALIZAÇÃO	TIPO DE USO	TEXTURA	MÉTODOS	TIB (CM H-1)	ANÁLISE QUALITATIVA
JORDÁN et al. (2008) - Espanha (Mediterrâneo)	Vegetação de altitude	Franco-argilo-arenosa	Indireto - Diferença entre precipitação simulada e escoamento superficial	4.50	Pastagem teve 15% de redução da infiltração com relação a floresta de carvalho e mista
	Floresta de Carvalho	Franco-arenosas		4.63	
	Misto de carvalho e oliveira	Franco-argilosas		3.12	
	Pastagem	Argilo-arenosas		2.93	
BORMAN e KLAASSEN(2008) Alemanha	Floresta temperada	franco-arenosas /	direto - infiltrmetro de anel duplo	16.65	Floresta- 20% > agricultura e 120% > pastagem
	agricultura (milho)			12.97	
	pastagem			6.8	
	Floresta temperada	areia franca (estudados dois tipos de solos-com mesmo uso)		33.24	Pastagem 20% > floresta, e 100% maior que agricultura.
	agricultura (milho)			3.12	
	pastagem			38.42	
HARDEN e SCRUGGS (2003) Equador - USA - Porto Rico	Equador- Floresta Tropical	franca	Infiltrmetro de anel com simulador de chuva acoplado	0 a 20.6	O máximo visto no Equador foi 100% maior que Porto Rico e EUA
	Porto Rico - Floresta Tropical	argilosa		0 a 10.6	
	EUA- Floresta temperada mista	franco-siltosa		1.6 a 11.7	
ANTONELI e THOMAZ (2009) Brasil (Paraná)	Floresta com araucaria	sem dados	infiltrmetro de anel duplo	2.46	A pastagem teve redução acima de 70% com relação a floresta, reflorestamento, erva-mate e agricultura, e proxima a 50% na capoeira e faxinal
	reflorestamento eucalipto			2.41	
	capoeira			1.80	
	faxinal			1.98	
	erva-mate			2.31	
	agricultura (aveia)			2.80	
	pastagem			0.75	

AUTORES/ LOCALIZAÇÃO	TIPO DE USO	TEXTURA	MÉTODOS	TIB (CM H-1)	ANÁLISE QUALITATIVA
SOUZA et al (2004) Brasil -Amazônia	Floresta com araucaria	argilosa	infiltrômetro de anel duplo	3.4	A pastagem reduziu em 80% (aprox.) em relação a floresta, seguida da laranja e pupunha. A agricultura (milho) reduziu em 20%.
	capoeira			2.9	
	guaraná			2.7	
	milho			1.8	
	laranja			0.8	
	pupunha			1.0	
	pastagem			0.5	
EGUCHI e tal (2003) Brasil - Lavras (MG)	pastagem	solos aluviais	Permeâmetro de Guelph	7.25	Estudo de variabilidade espacial
COSTENARO et al(2009) Brasil - Viçosa (MG)	Mata- recuperação avançada	franco arenosos	Infiltrômetro de Anel - modelo Turf Tec	117.5	Mata recente regeneração foi 40% menor que a avançada, e mais de 100% com relação a trilha
	Mata - recuperação recente			79.0	
	trilha			20.8	
SILVA et al (2005) Brasil -Alagoas	Mata	argilosa	Método indireto - permeâmetro de carga constante de laboratório	130	Houve redução de 50% da mata para os cultivos com maior infiltração em sistema de vinhaça
	Cana-de-açúcar (sequeiro)			58	
	Cana-de-açúcar (irrigado)			60	
	Cana-de-açúcar (vinhaça)			62	
ZIMMERMANN et al. (2006) Brasil - Rondônia	Floresta	Franco-arenosa	Infiltrômetro de Tensão (hood infiltrometer)	153,3	A pastagem teve TIB 79% menor que a floresta nativa. Da floresta para clareira a redução foi de 10%, banana aprox. 35%, capoeira 45% e replantio, próximo a 50%
	clareira com pastagem			129,5	
	Banana			111,5	
	capoeira			103,3	
	Teca ( <i>T. Grandis</i> ) replantio			83,4	
	pastagem			12,2	

### 6.2.2 Condutividade Hidráulica Saturada ( $k_{sat}$ )

A condutividade hidráulica saturada foi obtida através de 58 ensaios de campo seguindo a proposta de ELRICH et al (1989) baseada na aplicação de uma carga hidráulica (H) em solos heterogêneos. Nestes ambientes heterogêneos, como em encostas íngremes e em ambiente serrano, pode ser comum a produção de valores irreais, como em VIEIRA (2001) que teve 43% dos seus resultados com valores negativos, quando utilizou a análise de Richards, com duas cargas hidráulicas. Assim, os resultados produzidos nesta pesquisa derivam de mensurações com carga hidráulica única de 10 cm, detalhado no capítulo 5.

Em geral, os dados de  $k_{sat}$  resultantes dos 58 ensaios realizados nas diferentes URH oscilaram nas magnitudes de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  cm/s, contendo valor máximo de  $2.66 \times 10^{-4}$  e mínimo,  $7.89 \times 10^{-7}$  cm/s (Tabela 13). Na Figura 54, os resultados foram distribuídos em gráfico de dispersão, demonstrando a concentração dos dados entre  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s.

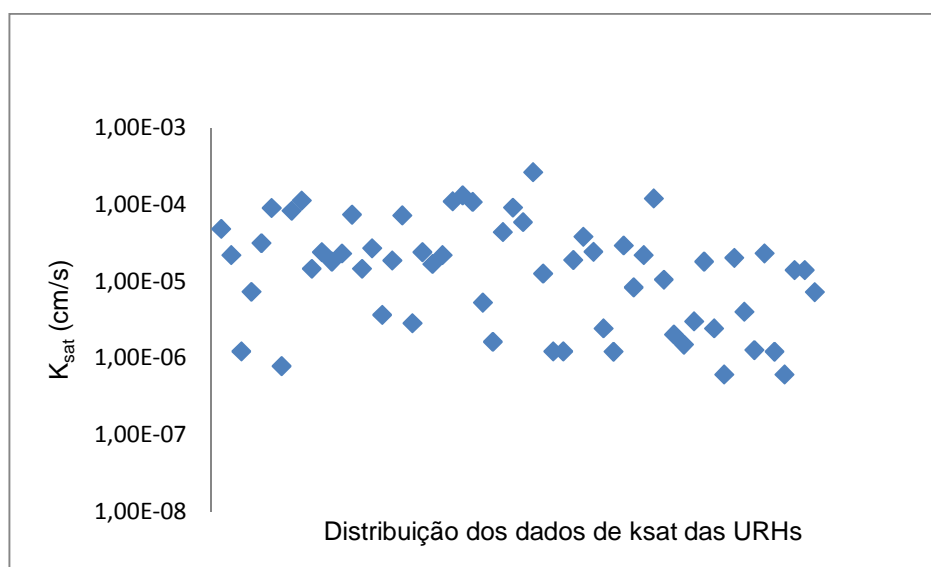


Figura 54: Dispersão dos dados individuais de  $k_{sat}$  obtidos em diferentes URH e profundidade

Tabela 13: Dados totais de  $k_{sat}$  com média das repetições de cada URH divididos nas profundidades mensuradas

DADOS BRUTOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DAS URH (cm/s)											
URH	Repetições	20 cm	50 cm	URH	Repetições	20 cm	50 cm	URH	Repetições	20 cm	50 cm
F1	A	4.86E-05	7.46E-05	A1	A	5.32E-06	2.45E-06	P1	A	6.13E-07	1.22E-06
	B	2.21E-05	1.47E-05		B	1.64E-06	1.22E-06		B	2.04E-05	6.13E-07
	C	1.23E-06	2.72E-05		C	4.42E-05	2.95E-05		C	4.04E-06	1.41E-05
	MÉDIA	2.40E-05	3.88E-05		MÉDIA	1.71E-05	1.11E-05		D	1.28E-06	1.41E-05
	DP	2.37E-05	3.16E-05		DP	2.36E-05	1.60E-05		E	2.33E-05	7.30E-06
F2	A	7.36E-06	3.68E-06	A2	A	9.21E-05	8.39E-06				
	B	3.17E-05	1.88E-05		B	5.95E-05	2.21E-05				
	C	9.09E-05	7.27E-05		C	2.66E-04	1.21E-04				
	MÉDIA	4.33E-05	3.17E-05		MÉDIA	1.39E-04	5.05E-05				
	DP	3.14E-05	3.63E-05		DP	1.11E-04	6.14E-05				
F3	A	7.89E-07	2.86E-06	A3	A	1.27E-05	1.06E-05				
	B	8.37E-05	2.42E-05		B	1.23E-06	2.04E-06				
	C	1.14E-04	1.69E-05		C	1.23E-06	1.51E-06				
	MÉDIA	6.62E-05	1.47E-05		MÉDIA	5.05E-06	4.72E-06				

	DP	5.86E-05	1.08E-05		DP	6.62E-06	5.10E-06				
<b>F5</b>	A	2.42E-05	1.11E-04	A4	A	1.91E-05	3.02E-06				
	B	1.82E-05	1.33E-04		B	3.84E-05	1.82E-05				
	C	2.32E-05	1.09E-04		C	2.45E-05	2.45E-06				
	MÉDIA	2.19E-05	1.18E-04		MÉDIA	2.73E-05	7.89E-06				
	DP	3.21E-06	1.33E-05		DP	9.96E-06	8.93E-06				
	MDT	3.95E-05	4.69E-05		MDT	4.53E-05	1.94E-05		MDT	9.93E-06	7.47E-06
	DPM	2.06E-05	1.31E-05		DPM	6.19E-05	2.15E-05		DPM	1.10E-05	6.60E-06
	MIN	7.89E-07	2.86E-06		MIN	1.23E-06	1.22E-06		MIN	6.13E-07	6.13E-07
	MAX	1.14E-04	1.33E-04		MAX	2.66E-04	1.21E-04		MAX	2.33E-05	1.41E-05

DP= desvio padrão;MDT=média total; DPM= desvio padrão das médias; MIN= valor mínimo; MAX= valor máximo

A apresentação dos valores tanto no gráfico de dispersão quanto na tabela, auxiliou o enquadramento dos dados na classificação de KLUTE e DIRKSEN (1986), que correlacionam à condutividade dos solos as características de textura dos solos. Assim, baixa e muito baixa condutividade hidráulica saturada foram às classes que se adequaram as mensurações realizadas. Estas classes envolvem solos de textura areia fina, francos, franco-argilosos, franco-siltosos e argilas estruturadas que apresentam magnitudes de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  cm/s, corroborando com dados de textura encontrados.

Baseado nos resultados de média total de  $K_{sat}$  nas URHs, a floresta apresentou os maiores valores,  $3.70 \times 10^{-5}$  e  $4.85 \times 10^{-5}$  cm/s em 20 e 50 cm, respectivamente. A agricultura,  $4.72 \times 10^{-5}$  e  $2.00 \times 10^{-5}$  cm/s enquanto, na pastagem,  $9.93 \times 10^{-6}$  e  $7.57 \times 10^{-6}$  cm/s na profundidade mais próxima a superfície e, na mais distante. Floresta e agricultura mantiveram a mesma ordem de magnitude, com inversão no comportamento da permeabilidade dos solos, ou seja, na agricultura houve redução de aproximadamente 50% de 20 para 50 cm, enquanto que na floresta, ocorreu o contrário, aumento em torno de 25%, respectivamente. A pastagem, com relação a agricultura e floresta, teve redução de uma ordem de magnitude, e no perfil, houve redução dos valores de  $K_{sat}$  em torno de 25%, seguindo a mesma tendência da agricultura. O gráfico da Figura 55, foi construído com base nesses valores médios totais da  $K_{sat}$  organizados por tipo de cobertura e profundidade.

Estatisticamente, empregando o teste de variancia (ANOVA) aos 58 valores de  $K_{sat}$  obtidos separados somente por tipo de uso e cobertura e não por profundidade; não foram constatadas diferenças significativas ( $P_{valor} = 0.1331$ ). Do mesmo modo, no teste TUKEY, de comparação múltipla de médias, não foram identificadas diferenças significativas para estatística.

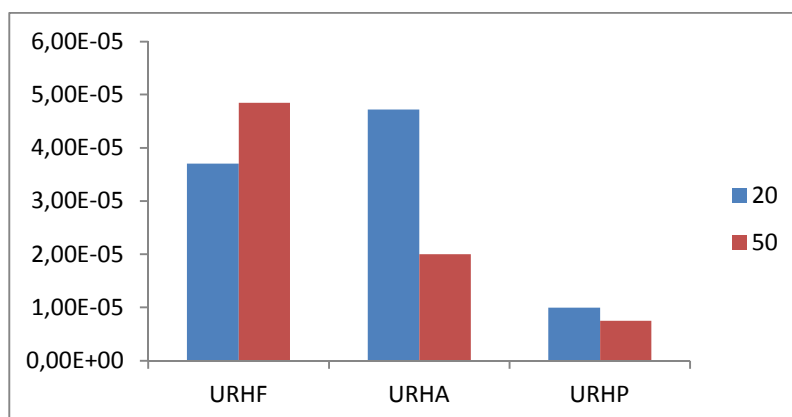


Figura 55: Valores médios totais de  $K_{sat}$  das unidades de resposta hidrológicas floresta, agricultura e pastagem, divididos por profundidade (centrímetros) na escala logarítmica.

No box plot (Figura 56), pode-se observar a aproximação do conjunto de resultados de  $K_{sat}$  na mediada; mesmo com três valores discrepantes na agricultura e maior distribuição na floresta, os quartis se aproximam, podendo identificar a similaridade da condutividade.

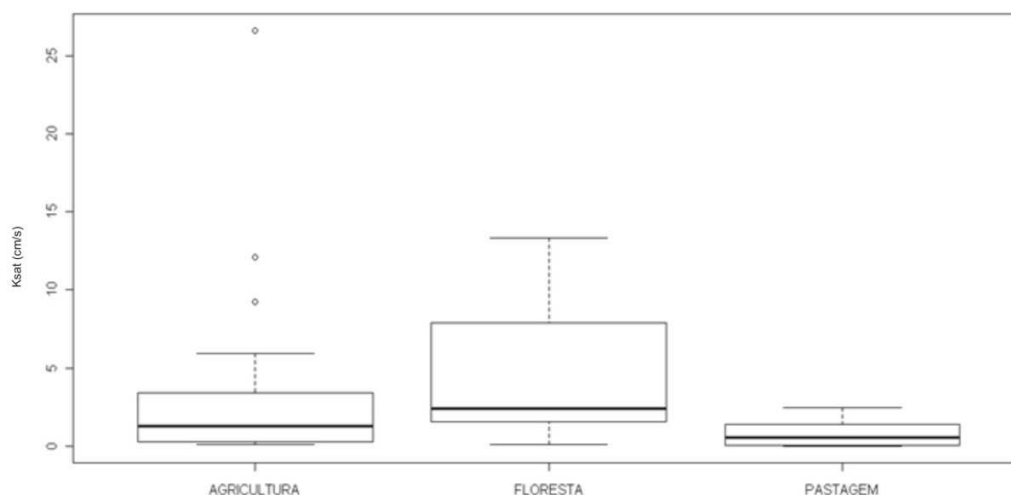


Figura 56: Box plot dos valores de  $k_{sat}$  ( $10^{-5}$  cm/s) nos diferentes tipos de uso e ocupação do solo, não separado por profundidades.

Diferenças apareceram quando buscou-se analisar separadamente os dados obtidos na profundidades de 20 e 50 cm. Ao contrário do esperado pela

hipótese da pesquisa acerca da influência da cobertura vegetal na zona de raiz, próxima a superfície, para propriedade condutividade hidráulica saturada, não foram identificadas diferenças significativas na profundidade de 20 cm ( $P_{\text{valor}}=0.4173$ ). Ao contrário, em 50 cm houve diferenças estatísticas significativas entre os tipos de uso e cobertura ( $P_{\text{valor}}=0.0533$ ) com base nas relações entre as médias de pastagem e floresta. Floresta e agricultura não foram diferentes entre si e, agricultura e pastagem, também não.

Vale destacar que, para formação do gráfico, os dados foram homogeneizados a uma ordem de magnitude, sendo esta a mais representativa dos resultados,  $10^{-5}$  cm/s, para simplificação do uso do programa estatístico, R.

Nas Figura 57 e 58, são apresentados os dados de  $k_{\text{sat}}$  das profundidades de 20 e 50 cm respectivamente. A diferença do aumento da condutividade da floresta aparece na apresentação da mediana que, no box plot da Figura 57 está superior ao terceiro quartil da agricultura e todo gráfico da pastagem, indicando a diferença atribuída a esses dois tipos de uso e cobertura no teste TUKEY. Outro destaque para comparação dos gráficos esteve na redução dos valores de  $k_{\text{sat}}$  na profundidade de 50 cm para agricultura e pastagem, e aumento na floresta. Quanto a 20 cm, foram identificadas semelhanças nos gráficos, justificando a estatística.

Cabe enfatizar que, o gráfico de box plot foi produzido pelo programa estatístico R que ajusta os valores do eixo y conforme os dados inseridos. Logo, a análise destes deve ser atenta aos valores dos eixos e não puramente visual. O fato da agricultura apresentar-se com valores mais distribuídos, heterogêneos e discrepantes, determinou a maior abrangência da escala do eixo y no box plot de 20 cm, diferente de 50 cm, com amplitude de 0 a 12 cm/s.



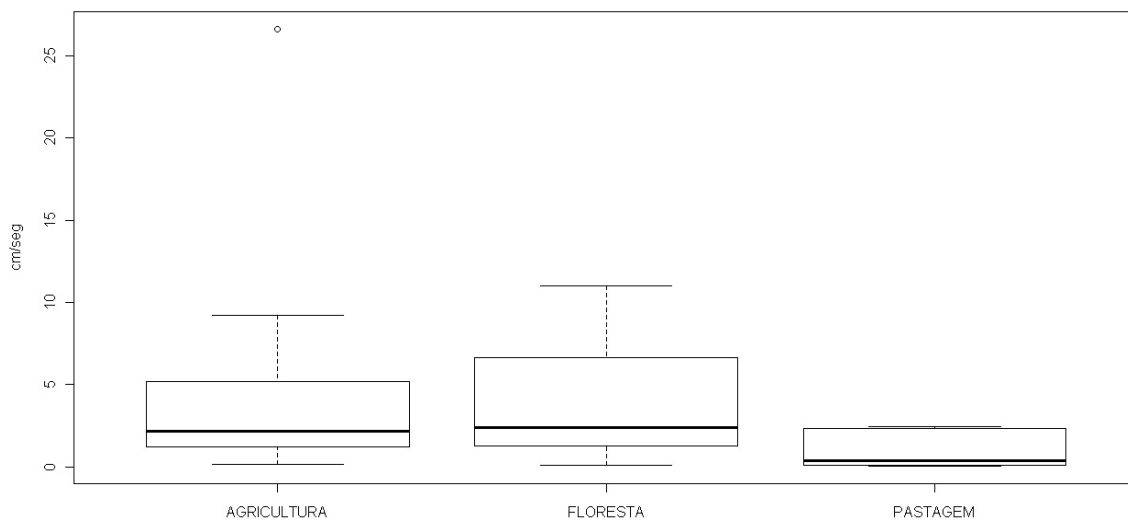


Figura 57: Box plot dos valores de  $K_{sat}$  em cm/s na profundidade de 20 cm distribuídos pelas unidades de resposta hidrológica agricultura, floresta e pastagem.

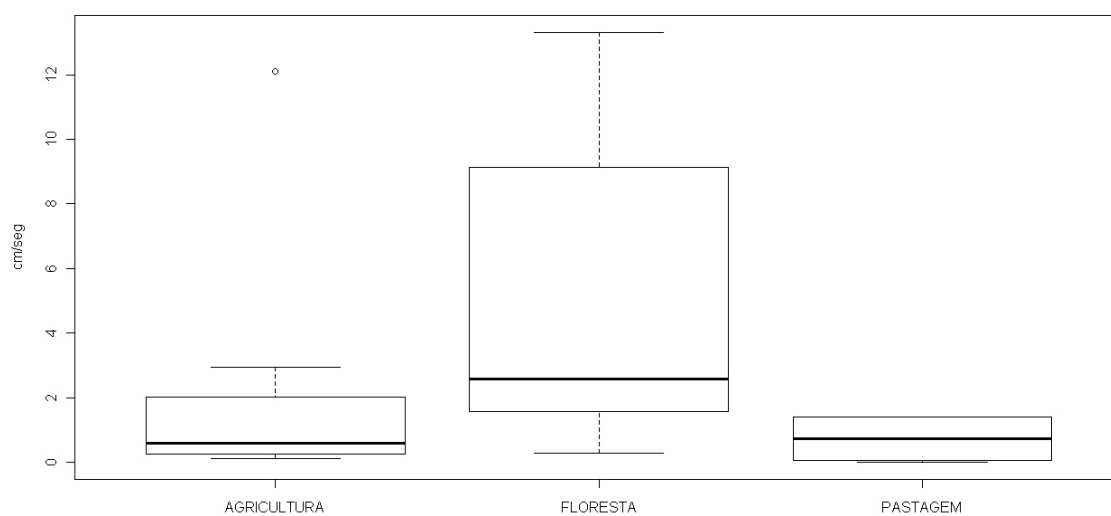


Figura 58: Box plot dos valores de  $K_{sat}$  em cm/s na profundidade de 50 cm distribuídos pelas unidades de resposta hidrológica agricultura, floresta e pastagem.

Na comparação entre os diferentes tipos de uso e cobertura, os resultados concordam com a literatura analisada, ou seja, maior permeabilidade na floresta, seguida da agricultura e por fim, a pastagem. Isto pode estar associado a uma resposta hidrológica ao aumento da densidade do solo da floresta para a pastagem, passando pela agricultura, como afirma HOULBROOKE et (2008). Da mesma forma que se pode atrelar a este comportamento a redução da

macroporosidade como discutido em BUTLE e HOUSE (1997), os quais detectaram redução em uma ou duas ordens de magnitude a condutividade hidráulica da superfície para as maiores profundidades, onde houve redução do espaço poral.

Outros trabalhos corroboram com BUTLE e HOUSE (1997) na redução da  $k_{sat}$  em profundidade como em ZIMMERMANN et al(2006) que, no geral, verificou redução de até duas ordens de magnitude nos solos amazônicos sobre distintos tipos de uso e cobertura, estudados da superfície para 12.5 cm e 20 cm para o interior do perfil. No entanto, na análise entre os diferentes tipos de uso, em profundidade de 20 cm, houve maior permeabilidade nos solos de cobertura nomeada de pré-pastagem (misto de floresta e pastagem), seguida da banana e capoeira com relação à floresta. Os autores supracitados, atribuem essa variação as propriedades físicas, especialmente a concentração de argila que, na floresta foi maior em 20 cm por eluviação, reduzindo a macroporosidade e por conseguinte, a permeabilidade.

Da mesma forma, GODSEY e ELSENBEER (2002), também em solos amazônicos, identificaram o mesmo comportamento que ZIMMERMANN et al(2006) na comparação de ambientes e profundidades, diferindo pela profundidade de 50 cm não analisada pelos primeiros. Nesta GODSEY e ELSENBEER (2002) perceberam que, na área de pastagem abandonada a permeabilidade foi duas vezes maior com relação às outras duas coberturas, sendo que, nesta profundidade, prevalecem as condições naturais do perfis com base nas propriedades físicas, principalmente a estrutura como afirma MESQUITA e MORAES (2004).

Os resultados obtidos nesta pesquisa possuem comportamento contrário, ou seja, na floresta foi constatado aumento da  $k_{sat}$  em 50 cm e redução da pastagem diferente dos dois artigos discutidos acima. A agricultura seguiu a tendência de redução dos valores em profundidade.

Na bacia do Bonfim, os solos sob cobertura florestada são mais rasos, arenosos e se desenvolveram em meio à presença marcante de matações e blocos formando complexo de tálus. Na profundidade de 50 cm o aumento da condutividade pode estar associado a este ambiente, o qual gera caminhos preferenciais de água entre sua superfície de contato e a matriz do solo, como aponta VIEIRA (2001) que acusou aumento de  $1.22 \times 10^{-4}$  para  $4.85 \times 10^{-3}$  cm/s em uma das cicatrizes de escorregamento de encosta estudada na bacia do Quitite e Papagaio, no Rio de Janeiro.

Estatisticamente, resultados similares foram vistos em GODSEY e ELSENBEER (2002) que não encontraram diferenças significativas nas profundidades de 20 e 30 cm, diferente de 12,5 cm onde todos os tipos de uso e cobertura foram significativamente diferentes e em 50 cm, com aumento da permeabilidade na pastagem; neste trabalho a diferença nesta profundidade foi em função da floresta. Sobre solos franco-arenosos em ambiente serrano do Rio de Janeiro, MIRANDA (2008) observou alta condutividade nos solos sob cobertura de mata, seguido da banana, pousio de 5 anos, pousio de 2 anos e por fim, o café. Os valores de MIRANDA (2008) foram de uma a três ordens de magnitudes superiores, gerando em torno de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$ ,cm/s em comparação a  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  cm/s desta pesquisa. Com relação à profundidade, houve redução de até 13 vezes de 12,5 a 20 cm, similar e também comparado pelo autor ZIMMERMANN et al (2006).

Envolvendo características da agricultura, GOES et al (2005) comparando três sistemas de manejo para cana-de-açúcar com área de mata (Ribeirão Preto) em latossolos, constataram redução de uma ordem de magnitude da mata para três cultivos ( $10^{-3}$  para  $10^{-4}$ ) na profundidade de 20 cm, sendo que, para os diferentes tipos de manejo, não foram constatadas diferenças significativas pelo TUKEY. CAVALIERI et al (2009) verificaram redução de 70 a 80% ( $7.79 \times 10^{-7}$  para  $1.91 \times 10^{-7}$  cm/s) da  $k_{sat}$  da superfície para a profundidade de 40-50 e 60-70 cm, em solos de textura franco-argilo-arenosa, no Paraná, em comparação dos sistemas

de plantio direto e convencional. Os autores afirmam que, após 14 anos de plantio direto, a melhoria nas propriedades físicas como densidade do solo e porosidade, especialmente nos 30 primeiros centímetros, ajudam a melhorar a eficiência na condução de água e ar disponível para planta.

Em síntese, os dados de condutividade hidráulica saturada puderam qualificar a mudança no comportamento dos ambientes, ou seja, a floresta > agricultura > pastagem, com relação a aumento ou diminuição dos valores, embora estatisticamente, esses ambientes não possuíram diferenças de comportamentos. No entanto, com relação às propriedades hídricas, os dados de taxa de infiltração ou da condutividade observados até os 10 primeiros centímetros são mais influenciados pelo tipo de uso e cobertura do solo. Nas demais profundidades, a características dos solos, especialmente a textura, a profundidade do perfil e posição na encosta podem exercer maior influência na variabilidade espacial da condutividade hidráulica.

### **6.3 Interpretação da hidrologia dos solos nas Unidades de Resposta Hidrológica na Bacia do Bonfim**

A interpretação da hidrologia dos solos nas URHs foi segmentada em três perspectivas; na primeira foram analisados os dados de potencial matricial com abordagem na movimentação dos fluxos de água frente aos diferentes volumes de precipitação, divididos entre agricultura com pastagem em seguida, a floresta. Na segunda perspectiva, a análise comparativa das cinco estações com recorte de nove dias de intensa precipitação visando explorar os dados de potencial matricial frente às mudanças de tipo de uso e cobertura do solo. E por fim, na terceira, ocorre a discussão da hidrologia dos solos com base nas propriedades físicas e hídricas encontradas nas unidades de resposta hidrológicas, caminhando para o fechamento das discussões desta pesquisa.

### 6.3.1 Análise do potencial matricial com relação à precipitação local nas unidades de resposta hidrológica

Os dados de precipitação foram disponibilizados pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil), que mantém em funcionamento na bacia do Piabanha e em algumas experimentais, como a bacia do Bonfim, a parametrização dos dados pluviométricos através do projeto EIBEX, descrito no capítulo 4. Cabe ressaltar que a última data de captura pela CPRM e repasse de dados foram 04 de janeiro de 2010, portanto, gerou-se uma lacuna de 26 dias entre o potencial matricial e precipitação. Acerca da precipitação do período, o volume total foi de 769,5 mm, distribuídos em 6 totais diários superiores a 40 mm sendo que, dentre os seis, apenas um foi superior a 60 mm; 8 com volume superior a 20 mm e inferior a 40 mm, 10 entre 10 e 20 mm e, 47 inferiores a 10 mm, Figura 59.

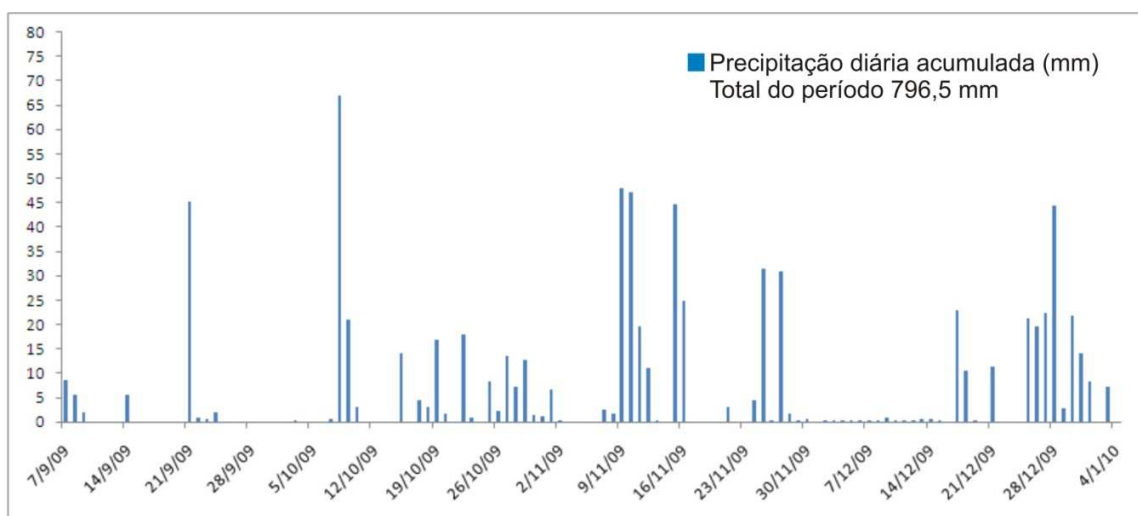


Figura 59: Precipitação diária acumulada entre o período de 07 de setembro de 2009 a 04 de janeiro de 2010. Fonte: CPRM- Serviço Geológico do Brasil – Projeto EIBEX, 2010

Na interpretação da resposta dos sensores com base na Figura 60 e Figura 61, foi possível identificar que a pastagem seguida da agricultura foi os ambientes que apresentaram os maiores valores de potencial matricial (próximos a poro-pressão positiva), indicando alta saturação no solo. Fato este que pode ser

apontado no período de outubro de 2009 a janeiro de 2010 com a manutenção dos sensores de URHA1, URHA2 E URHP1 próximos a estado de saturação do solo (kPa acima de -20, encostando em zero, ponto de saturação total). Já nas URHF1 E URHF5, as oscilações foram maiores, principalmente em URHF5 que diferente da agricultura e pastagem, somente o sensor a 80 cm da superfície atingiu a saturação, os demais tiveram grandes amplitudes entre a escala de kPa, especialmente os instalados em 10 e 20 cm.

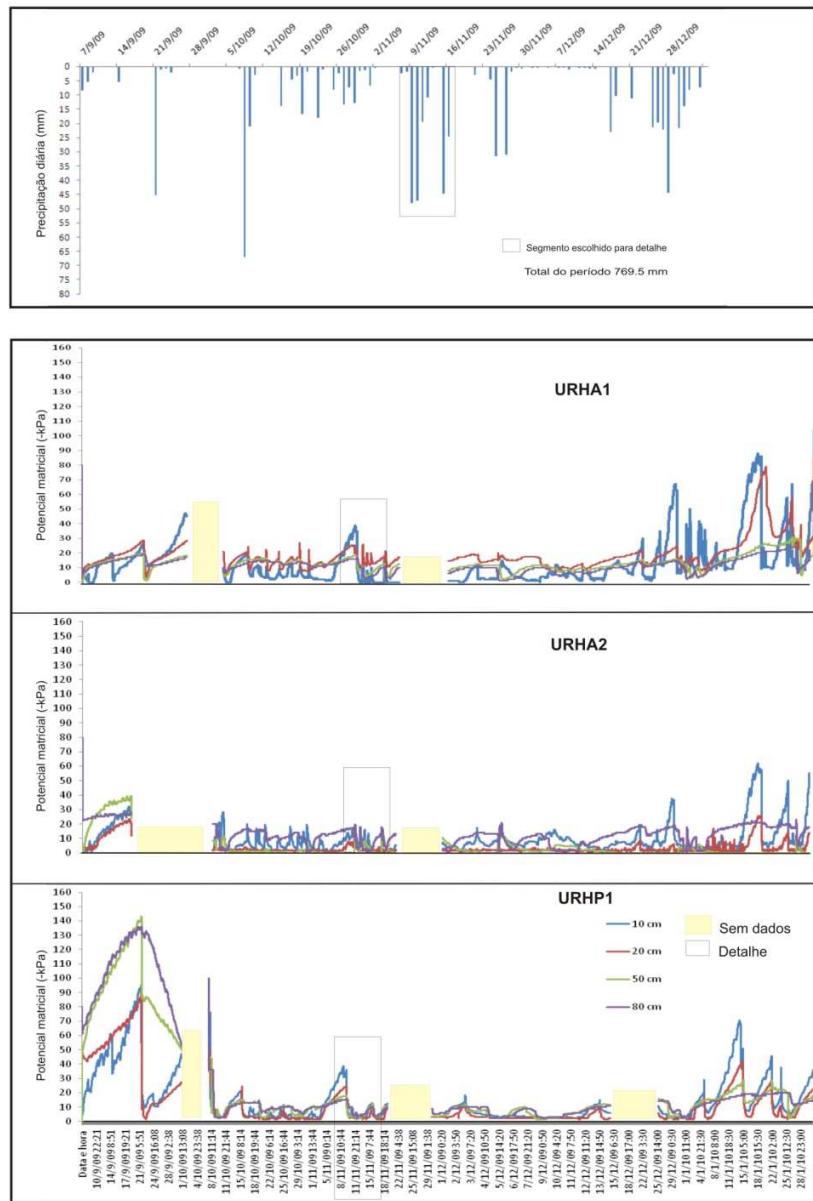


Figura 60: Dados de precipitação diária (mm) e potencial matricial das estações em URHA1, URHA2 e URHP1 do período completo de setembro de 2009 a janeiro de 2010

Na leitura dos gráficos da Figura 60, comparando URHA1 e URHA2, foi visto que a estação A2 permaneceu mais saturada em todo período com relação a A1. As oscilações dos valores de potencial matricial em A2 são perceptíveis nos sensores de 10 cm e 80 cm (azul e roxo), os extremos, enquanto 20 e 50 cm (vermelho e verde) permaneceram saturados a maior parte do período analisado.

Em A1, o sensor a 20 cm apresenta-se com os menores valores de potencial matricial, se destacando com relação aos demais, incidindo em maior drenagem no ponto próximo aos sensores. A diferenciação do comportamento de A1 e A2 pode estar vinculada a prática de irrigação averiguada em A2 e em recesso em A1, pelo pousio de 3 meses para “descanso” do solo.

Na pastagem, com exceção dos dias posteriores a instalação dos sensores, na maior parte do intervalo analisado, os sensores mantiveram-se saturados com drenagem entre os dias de estiagem, como os 11 a 15 de outubro, 02 a 08 de novembro de 2009 e posterior a 04 de janeiro de 2010.

Dividindo o período total das precipitações em três intervalos com base nos maiores picos de chuva, superiores a 40 mm, foram formados o primeiro entre 07 de setembro a 12 de outubro; o segundo de 13 de outubro a 30 de novembro (mais chuvoso) e, o último de 01 de dezembro de 2009 a 04 de janeiro de 2010.

No primeiro período, com dois picos superiores a 40 mm, em 07 a 09 de setembro houve precipitações diárias inferiores a 10 mm, os sensores estavam em drenagem pós-instalação, que processou até o dia 14 de setembro. Com relação às chuvas de baixo volume, apenas os sensores localizados a 10 cm acusaram recarga, apontando aumento no potencial matricial em URHA1 e URHA2.

Na pastagem, grandes flutuações foram observadas nos dias após a instalação, reduzindo para -140 kPa nos sensores de 50 e 80 cm. Os sensores são inseridos aos solos saturados, com preparo de 48 horas, logo, a água que ficou retida nos próprios sensores inicia a sua drenagem pela sucção estabelecida



pela matriz do solo ao longo de 13 dias, diferentemente dos comportamentos dos sensores na agricultura. A irrigação da agricultura pode ter determinado a diferenciação dos ambientes agrícolas e de pastagem. No entanto, em URHP1, no sensor a 10 cm as pequenas amplitudes na formação da linha podem ser justificadas pelo orvalho, influenciando o sensor mais próximo a superfície. Do mesmo modo que A1 e A2, P1 respondeu em 10 cm as precipitações de 07 a 09 de setembro, nos outros sensores, não foi constatada recarga com aumento sensível no potencial matricial, poro-pressão.

Em 14 de setembro, uma precipitação de 5 mm saturou o sensor a 10 cm de A1 e recarregou o mesmo sensor em P1, os demais sensores tanto em A1 quanto em P1 e mesmo em A2 não foram afetados, permanecendo em processo de drenagem. Frente à precipitação de 22 de setembro, em torno de 45 mm, A1 e A2 saturaram o perfil todo de forma instantânea em frente de molhamento e, em P1, ocorreu saturação em 10 e 20 cm. No sensor a 50 cm também foi verificada resposta instantânea, mas, não suficiente para saturação, aumentando de -140 para -80 kPa, em resposta a drenagem dos mais próximos a superfície.

Em 80 cm, a recarga ocorre com aproximadamente 4 dias de atraso, representado pela inversão dos sentidos nos sensores mais superficiais que iniciaram a drenagem vertical com resposta em 50 e 80 cm com aumento do potencial matricial. No entanto, não foi possível afirmar se estes dois últimos atingiram de fato a saturação pela ausência de sete dias de registros, com razões já abordadas nas considerações iniciais neste item.

Após período de ausência de dados, compreendido entre 01 a 07 de outubro, pela seqüência posterior, observou que estavam em drenagem respondendo a estiagem ocorrida no mesmo período. Na segunda precipitação superior a 60 mm, os sensores mostraram saturação em todo perfil tanto em A1, A2 e P1, permanecendo em saturação por três dias, especialmente em P1 que apresentou drenagem mais lenta.

O segundo período, de 13 de outubro a 30 de novembro de 2009, de forma geral, verificou a drenagem dos sensores mais acentuada nos localizados a 10 e 20 cm em A1 e P1 e, em A2 somente a 80 cm, marcando a presença da irrigação atuante nos 50 primeiros centímetros do solo.

De 15 de outubro a 02 de novembro houve precipitações diárias inferiores a 20 mm suficientes para manter a saturação do sensor a 10 cm em A1, com recarga instantânea em 20 cm e manutenção do potencial matricial em -10 kPa em 50 e 80 cm, não acusando saturação. Em A2, as oscilações ficaram a cargo do sensor a 10 cm, como em A1, todavia, tocando a saturação em 10 cm e principalmente nos sensores em 20 e 50 cm, como resposta acumulada entre o período chuvoso constante e a irrigação. A drenagem ficou enfatizada no sensor a 80 cm que se manteve acima da demais linha do gráfico da Figura 60. Na pastagem, a precipitação de 15 de outubro, próximo a 10 mm, foi suficiente para saturar os localizados a 10 e 20 cm. No entanto a saturação, com aumento do potencial em 50 e 80 cm ocorreu com 4 dias de atraso, do mesmo modo que o período anterior analisado. Similar aos demais, a drenagem na pastagem apresentou-se no sensor a 80 cm.

Na estiagem em 02 a 07 de novembro todos os sensores acusaram drenagem, obtendo a mesma configuração em A1 e P1, reduzindo o potencial matricial. A2 pode ter sido mascarado pela irrigação, como já comentado. O intervalo de 09 a 17 de novembro, por apresentar-se como período de maior intensidade de precipitações, mostrou-se maior concentração de picos de chuva, com isso, estes dias foram escolhidos para realização de detalhamento apresentado no item 6.3.2 a seguir.

A data de 18 a 30 de novembro foi marcada pela ausência de dados explicados nos início desta abordagem, mas, pela precipitação, observou-se que os sensores das três unidades estavam em drenagem pós-período de recarga pelas duas precipitações superiores a 30 mm.

Entre 30 de novembro a 14 de dezembro, ocorreu período de mudança no intervalo de leituras, 5 em 5 minutos, destacados no gráfico pela redução dos intervalos para representação diária, como observado na Figura 60. Paralelamente, este marca o início do terceiro período selecionado para interpretação do potencial matricial x precipitação. Nesses dias, a precipitação diária foi inferior a 1 mm, suficiente para manter a saturação em P1, com pequena drenagem em 50 e 80 cm; resposta no sensor a 10 cm misturada a irrigação em A2, com drenagem em 80 cm e saturação em 20 e 50 cm constantes; e, oscilações em A1 com drenagem nos demais. Em A1 a houve retardo na saturação de 50 e 80 cm que aproximaram de zero em resposta a drenagem de 10 e 20 cm que haviam atingido a saturação em dois dias anteriores. Outro destaque, pode ser atribuído ao sensor a 20 cm de A1 que se manteve superior aos demais na linha do gráfico, com valores de potencial matricial menores comparado aos instalados em 80, 50 e 10 cm.

Em 18 de dezembro, ocorre precipitação de 20 mm saturando os sensores a 10 cm rapidamente, sendo ilustrado pelo ângulo reto formado entre a linha do gráfico e o eixo x. Na pastagem, houve ausência de dados, esclarecido no início da apresentação dos resultados. Nas demais profundidades, não houve saturação ligada aos eventos pluviométricos, apenas em A2 nos sensores a 20 e 50 cm. A saturação completa das três estações e em todos os sensores ocorreu na precipitação de 29 de dezembro com mais uma entrada de 40 mm de chuva. Até 04 de janeiro, data da última chuva registrada, as incursões serviram para manter a saturação, com respostas de recarga e drenagem mais aguçadas nos sensores a 10 cm, principalmente em A1.

Do mesmo modo que a agricultura e a pastagem, na Figura 61, foram plotados e agrupados dados das duas áreas florestadas, nas URHF1 e URHF5. Antes da varredura como foi feito nas três outras unidades, cabe enfatizar que, a floresta em F1 possui aproximadamente 25 anos de recuperação apresentando fisionomia de capoeira com espécies de porte médio que permitem a formação de

grandes clareiras potencializando a entrada direta da água e raios solares. Já em F5, a mata é mais fechada, encontra-se em regeneração superior a 40 anos com espécie de porte alto formando dossel podendo proteger e distribuir os fluxos que atingem o solo. Essa diferença na fisiologia das espécies pode atribuir comportamentos diferenciados com relação à dispersão e entrada da água no solo.

Com comportamento diferente dos apresentados na agricultura e pastagem, observou-se no geral que, alguns sensores na floresta, não atingiram a saturação e que, as variações são mais bruscas, principalmente em 10 e 20 cm na URHF5. No ambiente florestado, pode-se afirmar que, a movimentação da água no solo foi mais rápida com predomínio de fluxos verticais, visto pela rápida queda do potencial matricial frente à entrada de chuva no sistema. Similarmente a análise realizada na agricultura e pastagem, os períodos de interpretação entre chuva e potencial matricial na floresta seguiram os três intervalos temporais formados anteriormente.

No intervalo de 07 de setembro a 12 de outubro de 2009, as estações responderam com saturação dos sensores nos dois eventos superiores a 40 mm. Iniciando pela pós-instalação dos sensores em áreas florestadas, as estações URHF1 e URHF5 apresentaram drenagem similar ao visto em URHP1, com sensores a 80 cm atingindo baixos valores de kPa (observação da Figura 60 e Figura 61).

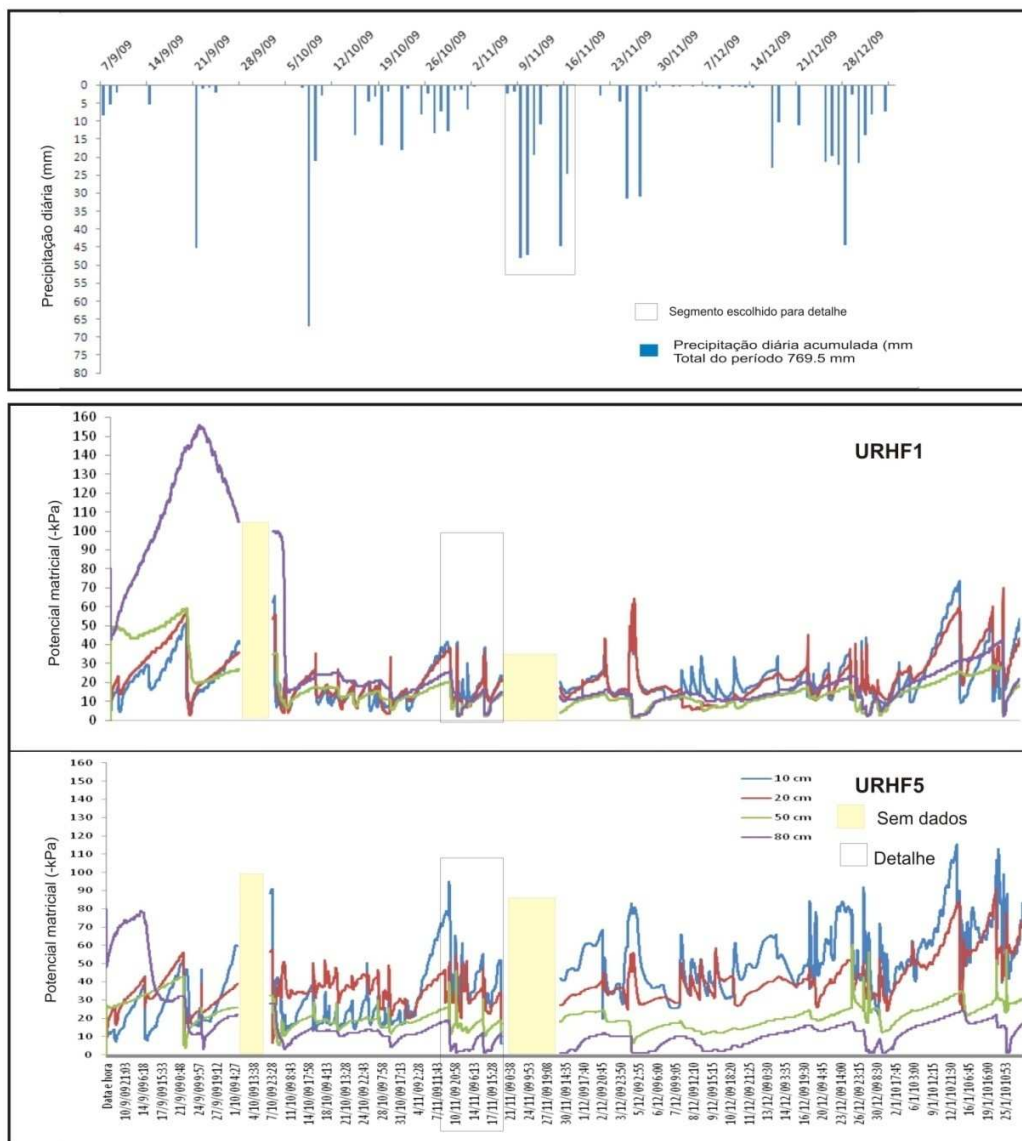


Figura 61: Dados de precipitação diária (mm) e potencial matricial das estações em URHF1, URHF5 do período completo de setembro de 2009 a janeiro de 2010

As precipitações inferiores a 10 mm de 07 a 09 de setembro foram acusadas nos sensores de 10 e 20 cm em ambas as estações em área florestas, os demais continuaram na drenagem. Tanto em F1 quanto F5, tiveram baixos valores de potencial matricial no sensor de 80 cm após instalação.

Em precipitação ocorrida em 14 de setembro, inferior a 10mm, F1 respondeu com baixa variação no potencial matricial e F5 com maior aumento de kPa, além da resposta ser apontada em 20 cm, com descendência da linha do gráfico. Nos demais sensores em F1 houve permanência da drenagem sem resposta a precipitação do dia 14. Já na URHF5, no sensor de 80 cm ocorre recarga em resposta a drenagem dos mais superficiais, invertendo o sentido das linhas e com cruzamento no dia 17 de setembro destes com os demais sensores, o que gerou atraso de 3 dias para atingir o potencial mais próximo a zero.

Com a chuva de 22 de setembro, volume de 45 mm, em F1 os sensores a 10, 20 indicaram saturação, 50 cm respondeu subitamente sem atingir saturação e, em 80 cm que estava em rápida drenagem, recebeu fluxo com atraso de 2 dias iniciando o aumento dos valores de kPa (-160 kPa para -100 kPa), com redução do potencial matricial apontado no gráfico da Figura 61. A recarga mostrada no sensor a 80 cm ocorreu em reflexo à drenagem dos demais entre os dias 24 a 01 de outubro, indicada pela inversão no sentido das linhas do gráfico. Pela ausência de dados, não foi possível afirmar que o sensor de 80 cm atingiu o ponto máximo de saturação ou próximo dele, na URHF1. A drenagem em 10 e 20 cm de 14 a 22 de setembro contribuiu para saturação completa do perfil no evento de 21 de setembro, com volume superior a 40 mm.

Na precipitação de 08 de outubro, a maior do período com volume superior a 65mm, foi suficiente para saturar todo perfil da URHF5 que, não atinge saturação completa nos demais eventos ao longo do período de setembro de 2009 a janeiro de 2010. Na URHF1 a saturação em 80 cm ocorreu após 24 h aproximadamente, em resposta ao acúmulo de volume de água no solo da precipitação de 65 mm, seguida de nova chuva de menor volume, 20 mm.

O segundo intervalo analisado inicia com drenagem nas estações, com destaque para F5 com as maiores oscilações. De 15 de outubro a 02 de novembro, volumes diários de chuva inferiores a 20 mm mantiveram os sensores a 10, 20 e 50 cm da URHF1 com potencial matricial baixo (kPa alta), com pequenas e contínuas oscilações entre recarga e drenagem não suficientes para saturar o sensor a 80 cm. Este sensor mais distante da superfície, respondeu com pequenas oscilações mantendo-se acima dos demais no gráfico durante os dias analisados. Diferentemente, em URHF5, as precipitações são acusadas mas, não atingiram saturação, principalmente nos mais superficiais. O sensor a 80 cm apresentou os menores valores, próximo a saturação, opondo-se ao visto no mesmo intervalo de dias seu correspondente em F1.

De 02 a 08 de novembro, ocorreu estiagem gerando drenagem nos sensores, principalmente em 10 cm de F5 que aproximou de -100 kPa, tornando-se bem seco. De 08 a 17 de novembro, período marcado por intensas incursões pluviométricas sendo selecionado para detalhamento no item 6.3.2, mais adiante.

Embora tenham ocorrido duas precipitações superiores a 20 mm em 26 e 28 de novembro, não houve dados de potencial para comparar à resposta as chuvas nos dias de ocorrência. No entanto, em 01 de dezembro os sensores localizados a 10 e 20 cm de ambas as estações florestadas mostraram recarga com volume inferior a 1 mm. O efeito das duas precipitações anteriores pode ter interferido nessas respostas, pois, no volume inferior a 1 mm, em área florestada, dificilmente pode ser averiguado aumento de -70 para -20 kPa, como visto no sensor a 10 cm em F5.

O último intervalo, marcado inicialmente por precipitações inferiores a 1mm de 01 a 14 de dezembro, foram apontados nos sensores mais superficiais, porém, não atingiram a saturação e poucos influenciaram na dinâmica ocorrida em 50 e 80 cm, para as duas estações. Cabe ressaltar o comportamento hidrológico dos solos entre 03 e 05 de dezembro em F1 e F5 as quais, apresentaram inversão no

sentido das linhas do gráfico entre 10-20 e 50-80 cm, ou seja, com a drenagem da superfície ocorreu saturação em 50 e 80 cm.

De 16 de dezembro a 04 de janeiro de 2010 as sucessivas drenagens e recargas com saturação ocorreram em resposta ao intervalo chuvoso com precipitação em torno de 20 mm diário apresentando um pico superior a 40 mm em 29 de dezembro, sendo suficiente para saturar F1 e o sensor de 80 cm em F5.

### **6.3.2 Detalhamento do potencial matricial nas URHs com base no intervalo de altas precipitações**

No detalhamento realizado, foi empregado como referencial o intervalo entre os dias 08 a 17 de novembro de 2009. Esse intervalo foi marcado com três eventos de chuva superior a 40 mm seguidos de 5 com volume inferior a 25 mm, totalizando 197,25 mm em 9 dias. Foram agrupadas as 5 estações com sensores de matriz granular (potencial matricial) na seqüência de URHF5,F1,A1,A2,e P1 associadas ao gráfico de precipitação diária total, Figura 62.

Analisando conjuntamente a resposta do potencial matricial dos solos neste período, foram constatados que, a maior oscilação e drenagem estiveram nas unidades florestadas, principalmente em F5. Ao passo que, a menor oscilação mas com maior saturação permanecendo ao longo do período, esteve na pastagem. Na Figura 62, foi observada ordem decrescente com relação às maiores oscilações entre recarga e drenagem, seguindo F5, F1,A1,A2 e P1.



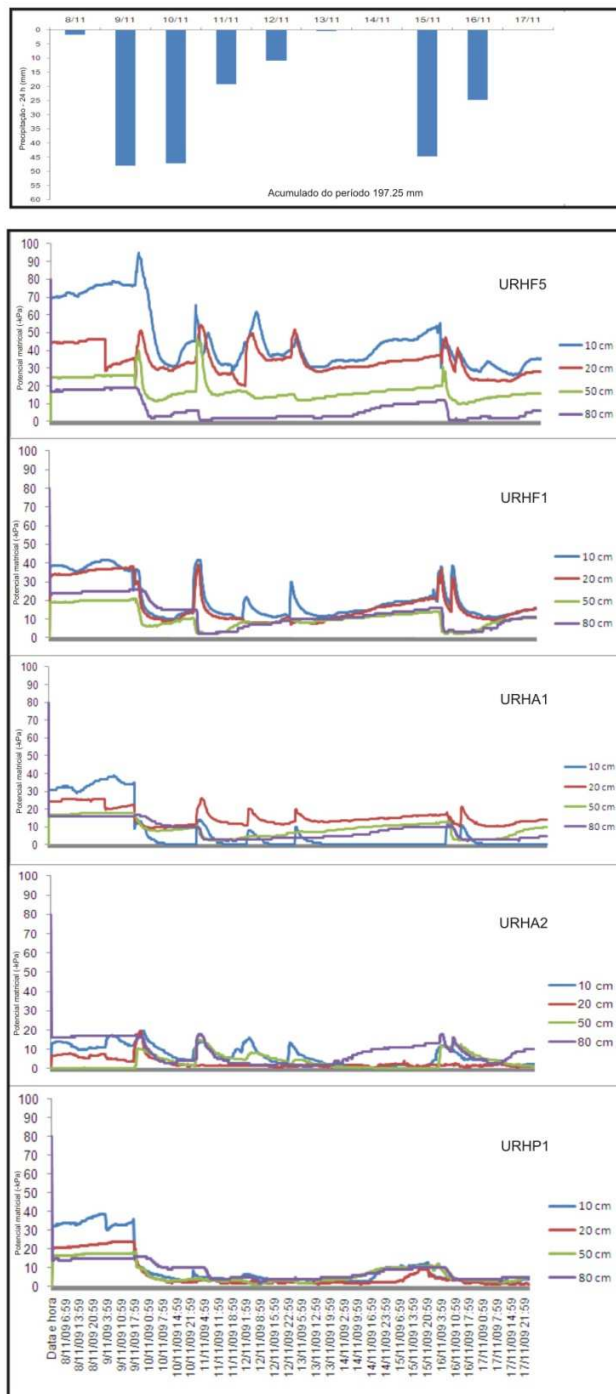


Figura 62: Detalhamento dos dados de potencial matricial das cinco estações de GMS em período de nove dias de maior concentração de picos de chuva

Cabe ressaltar que, em A2 houve contribuição para saturação dos sensores da irrigação, diferente de A1 e principalmente P1, que se manteve saturado em detrimento as características intrínsecas do solo. Na drenagem do sensor de 10 cm, em F5 e A1, houve recarga do sensor a 20 cm, representado pelo caimento do potencial matricial (redução nos valores de kPa). Nas outras unidades, esse fator não foi observado.

Diante da precipitação ocorrida no dia 09, com volume próximo a 50 mm, verificou-se “efeito cascata” em todos ambientes, da mesma forma no dia 16 com volume de chuva similar, então, pode-se afirmar que, na região analisada os solos saturam por fluxo vertical com volumes acima de 40 mm. Atribuiu-se de “efeito cascata” a resposta rápida e em seqüência dos sensores da superfície para o interior do perfil aos eventos de volume suficiente para saturar todo perfil, representado nos gráficos com a formação de uma reta que toca ou fica próximo a zero, formando ângulo reto com eixo x.

Continuando na chuva de 09 de novembro, em F5 verificou resposta imediata com formação de frente de molhamento ao longo do perfil gerando saturação em 80 cm, apenas. A água em 10 cm é drenada rapidamente indicando fluxo gravitacional, diferente do mesmo sensor nas outras unidades, onde a drenagem ocorreu mais lentamente.

Em F1, A1 e P1, os sensores acima de 10,20 e 50cm responderam rapidamente ao fluxo, mas em 80 cm foi observado atraso de aproximadamente 6 horas, com saturação total em dois dias frente à recarga estabelecida pelo segundo evento superior a 40 mm, no dia 10 de novembro. Na pastagem, o atraso foi mais proeminente indicando fluxo mais lento quando comparado com os demais e principalmente em relação a F5. Com maior homogeneidade, os sensores de A2 saturação progressivamente, observando maior movimentação da água neste com relação a P1, A1 e F1.

A umidade antecedente dada à irrigação em A2 pode ter influenciado na geração do fluxo saturado. Com exceção do sensor a 80 cm, os posicionados a 10,20 e 50 cm na pré-chuva do dia 09 estavam mais úmidos quando comparado com outras unidades de resposta hidrológica.

Na precipitação de 10 de novembro, em F5, os sensores de 10, 20 e 50cm estavam em processo de drenagem, recarregando novamente todo perfil em resposta a precipitação, o que permitiu a saturação em 80 cm. Em F5 no sensor a 10 cm, entre os dias 10 e 11, houve recarga em resposta a chuva de 40 mm, com rápida drenagem, possibilitando o aumento do potencial e novamente recarga com diminuição do potencial matricial frente à chuva de aproximadamente 20 mm. Neste intervalo, os outros sensores no perfil de F5 não acusaram similar comportamento, permanecendo como receptáculos dos fluxos verticais vindos da superfície.

Em F1 observou que, com a drenagem de 10 e 20 identificados pelo aumento do potencial, houve saturação de 50 e 80 cm,apresentado pelo sentido oposto dos movimentos no gráfico. A saturação retardada de 80 cm, ocorre no segundo evento de 40 mm, como dito anteriormente. Logo, como os sensores mais profundos estavam saturados, a resposta dada a precipitação em 11 de novembro, foi feita pelos sensores mais próximos a superfície. O mesmo foi visto em A1, no entanto, o sensor de 10 cm esteve mais úmido com relação ao de 20 cm, que se apresentou como o mais seco durante todo período.

Diferentemente, em A2, o sensor de 20 cm permaneceu saturado em todo período, com drenagem sendo gerada nos outros sensores. Em 10,50 e 80 cm foi verificada saturação em resposta a precipitação de 10 de novembro. Isso pode ser atribuído a influencia da irrigação, e pelo tempo de manejo do solo, talvez possa ter formado uma camada de impedimento com menor condutividade hidráulica nesta faixa em resposta a redução do espaço poral.

Na pastagem, a chuva de 09 de novembro foi suficiente para saturar o perfil, permanecendo este saturado até dia 14 pela ausência de precipitação nos dias 13 e 14. A saturação em P1 gerada pela primeira precipitação do período, pode indicar que, com o solo preenchido e sem drenagem no tempo de 24h, as demais chuvas em 10, 11 e 12 podem ter gerado intensos escoamentos superficiais. Nas precipitações inferiores a 20 mm, com exceção da pastagem, nas demais URH, a recarga e drenagem estiveram vinculadas aos sensores mais próximos a superfície.

Em 13 e 14 de novembro, pela ausência de precipitação significativa, ocorreu a drenagem em todas as unidades, com destaque para F5 com as maiores oscilações e para o sensor a 80 cm em A2, que apresentou drenagem, como nas outras estações, não sendo influenciado pela irrigação, mais proeminente nos sensores até 50 cm.

A precipitação de 15 de novembro com volume em torno de 40 mm gerou resposta similar aos outros eventos analisados nos sensores das unidades. No entanto, o efeito cascata foi visto com mais clareza em F5. Em F1 a saturação em 50 e 80 cm ocorre com a drenagem dos mais superficiais, que não atingem a saturação. Na URHA1, a manutenção do sensor em 10 m na saturação pode estar atrelada a irrigação, que é descontrolada na bacia do Bonfim. Assim na chuva de 15 de novembro, ocorre saturação rápida em todo perfil, em cascata. A2 mostrou-se responder lentamente, sem alterações em 20 cm, com queda em 10 e 50 cm, com saturação de todo perfil em 17 de novembro, ausente de precipitação. Na pastagem, a chuva do dia 15 foi suficiente para saturar o perfil, gerando excedente de água na precipitação de 16, indicando escoamento superficial, como nos outros intervalos analisados para P1.

Em suma, a resposta de movimentação da água no perfil foi diferente para todos ambientes analisados devido a características intrínsecas do ponto de monitoramento. No entanto, pode-se notar a tendência no comportamento das áreas florestas, com maior movimentação, drenagem da água no perfil. Seguido

da agricultura, embora possa ser identificada a influencia da irrigação principalmente em A2. E por fim, a pastagem, correspondendo ao esperado pela pesquisa, possuindo as menores oscilações, permanente saturação, o que proporcionou análise de baixa movimentação, alta retenção e potencial de ativação de escoamento superficial.

### **6.3.3 Hidrologia dos solos nas Unidades de Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Bonfim**

Os resultados dos monitoramentos das URHs foram discutidos em conjunto com as mensurações acerca das propriedades físicas (textura, porosidade total, densidade aparente) e hídricas (taxa de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada de campo) favorecendo interpretação da hidrologia dos solos nas unidades de resposta hidrológica formadas na bacia do Bonfim.

Em geral, pelos resultados encontrados, pode-se afirmar que o tipo de uso e cobertura exerce forte influência na hidrologia dos solos, principalmente, na superfície que é mais sensível as mudanças e perturbações. Essa afirmação corrobora com os estudos feitos por BORMANN e KLAASSEN (2008) e BACHMAIR et al (2009) que analisaram a influência da cobertura do solo nos fluxos de água e conectividade dos poros no perfil, tomando como base solos florestados, com atividade agrícola e pastagem.

No mesmo estudo, BACHMAIR et al (2009) buscou avaliar a relação entre e inter usos através da variabilidade espacial das propriedades físicas e hídricas do solo, constatando similaridade no comportamento hidrológico dos solos inter usos e maior heterogeneidade, entre os usos. Igual conduta foi vista nesta pesquisa, principalmente nas áreas agrícolas que apresentaram resultados gerais com menor amplitude entre as unidades de resposta hidrológicas. No entanto, na floresta, as variações entre as unidades foram maiores para todas as propriedades

avaliadas e monitoramento do fluxo. Diferente de BACHMAIR et al (2009) que realizou estudos em áreas preservadas de floresta temperada, nesta pesquisa, a cobertura florestada apresentou-se heterogênea e em diferentes estágios de recuperação após-atividade agrícola. Fato este que pode justificar a heterogeneidade no comportamento dos ambientes florestados e em algumas unidades, como URHF1, a proximidade com os resultados vistos na agricultura, dados a regeneração em média de 25 anos.

Discutindo as unidades florestadas, na Figura 63 foram agrupados os resultados dos monitoramentos do potencial matricial do solo das duas estações além das mensurações das propriedades físicas e hídricas e fotografia das estações de monitoramento do potencial matricial.

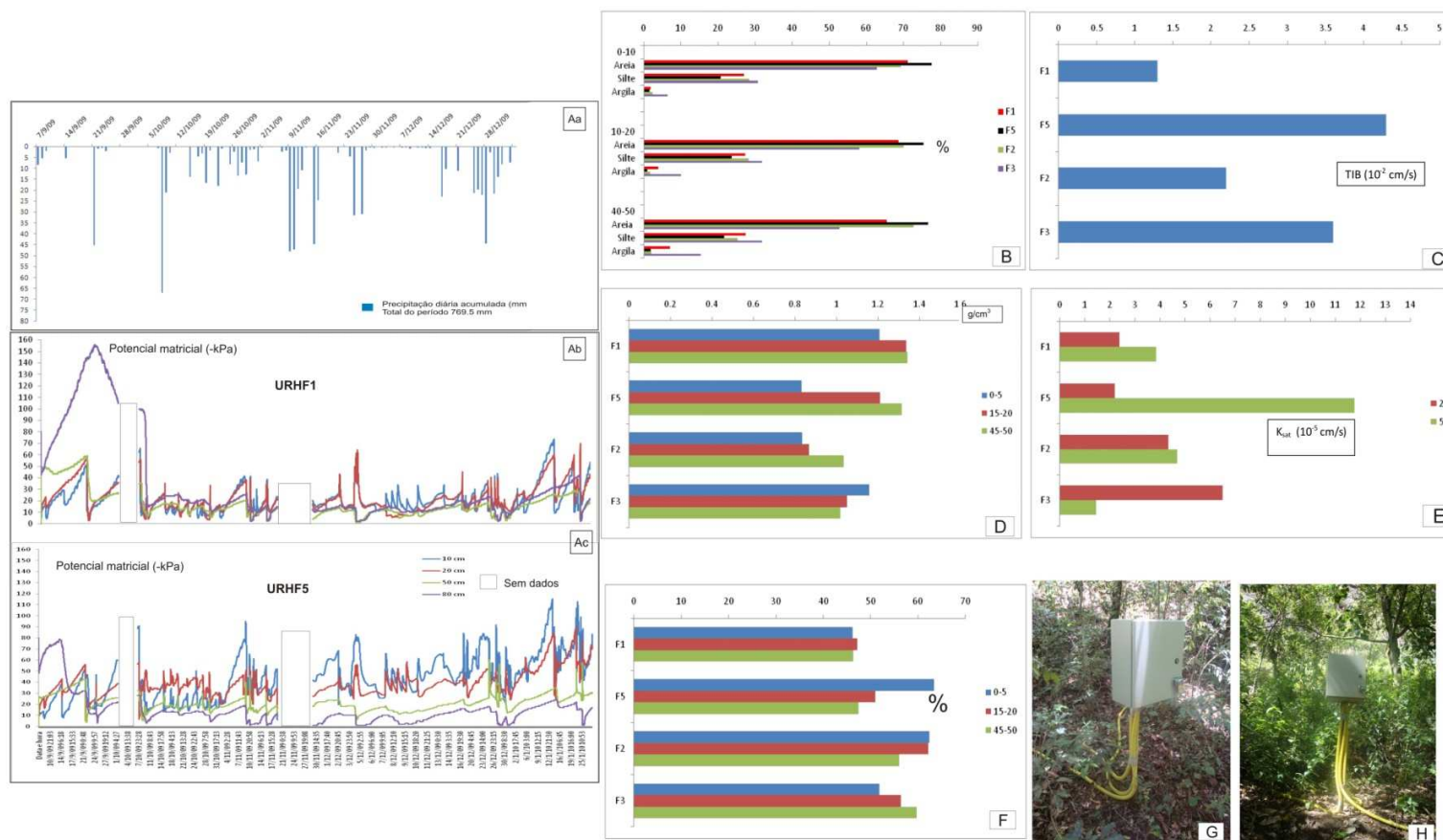


Figura 63: Agrupamento dos monitoramentos e mensurações realizadas nas Unidades de Resposta Hidrológica Florestadas sendo, A) Precipitação diária acumulada de setembro de 2009 a janeiro de 2010 em conjunto com os dados de Potencial Matricial da URHF1 e URHF5; B) Médias dos pontos de repetição de cada URHF das frações granulométricas representadas por profundidade do perfil; C) Média dos pontos de repetição dos valores de TIB ( $\times 10^{-2}$  cm/s) nas URHF; D) Médias dos pontos de repetição de cada URHF dos valores de densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) nas profundidades das URHF; E) Média dos pontos de repetição dos valores de  $K_{\text{sat}}$  ( $\times 10^{-5}$  cm/s) nas URHF; F) Médias dos pontos de repetição de cada URHF dos valores de porosidade total (%) nas profundidades das URHF; G e H) Fotografia das GMS em URHF1 e F5

Nas áreas florestadas foram obtidas as maiores taxas de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada de campo associada aos maiores percentuais de porosidade total e baixa densidade aparente. A combinação das propriedades físico-hídricas foi refletida nos comportamentos dos sensores de matriz granular instalados em duas unidades representantes das áreas florestadas pela rápida movimentação da água no perfil.

No gráfico de fração granulométrica (figura 65B), a areia foi a mais representativa, ultrapassando 60% da composição das médias obtidas pelas repetições de cada URHF. O percentual não apresentou grandes mudanças ao longo do perfil, especialmente em F1 e F5 (barra vermelha e preta). A composição textural do solo indica características de maior movimentação e baixa retenção da água no solo, como afirmado por HILLEL (1980), BRADY e WEIL (2004), dentre outros.

No entanto, como indicado por MESQUITA e MORAES (2004), a fração granulométrica como propriedade isolada não pode ser indicativo da hidrologia dos solos uma vez que, a distribuição do tamanho e conectividade dos poros pode determinar comportamentos hidrológicos distintos para mesmos usos (VIEIRA et al, 1981) e comportamentos similares para tipos de usos diferentes (HARDEN e SCRUGGS, 2003). Em URHF1 e URHF5, mostraram respostas na movimentação de fluxo diferenciadas embora tenham mantido a mesma tendência com fluxos verticais, típico de áreas florestadas (BUTLE e HOUSE, 1997).

Comparando os resultados dos sensores de matriz granular, F1 apresentou maiores valores de potencial matricial, próximos a zero, o que indica proximidade com a saturação (poro-pressão positiva). Ao passo que, as oscilações entre drenagem e recarga em F5 foram mais aguçadas e, a saturação alcançada apenas no sensor a 80 cm.

Em resposta as precipitações, aquelas superiores a 40 mm, mostrou-se resposta de recarga em todos os sensores distribuídos no perfil e nas duas



estações. Porém, com exceção da precipitação superior a 60 mm que possibilitou a saturação dos sensores de 10,50 e 80 cm, em URHF5, nos demais eventos, não houve saturação dos localizados acima de 50 cm. Já F1, houve resposta com saturação em todos os eventos acima de 40 mm. Nas precipitações inferiores a 40 mm, em geral, a resposta de recarga com redução do potencial matricial nos sensores de 10 e 20 cm, mais próximos a superfície e, com a drenagem da superfície, os sensores de 50 e 80 cm acusam fluxo vertical caminhando para saturação, principalmente em F1.

Resultados similares em solos florestados com relação as precipitações foram observadas por BACHMAIR et al (2009) mas, com simulador de chuva contendo mistura de água e azul de metileno, aplicando ao solo com intensidades de 20, 40 e 60 mm por hora. Os autores observaram que 20 mm geraram uma mancha no solo até 30 cm, acima de 40 mm, atingiu as maiores profundidade (40 cm) e, para 60 mm, o perfil inteiro verticalmente.

Com exceção da textura que se mostrou similar nas estações com relação a areia, F1 e F5 tiveram resultados diferenciados para outras propriedades, principalmente em superfície. A densidade do solo foi 40% maior em F1 na superfície (0-5 cm), 10% maior em 15-20 cm e similar em 45-50 cm com relação a F5. Comparando com as outras unidades florestas (F2 e F3), F1 manteve-se com os maiores valores. Do mesmo modo, em resposta a redução do espaço poral vista na densidade aparente, a porosidade total foi 25% menor em F1 no topo do solo e 10 % com relação a 15-20 cm quando comparado a F5, e nas outras unidades florestadas também.

Essa diferenciação influenciou na taxa básica de infiltração sendo F5 três vezes mais permeável na superfície que F1. Não obstante, as demais unidades florestadas apresentaram maiores valores que F1 e menores que F5. Forte relação entre densidade do solo e infiltração em áreas montanhosas florestadas foi identificada em HARDEN e SCRUGGS (2003), indicando redução de três

vezes na taxa de infiltração de solos com floresta tropicais com a superfície mais densa em decorrência da redução da serrapilheira e da declividade.

A diferença entre as espécies de F1 e F5 dada à diferença de estágios de recuperação podem intervir na hidrologia das unidades. Em F1 a cobertura de capoeira em meio às espécies de maior porte proporciona menor aporte material disponível para formação de serrapilheira sendo que, a transformação da serrapilheira em matéria orgânica acrescida ao solo, contribui para distribuição dos fluxos e principalmente, para agregação e manutenção dos macroporos que geram maiores e mais rápidos fluxos de água no solo (BUTLE e HOUSE, 1997; ZIMMERMANN et al, 2006). Embora não tenha sido estudada a matéria orgânica, em campo foi possível identificar diferenças entre as unidades, com relação ao aporte de serrapilheira e a formação da camada orgânica.

De tal modo, a capoeira permite maior abertura no dossel, as clareiras que facilitam a entrada direta da água no solo, carreando a serrapilheira gerando maior adensamento da superfície, como em SOUZA et al (2004) em solos amazônicos, com redução em torno de 10% da taxa de infiltração entre floresta natural e capoeira.

A posição na encosta poderia ser outro fator considerado para diferir os ambientes na hidrologia dos solos pois, F1 localiza-se no terço médio da encosta em maior declividade e F5 mais próximo ao leito, em vale em forma de V com formação de estreita planície. A diferença de declividade poderia gerar fluxos superficiais em resposta a maiores e concentrado volume de precipitação, como visto em HARDEN e SCRUGGS (2003) em áreas montanhosas com florestas tropicais e, em JORDAN et al (2008) identificou coeficiente de escoamento similar para áreas de cabeceira com floresta temperada e vale com pastagem, em chuvas simuladas superiores a 56mm/h.

A Figura 64 reforça o posicionamento das estações de monitoramento do potencial matricial sobre imagem extraída do *Google earth* enfatizando as feições do relevo da bacia do Bonfim.

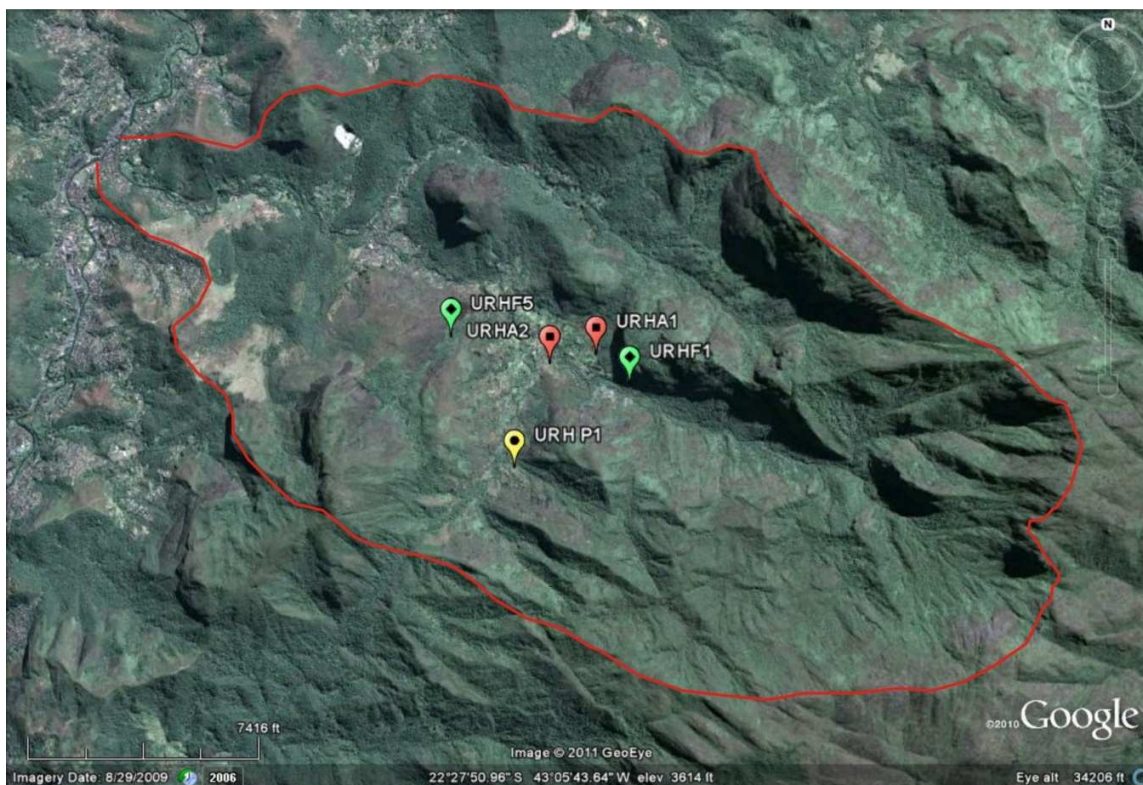


Figura 64: Imagem GeoEye extraída do *Google Earth* com a distribuição das estações de GMS nas Unidades de Resposta Hidrológica F1, F5, A1, A2 e P1 enfatizando a relação do relevo com a posição das estações.

Observando a condutividade hidráulica das unidades florestadas, Figura 63F, F1 e F5 obtiveram valores similares em 20 cm, contudo, em F5 50 cm foi duas vezes maior quando comparada a mesma profundidade nas demais áreas. Com exceção de F3 que apresentou resultado concordante com o indicado na maioria dos artigos os quais, apontam que a condutividade hidráulica tende a reduzir em profundidade para ambientes florestados (GODSEY E ELSENBEEER, 2002; ZIMMERMANN et al, 2006; ZIMMERMANN e ELSENBEEER, 2008) nos demais ambientes florestados, a  $K_{sat}$  foi maior em 50 cm. O envolvimento da topografia na análise de  $K_{sat}$ , como apontou WANG et al (2008) e em solos mais

rasos, pode prevalecer com relação a influência da atividade biológica, aumentando a  $k_{sat}$  ao longo do perfil.

Em ambiente serrano além da topografia acidentada a presença de tálus e contato abrupto solo-rocha podem formar caminhos preferenciais por fendas e material mais grosseiro pela proximidade com o manto de alteração, aumentando a condutividade hidráulica saturada, como indica VIEIRA (2001).

A influência da formação de caminhos preferenciais nos sensores de potencial matricial, pode surgir na interpretação do sensor 80 cm em URHF1 que, no período observado apresentou-se com potencial matricial superior aos demais, como de 07 a 10 de outubro de 2009, e no restante do intervalo, esteve superior ao de 50 cm, acusando rápida drenagem.

A complexidade na interpretação da hidrologia dos solos em ambientes está na conjugação dos fatores de cobertura junto às condições de formação do solo, fortemente ligada a geomorfologia da bacia hidrográfica. Nas unidades de resposta hidrológica em área de floresta, a movimentação da água por fluxo gravitacional em solos mais arenosos com baixa retenção ficou evidenciada na representação gráfica dos sensores de potencial matricial. As características, principalmente, das propriedades físicas encontradas expressam a influência da cobertura florestal na formação do sistema secundário de poros pelo efeito da atividade biogênica que potencializou a condução dos fluxos de água (HAYASHI et al, 2006).

As diferenças internas entre F1 e F5 podem estar vinculadas mais aos estágios de recuperação das espécies (25 para 40 anos) e restituição das propriedades físicas como, porosidade e densidade do solo junto à maior permeabilidade, como mostra JANSEN et al (1987) e TIAN et al (2008).

Em contraste com a floresta, as unidades localizadas em áreas agrícolas mostraram resultados mais homogêneos internamente principalmente com relação às propriedades físicas. Na Figura 65, similar a floresta, os resultados obtidos ao longo da pesquisa foram agrupados para solos com cobertura agrícola. Influências da irrigação foram identificadas na configuração das linhas dos gráficos de potencial matricial em URHA2, mais irrigada e, URHA1, menos irrigada e em pousio, figura 65A.

Diferentemente da floresta, na agricultura os sensores de potencial matricial apontaram maior saturação durante o período analisado. As oscilações entre drenagem e recarga foram mais proeminentes nas profundidades de 10 e 80 cm, principalmente em A2.

Com relação à granulometria, na agricultura houve redução da fração areia com aumento da fração silte e argila nas profundidades do perfil. O aumento das frações finas associada ao tipo de cobertura pode ter influenciado na redução da infiltração e condutividade hidráulica das unidades em agricultura em resposta a diminuição dos macroporos (ABU-HAMDEH et al, 2006; ZIMMERMANN et al, 2006).

Vale ressaltar que, a condutividade em A2 foi superior as demais unidades e maior em superfície, a 20 cm. Esse resultado pode ser atribuído ao tipo de cultivo no período de realização dos ensaios, a mandioca. As raízes pivotantes dessa cultura podem influenciar na condutividade hidráulica formando caminhos preferenciais, como em PORTELA et al (2001).

Nas outras unidades da agricultura, a  $K_{sat}$  foi maior em 20 cm reduzindo ao longo do perfil, concordando com XU e MERMOUD (2001). A aeração realizada na superfície para preparo ao replantio viabiliza, em curto prazo, melhoramento da estrutura com formação de macroporos, como indicado por LIPIEC et al (2006), SO et al (2008) e CAVALIERI et al (2009).

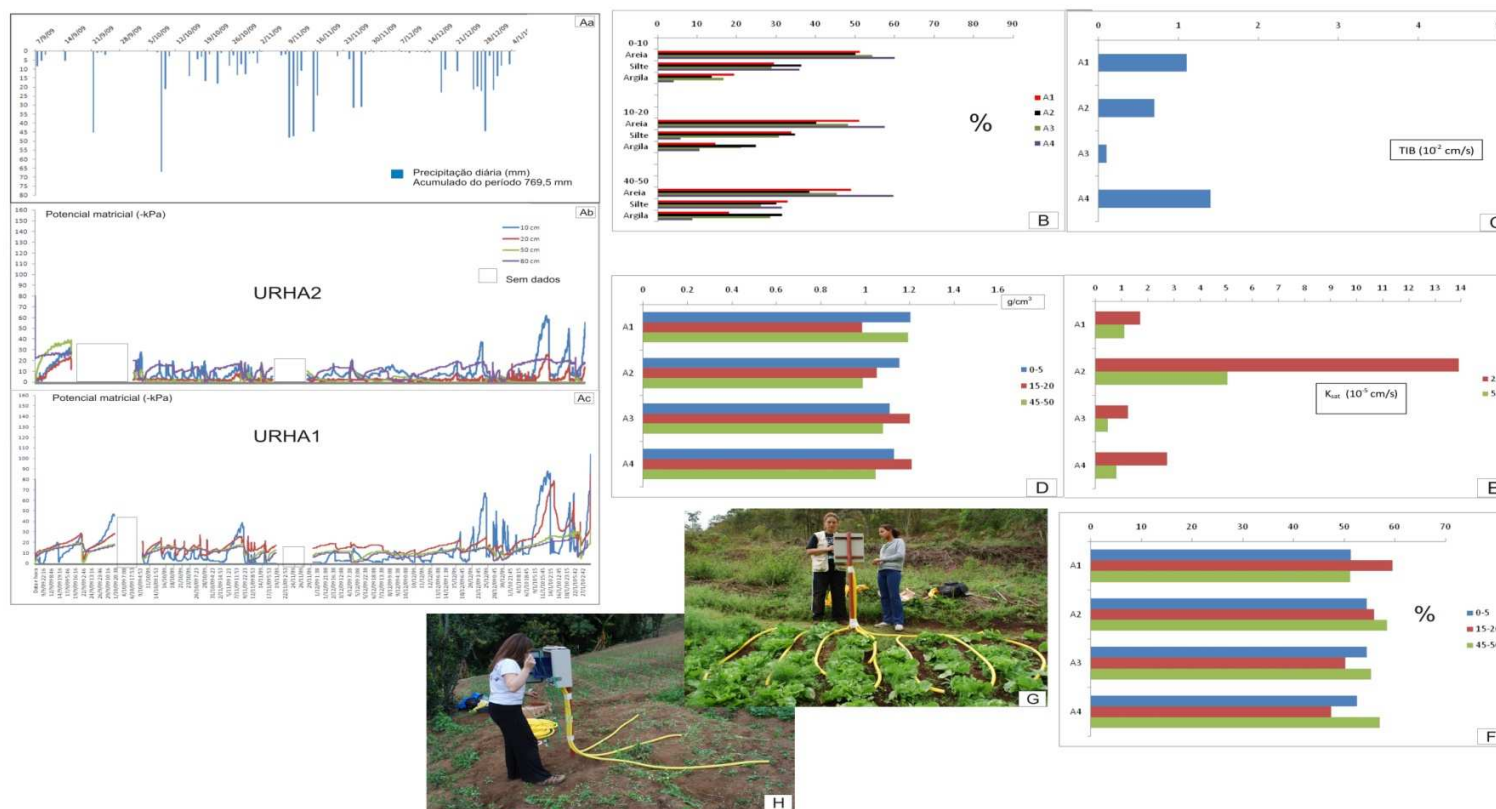


Figura 65: Agrupamento dos monitoramentos e mensurações realizadas nas Unidades de Resposta Hidrológica na Agricultura sendo, A) Precipitação diária acumulada de setembro de 2009 a janeiro de 2010 em conjunto com os dados de Potencial Matricial da URHA1 e URHA2; B) Médias dos pontos de repetição de cada URHA das frações granulométricas representadas por profundidade do perfil; C) Média dos pontos de repetição dos valores de TIB ( $\times 10^{-2}$  cm/s) nas URHA; D) Médias dos pontos de repetição de cada URHA dos valores de densidade aparente ( $g/cm^3$ ) nas profundidades das URHA; E) Média dos pontos de repetição dos valores de  $K_{sat}$  ( $\times 10^{-5}$  cm/s) nas URHA; F) Médias dos pontos de repetição de cada URHA dos valores de porosidade total (%) nas profundidades das URHA; G e H) Fotografia das estações de GSM em URHA1 e URHA2.

Os efeitos do plantio convencional podem acentuar mudanças no comportamento hidrológico dos solos em longo prazo, alterando a dinâmica hidrológica dos solos, como defende CAVALIERI et al (2009). Os efeitos em longo prazo são registrados no aumento da densidade e na formação da camada de impedimento na profundidade de 20 cm, aproximadamente, coincidente ao pé-do-arado.

A densidade do solo esteve menor em 15-20 cm na unidade A1, enquanto a superfície e em 45-50 cm, apresentaram resultados iguais de maior densidade. Em A2, houve ordem decrescente de densidade aparente, maior na superfície, reduzindo em relação a profundidade do perfil.

A3 e A4 tiveram comportamentos similares, até mesmo em função da propriedade rural onde foram feitos os ensaios possuir um único sistema de manejo, o que pode justificar o aumento da densidade na camada de 20 cm nas duas unidades. A formação de camada de impedimento foi apontada por BERTOLINO (2004) na comparação de diferentes manejos e suas respostas hidrológicas frente à irrigação e eventos pluviométricos. Próximo a profundidade de 30 cm no plantio convencional houve formação de crosta, como resultado prolongado do uso de arado, influenciando na resposta dos sensores de matriz granular neste ambiente.

Seguindo a densidade, a porosidade total foi inversa, como mostra a Figura 65F, com destaque para o aumento da porosidade a 20 cm de A1 e redução da mesma em A3 e A4. Não foram identificadas alterações no comportamento da condutividade hidráulica desses ambientes que apresentaram semelhanças aos resultados de A1.

Na TIB, o reflexo dos usos e do comportamento das propriedades físicas conduziu resultados semelhantes, com exceção de A3, justificado pelas condições de campo. Na mensuração, as condições de umidade inicial eram altas devido a evento de chuva anterior a realização do ensaio. Embora não tenha aferido a

umidade antecedente, a saturação do solo na superfície pode interferir na velocidade de infiltração com baixa capacidade quando solos encontram-se úmidos (ANTONELI e THOMAZ, 2009).

A exposição da camada superficial do solo e substituição da floresta gerou redução da infiltração em todas as unidades de agricultura. Este fato é concordante com encontrado na literatura nos artigos que comparam a infiltração de áreas nativas florestadas com plantios agrícolas e pastagem (GODSEY e ELSENBEER, 2002; ZIMMERMANN et al, 2006; ZHOU et al, 2008)

Para o potencial matricial, comparando as URHF e URHA identificou-se maior característica de retenção na agricultura. Cabe reafirmar a manutenção dos sensores a 10, 20 e 50 cm na URHA2 por influência da irrigação. O sensor a 80 cm não acusou influência direta da irrigação, no entanto, atinge a saturação em resposta as precipitações superiores a 40 mm, como visto em SOUZA (2003) no estudo do potencial matricial em parcelas de erosão sob diferentes tipos de manejo. Comparando os resultados de SOUZA (2003) com os desta pesquisa com relação à resposta dos sensores as precipitações, identificou-se que, para o plantio direto, nas precipitações de 20 mm há resposta nos sensores mais próximos a superfície, 15 e 30 cm, com retardo em 80 cm. Em precipitações superiores a 40 mm e principalmente as de 60 mm diários, houve resposta imediata em todo perfil, próximos aos valores vistos por esta pesquisa.

A2 as maiores variações são vistas nos extremos, em 10 cm pela recarga e drenagem constante além da evaporação atuante nesses solos mais expostos. E o outro extremo, em 80 cm com drenagem constante, menor que a floresta, mas, mantém com potencial superior aos outros sensores, como apontado anteriormente.

Apesar da pesquisa não ter avançado na profundidade de 80 cm para aquisição das propriedades físicas e hídricas, em 50 cm para áreas agrícolas, há afastamento da zona de raízes, indicando influencia das características do perfil e



da topografia no comportamento hidrológico. Assim identifica-se maior drenagem em resposta a maior porosidade total e menor densidade do solo nas maiores profundidade de A2.

Por diferença de manejo nesse intervalo a partir da implantação de pousio e cessar da irrigação, a hidrologia dos solos em A1 foi distinta, como mostra a Figura 65 A as oscilações em 10 e 20 cm foram mais salientes, assim como os valores de potencial matricial dos sensores com relação a A2. Vale ressaltar que, o posicionamento das estações com relação à encosta, pode ter influenciado na dinâmica hidrológica dos solos.

Em A1 o sensor de 20 cm esteve acima na linha do gráfico com relação aos demais, dois fatores foram envolvidos na interpretação. O primeiro, pela maior evaporação uma vez que a atividade de irrigação foi suspensa e o período de monitoramento tenha compreendido maiores temperaturas e o segundo, pelo abastecimento da planta nesta camada do solo, diminuindo o potencial pela absorção da água nos poros menores de solo. Ambos os fatores foram apontados por BERTOLINO (2004) que também identificou sobreposição do sensor de 30 cm em detrimento aos 15 cm.

As propriedades físicas influenciaram no tempo de resposta aos eventos pluviométricos. Na agricultura, todos os sensores respondem com saturação as precipitações superiores a 40 mm, como as que ocorreram em 22 de setembro, 08 de outubro, 10,11 e 15 de novembro e 29 de dezembro. Precipitações inferiores a 40 mm gera recarga rápida em 10 e 20 cm porém com atraso ou retardo em média de 2 dias para recarga de 50 e 80 cm e, por fim, precipitações inferiores a 10 mm, são acusadas somente nos sensores a 10 cm com pequenos picos no gráfico, não reduzindo de forma representativa o potencial matricial.

A pastagem apresentou os maiores valores de densidade aparente com homogeneidade no perfil e respectiva redução da porosidade total. Tomando como base essas duas propriedades, a resposta hidrológica deste ambiente foi

condizente ao apresentado pelas propriedades que indicam favorecimento a retenção e baixa movimentação da água no perfil.

Na Figura 66 foram agrupadas as propriedades físicas e para as hídricas analisadas, não foi inserido o resultado da taxa de infiltração em função da proximidade ao valor de zero. Nesta Unidade de Resposta Hidrológica, as frações granulométricas tiveram aumento da argila principalmente na profundidade de 50 cm. A combinação das propriedades físicas indica, mesmo sem mensuração, menor taxa de infiltração e condutividade hidráulica. Este comportamento foi observado principalmente na TIB com infiltração próxima a zero no tempo determinado superior a 150 minutos. Do mesmo modo, a  $k_{sat}$  foi de 4 a 13 vezes menor que nas áreas agrícolas e florestadas, respectivamente, independente a profundidade.

Os resultados foram condizentes com ZIMMERMANN et al (2006) que indicaram redução da TIB em 12 vezes quando comparado a floresta, misto de pastagem com floresta, banana, capoeira e silvicultura. No mesmo trabalho, os autores aferiram a  $K_{sat}$  em 12,5 e 20 cm, observando redução em 10 e 3 vezes, respectivamente. Na superfície as diferenças são mais acentuadas, diferente com a profundidade onde a  $K_{sat}$  tende a reduzir. Não há comparação dos estudos desses autores na profundidade de 50 cm, no entanto, cabe enfatizar que, nesta pesquisa, não houve mudanças significativas ao longo dos 50 cm.

No mesmo caminho ZHOU et al (2008) apontou redução das propriedades hidráulicas com base na condutividade hidráulica e curva de retenção na ordem: bosques>agricultura>pastagem, similar ao visto ao que se esperava nesta pesquisa, com substituição dos bosques por florestas tropicais.

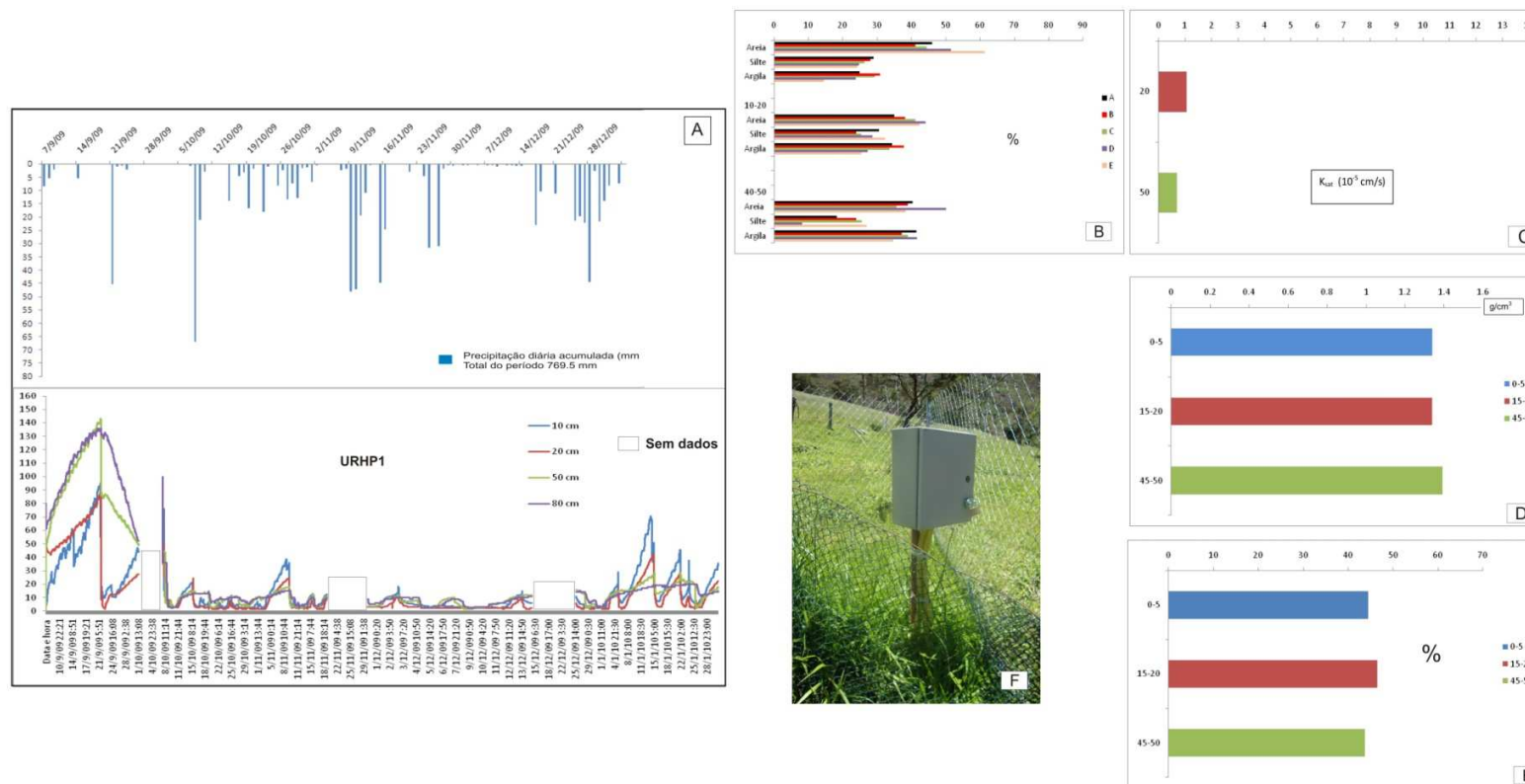


Figura 66: Agrupamento dos monitoramentos e mensurações realizadas na Unidade de Resposta Hidrológicas Pastagem sendo, A) Precipitação diária acumulada de setembro de 2009 a janeiro de 2010 em conjunto com os dados de Potencial Matricial URHP; B) Valores totais dos pontos de mensuração da URHP das frações granulométricas representadas por profundidade do perfil; C) Média dos pontos de repetição dos valores de  $K_{sat}$  ( $\times 10^{-5}$  cm/s) na URHP; D) Valores totais de densidade aparente ( $g/cm^3$ ) nas profundidades das URHP; E) Valores totais de porosidade total (%) nas profundidades da URHP; F) Fotografia da estação GMS em URHP

Em solos amazônicos, a pastagem foi dez vezes menor que a floresta e 8 vezes menor que a capoeira, diferindo estatisticamente de todas as coberturas, envolvendo a agricultura. Da mesma forma, a pastagem da URHP1 no Bonfim foi estatisticamente diferente com relação à agricultura e floresta.

CAMBRA et al (1998) em estudo no Vale do Paraíba, Rio de Janeiro, observou maior adensamento do solo em profundidade em detrimento a redução dos macroporos. Na mesma análise, o autor observou concentração de argila por eluviação do topo para profundidade de 60 cm constituindo camada de impedimento neste setor do perfil. Na superfície a presença das raízes formando uma franja auxiliou na infiltração vertical e distribuição dos fluxos, em 30 cm apontou-se camada intermediária com diminuição do fluxo vertical em 60 cm, redução com resposta lenta e retardada na movimentação da água vista pelo potencial matricial.

Comparando esta pesquisa com o verificado o autor supracitado, identificou-se sensível aumento na densidade do solo acompanhada de redução da porosidade em 50 cm, o que pode ter gerado menor condutividade hidráulica, como mostrou a Figura 66C.

Em resposta as propriedades físicas e hídricas, o potencial matricial da pastagem manteve-se próximo a saturação na maior parte do período, com exceção dos períodos de estiagem favoráveis a evaporação e a drenagem para o interior do perfil, de forma vertical ou lateral, como aponta SCHWARTZ et al (2003) na comparação do movimento da água em solos transformados em pastagem, pós- atividade agrícola.

Quanto à movimentação da água no perfil, o sensor a 80 cm mostrou-se com maior drenagem e constante, similar ao visto em URHA2. Por se tratar de solos de ambiente serrano e com perfis mais rasos, a localização do sensor a 80 cm pode estar associada a proximidade com o manto de alteração, encontrando materiais mais grosseiros que podem influenciar na drenagem do solo (VIEIRA,

2001). Por outro lado, este fluxo pode expandir lateralmente em resposta a capilaridade intrínseca aos microporos, como aponta BACHMAIR et al (2009) que com base nos traçadores para estudo da infiltração da água no solo, identificou fluxo lateral para duas áreas de pastagem, com menor resposta ao fluxo gravitacional, ao passo que, na floresta, observou-se o contrário, com poucas manchas para lateralidade com azul de metileno.

As características de retenção de água nesse ambiente são acusadas nos resultados das mensurações das propriedades físicas e hídricas e, confirmadas no comportamento do potencial matricial que se manteve próximo a saturação, principalmente nos sensores de 10 a 50 cm, em grande parte do período.

A resposta do perfil Unidade de Resposta Hidrológica Pastagem as precipitações foi atrelada as condições iniciais de umidade, ou seja, quando os sensores em superfície estavam com potencial matricial elevado, a resposta a precipitação superior a 40 mm tornou-se suficiente para saturação de todo perfil, como visto no evento de 10 de novembro de 2009.

No entanto uma vez o solo saturado, com alta umidade, sucessivos eventos de chuva pode potencializar a geração de escoamento superficial. No período de 08 a 17 de novembro, abordado em detalhe no item 6.3.2, a manutenção da saturação do perfil pode ter gerado escoamento superficial nas chuvas de 11 e 12 de novembro, voltando a drenar entre 13 e 14, mas de forma lenta, e voltando a saturação no dia 16. Esse mecanismo de geração de escoamento superficial foi identificado por FERNANDES e COELHO-NETTO (1994) em solos sob pastagem, no vale do Paraíba, como em CAMBRA (1998).

Assim, acredita-se que os resultados obtidos foram satisfatórios para a interpretação da hidrologia dos solos, em escala de perfil, da bacia experimental do Bonfim, sob diferentes tipos de uso e cobertura e em ambiente serrano.

## 7 CONCLUSÕES

Em geral, seguindo a ordem de apresentação dos resultados e de estudo das propriedades física, hídricas e do monitoramento do potencial matricial, pode-se concluir que, o tipo de uso e cobertura do solo influencia na dinâmica hidrológica dos solos, principalmente na superfície em resposta a alterações nas propriedades físicas.

Com base em processos observados, pode-se atribuir que a floresta pela baixa retenção apresentada não contribui de forma expressiva para manutenção do fluxo no canal no período seco. O alto percentual de areia verificado na região florestada, superior a 60% embasa esta característica, juntamente com a macroporosidade, baixa densidade do solo e alta permeabilidade.

Na pastagem e agricultura, dada à alta característica de retenção pela fração argila (30 a 40%) e ainda a microporosidade presente, a drenagem torna-se mais lenta, disponibilizando fluxo de água para o canal por um período mais prolongado. Porém, a maior exposição da superfície do solo nestes dois últimos ambientes potencializa o escoamento superficial, acarretando perda de solo e água para a bacia, reduzindo portanto, o armazenamento.

Conclui-se especificamente das propriedades físicas e hídricas que:

- Quanto às propriedades físicas analisadas, não foram constatadas diferença significativas entre floresta e agricultura para densidade do solo e porosidade, mas, ambas foram estatisticamente diferentes com relação à pastagem.
- A densidade aparente aumentou na média das URHFs em 10% do topo para a camada de 50 cm, correspondendo em redução da porosidade total na mesma proporção. Na agricultura, ocorreu o inverso com os mesmos percentuais. Quanto à pastagem, o perfil apresentou alta densidade e baixa

porosidade total similarmente nas camadas. Em comparação com as Unidades florestadas e agrícolas, houve aumento de 20% da densidade do solo e redução próxima a 30% da porosidade total.

- Para as propriedades hídricas, houve redução da taxa de infiltração básica em 50% da agricultura com relação floresta nos valores médios. No entanto, estatisticamente, não foram comprovadas diferenças significativas. Já para pastagem, foram diferenciadas estatisticamente em ambas as unidades, florestadas e agricultura.
- A taxa de infiltração pode ser considerada como propriedades influenciadas pelo tipo de uso e cobertura do solo, mesmo com resultado da estatística não diferindo floresta e agricultura, a entrada de água no topo do solo foi reduzida a metade, podendo gerar escoamento superficial em eventos de altos índices pluviométricos.
- Diferentemente da infiltração, a condutividade hidráulica saturada foi mais influenciada pelas características do perfil e da topografia em detrimento ao tipo de uso, principalmente na profundidade de 50 cm, mais distante da zona de raízes.
- Neste estudo, verificou-se que a condutividade hidráulica na floresta aumenta com a profundidade e na agricultura, reduz com a profundidade, diferente da maioria dos estudos na literatura. Atribuem-se o comportamento as características de solos heterogêneos em ambientes serranos e a presença de matacões viabilizando a formação de caminhos preferenciais, principalmente nos solos florestados, onde o perfil é mais raso.
- Quanto ao comportamento das estações de monitoramento do potencial matricial elas responderam de forma significativa as características dos solos e mudança nas propriedades físicas. Com relação ao fluxo vertical gravitacional, pode-se atribuir ordem decrescente para os tipos de uso e cobertura, floresta>agricultura>pastagem.

- Com relação a resposta hidrológica dos solos as precipitações, no geral, pode-se afirmar que, chuvas próximas a 40 mm gera saturação de todo perfil na pastagem e agricultura, e recarga nos solos florestados. A saturação na floresta ocorreu em um evento próximo a 65 mm. Para esses volumes, há a geração do “efeito cascata” mais percebido na floresta.
- Para precipitações maiores que 20 mm e menores que 40 mm, a saturação das profundidades de 50 e 80 cm ocorre na agricultura e pastagem com resposta retardada e coincidente a drenagem das camadas próximas a superfície. Na floresta, a umidade é acusada nos sensores de 10 e 20 cm, conduzindo fluxo para o interior em resposta a umidade antecedente.
- Em chuvas inferiores a 10 mm, em vários momentos, apenas os sensores de 10 cm acusam recarga, não influenciando os demais sensores principalmente na floresta. Na agricultura e pastagem, há resposta em 20 cm mas, não foi verificada recarga em 50 e 80 cm.

A hidrologia das unidades apontou o comportamento de maior movimentação da água em solos florestados, com baixa retenção, ao passo que, a pastagem foi o oposto da floresta, com baixa movimentação e alta retenção. A agricultura tornou-se intermediária, com características de retenção e movimentação. A hidrologia dos solos se fez pela combinação de caracteres próprios dos solos heterogêneos das regiões serranas e ainda, pela participação do uso, distribuindo os fluxos de água da chuva na superfície e ainda, contribuindo para o arranjo do meio poroso, local de armazenamento e passagem da água no perfil.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa correspondeu às expectativas e a proposta inicial de se estudar a influencia do uso e cobertura na hidrologia dos solos. Destaque para obtenção dos dados em campo, aproximando o pesquisador ao funcionamento sistêmico dos ambientes e das paisagens. No entanto, algumas considerações devem ser feitas com base nos problemas e sugestões para próximos trabalhos ou aprimoramento de técnicas para os estudos hidrológicos em ambientes serranos.

Dentre as considerações, aponta-se a superestimativa na taxa básica de infiltração. A opção pela taxa básica de infiltração foi feita em função da logística e recursos, no entanto, dados com menor erro podem ser obtidos a partir do aumento da amostragem e do tempo de análise, o que viabilizaria a confecção da curva de infiltração.

Outro ponto ressaltado está na dificuldade de inserir ou posicionar o infiltrômetro de anel duplo em áreas declivosas. Em geral, para ambientes serranos a literatura indica um nivelamento do terreno, mas, acredita-se que este nivelamento retira os primeiros centímetros do solo, determinantes a infiltração. E por fim, para solos muito permeáveis ou com baixa a muito baixa permeabilidade, este instrumento não se mostrou eficiente, até mesmo pelo método rudimentar de leituras e manutenção de carga hidráulica no seu interior. Na floresta a carga foi difícil de ser mantida dada a alta permeabilidade. Sugere-se instrumentação mais precisa, sem formação de coluna, como ocorre com o uso dos infiltrômetros de tensão.

O permeâmetro IAC mostrou-se satisfatório e condizente com os dados vistos na literatura e nas características locais, ele mostrou-se como instrumento eficiente para mensurações de campo.

Maior número amostral, ou seja, expansão das mensurações e coletas para as propriedades hídricas e físicas, auxiliaria na melhor interpretação da variabilidade espacial e da comprovação estatística para as diferenças não representativas entre floresta e agricultura, apontadas na condutividade hidráulica.

A porosidade total indicou redução dos poros e junto com a densidade do solo sustentaram a interpretação da hidrologia dos solos. Porém, diferenciação do tamanho e distribuição dos poros poderia auxiliar na melhor análise acerca da movimentação e retenção. Paralelamente, é de fundamental importância a abertura do perfil para análise dos horizontes, presença de raízes, contato solo-rocha, solo-tálus identificando caminhos preferenciais. Ambientes serranos são muito heterogêneos, logo, a descrição do perfil com medidas de profundidade e, principalmente a identificação do limite solo-rocha, auxiliaria no controle dos processos e direção de fluxos.

Os sensores de monitoramento do potencial matricial foram sensíveis ao comportamento hidrológico dos solos diferenciado pelo uso, no entanto, sugere-se a quantificação dos valores de água que de fato são adicionados aos solos. Na floresta, o controle da precipitação efetiva e fluxos de tronco podem auxiliar no entendimento da interceptação e na corresponde água disponível para infiltrar. Na agricultura, sugere-se quantificar a irrigação para desassociar da precipitação, embora essa influencia tenha sido salientada de forma qualitativa nos estudos e na comparação das áreas agrícolas.

E por fim, a continuidade da pesquisa através das considerações pautadas e manutenção das estações automáticas podem servir de subsídios ao planejamento do uso do solo e água na bacia do Bonfim, especialmente por esta possuir vocação agrícola. Doravante, o entendimento da dinâmica hidrológica não somente das unidades de resposta hidrológicas, mas das encostas e da bacia como um todo se faz presente, e desta forma, estudos de monitoramento associado à modelagem hidrológica podem sustentar o maior dilema da hidrologia contemporânea, a geração e o armazenamento de água.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-HAMDEH, N. H. *et al.* Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics. *European Journal of Soil Science*, [S.l.], v. 57, p. 609-616, 2006.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Comparação de infiltração de água no solo mensurada em período seco e úmido, em diferentes usos da terra na bacia do arroio Boa Vista, Guamiranga, Paraná. *Ambiência* [S.l.], v. 5, n. 2, p. 301-308, 2009.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R. Infiltração da água em Cambissolos do Baixo de Irecê (BA). *R. Bras. Ci. Solo* [S.l.], v. 20, p. 363:370, 1996.

ARYA, L. M. *et al.* Field measurement of the saturated hydraulic conductivity of a macroporous soil with unstable subsoil structure. *soil Science* [S.l.], v. 163, n. 11, p. 841-852, 1998.

BACHMAIR, S. *et al.* Controls of land use and soil structure on water movement: lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone. *Journal of Hydrology* [S.l.], v. 369, p. 241-252, 2009.

BARRETO, A. N. *et al.* Condutividade Hidráulica Saturada em um Solo Aluvial do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [S.l.], v. 5, n. 1, p. 152-155, 2001.

BERTOLINO, A. V. F. A. *Influência do manejo na hidrologia de solos agrícolas em relevo forte ondulado de ambiente serrano: Paty do Alferes - RJ.* (2004). 169 f. (doutorado) - Departamento de Geografia - PPGG, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008.

BEVEN, K. J. *Rainfall-Runoff Modelling* Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

BJÖRN, B.; MCCLAUGHERTY. *Plant Litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration* New York Springer, 2003.

BODHINAYAKE, W. *et al.* Determination of Hydraulic Properties in Sloping landscapes from Tension and Double-Ring Infiltrimeters. *Vadose Zone Journal* [S.l.], v. 3, p. 964-870, 2004.

BORMANN, H.; KLAASSEN, K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. *Geoderma* [S.I.], v. 145, p. 295-302, 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elements of the nature and properties of soils*. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

BRASILEIRO, R. Projeto Boa Vizinhança -Relatório Preliminar de Diagnóstico socioambiental: Ibama Parque Nacional da Serra dos Órgãos. 2006.

BUTLE, J. M.; HOUSE, D. A. Spatial variability os saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 203, p. 127-142, 1997.

CAMBRA, N. F. E. *Movimentos de água na porção superior de solos sob pastagem: o papel dos sistema radicular*. (1998). 144 f. (Mestrado ) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 1998.

CAMMERAAT, L. H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale *Earth Surface Processes and Landforms* [S.I.], v. 27, p. 1201-1222, 2002.

CASANELLAS, P. J. *et al. Edafologia: para la agricultura y el medio ambiente*. . Madrid.: Ediciones Mundia Presa, 1994.

CAVALIERI, K. M. V. *et al.* Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil & Tillage Research* [S.I.], v. 103, p. 158-164, 2009.

CEBECAUER, T.; HOFIERKA, J. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology* [S.I.], v. 98, p. 187-198, 2008.

CHEN, L. *et al.* The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena* [S.I.], v. 70, p. 200-208, 2007.

COELHO NETO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Ed.). *Geomorfologia:uma atualização de conceitos e bases*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. Cap.3. p. 93-144.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2001. \*Rio de Janeiro\*: Geologia, geomorfologia, Geoquímica, Geofísica, Recursos Minerais, Economia Mineral,Hidrogeologia, Estudos de Chuvas Intensas, Solos, Aptidão Agrícola, Uso e Cobertura do Solo,Inventário de Escorregamentos, Diagnóstico Geoambiental. Rio de Janeiro: CPRM, Embrapa Solos, DRM-RJ, 1 CD-Rom.

CUO, L. *et al.* The roles of roads and agricultural land use in altering hydrological processes in Nam Mae Rim watershed, northern Thailand. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 22, p. 4339-4354, 2008.

DANTAS, M. E. *Mapeamento geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro CPRM, 2000.

DESCHEEMAER, K. *et al.* Runoff on slopes with restoring vegetation: A case study from the Tigray highlands, Ethiopia. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 331, p. 219-241, 2006.

DEXTER, A. R. Physical Properties of Tilled Soils *Soil & Tillage Research* [S.I.], v. 43, p. 41-63, 1997.

DHAKAL, A. S.; SIDLE, R. C. Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 18, n. 4, p. 757-776, 2004.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. *Water in Environmental Planning*. New York: W.H. Freeman and Company, 1978.

EGUCHI, E. S. *et al.* Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas "in situ". *Ciênc. agrotec* [S.I.], n. Especial, p. 1607-1613, dez 2003.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters *soil Science Society American Journal* [S.I.], v. 677, p. 1-24, 1992.

ELRICK, D. E. *et al.* Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses. *Ground Water Monitoring Review* [S.I.], v. 9, p. 184-193, 1989.

ELSENBEER, H. Hydrologic flowpaths in tropical rainforest soilscaapes-a review. *hydrological Processes* [S.I.], v. 15, p. 1751-1759, 2001.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro EMBRAPA-CNPS, 1997.

FAMIGLIETTI, J. S. *et al.* Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 210, n. 1-4, p. 259-281, 1998.

FERNANDES, N. F. *Hidrologia Subsuperficial e Propriedades Físico-Mecânicas dos Complexos de Rampa- Bananal- SP.* . (1990). (Mestrado ) - Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro 1990.

FERNANDES, N. F. *et al.* Monitoramento dos fluxos d'água no solo: instrumentação alternativa. *III Simpósio de Geografia Física Aplicada*. v. único Nova Friburgo: Anais do III Simpósio de Geografia Física Aplicada, 1989. p. 71-97.

FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO, A. L. Subsurface hydrology of layered colluvium mantles in unchannelled valleys - South-Eastern Brazil *Earth Surface Processes and Landforms* [S.I.], v. 19, n. 609-626, 1994.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. New York: Micmillan Publishing, 1988.

GENERAUX, D. P. *et al.* Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA. *Journal of Hydrology* [S.I.], n. 332-353, 2008.

GODSEY, S.; ELSENBEER. The soil hydrologic response to forest regrowth: a case study from southwestern Amazonia. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 16, p. 1519-1522, 2002

GÓES, G. B. *et al.* Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo *Irriga, Botucatu* [S.I.], v. 10, n. 2, p. 116-122, 2005.

GOULART, D. R. *Diagnóstico da suscetibilidade a erosão dos solos da Bacia Hidrográfica do Bonfim - Correias, Petrópolis - RJ.* (1999). 128 f. (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro 1999.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T. *et al.* (Ed.). *Erosão e conservação dos solos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil 1999.

GURNELL, A. M.; GREGORY, K. J. The influence of vegetation on stream channel processes. In: BURT, T. P.; WALLING, D. E. (Ed.). *Catchment experiments in fluvial geomorphology* England: Geo Books, 1981. p. 515-536.

HARDEN, C. P.; SCRUGGS, P. D. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* [S.I.], v. 55, p. 5-24, 2003.

HAYASHI, Y. *et al.* Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 331, p. 85-102, 2006.

HEWLETT, J. D. *Principles of Forest Hydrology*. 2. ed. Georgia: The University of Georgia Press 1982.

HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. San Diego, California: Academic press, 1980.

\_\_\_\_\_. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Amsterdam: Elsevier, 2003.

HOULBROOKE, D. J. *et al.* Effect of irrigation and grazing animals on soil quality measurements in the North Otago Rolling Downlands of New Zealand. *Soil Use and Management* [S.I.], v. 24, p. 416-423, 2008.

ICMBIO,- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE.-. *Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra dos Orgãos*. Brasília: - ICMBio, 2007.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - Climatologia [WWW.inmet.gov.br](http://WWW.inmet.gov.br) capturado em 25 de janeiro de 2010

JANSEN, R. C. *et al.* Variação da Permeabilidade do Solo em Diferentes Estágios Sucessionais da Mata Atlântica na Ilha Grande, RJ. *VII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Paraná CD-ROM 1987.

JORDÁN, A. *et al.* Heterogeneity in soil hydrological responde from different land cover types in southern Spain. *Catena* [S.I.], v. 74, p. 137-143, 2008.

JURY, W. A.; HORTON, R. *Soil Physics*. John Willy and Sons, INC, 2004.

KIEHL, E. J. *Manual de edafologia. Relações solos-plantas* São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1979.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um latossolo roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo *Ciência Rural* [S.I.], v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis:Part 1- physical and mineralogical methods*. Madison: Soil Science Society of America, 1986.

KNAPP, E. B. Infiltration and storage of soil water. In: KIRKBY, M. J. (Ed.). *Hillslope Hydrology*. New York: John Wiley & Sons, 1978. p. 43-72.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D. R. *Soil Hydrology* Cremlingen-Destedt: GeoScience 1994. (GeoEcology).

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. *Manual de Descrição e coleta de solo no campo*. 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 1984.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo* Piracicaba: ESALQ/USP, 1995.

LIN, H.; ZHOU, X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hidrologic monitoring in the Shale Hills Catchment. *European Journal of Soil Science* [S.I.], v. 59, p. 34-49, 2008.

LIPIEC, J. *et al.* Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil & Tillage Research* [S.I.], v. 89, p. 210-220, 2006.

LIPSIUS, K.; MOONEY, S. J. Using image analysis of tracer staining to examine the infiltration patterns in a water repellent contaminated sandy soil *Geoderma* [S.I.], v. 136, p. 865-875, 2006.

LOURENÇO, A. E. P. O BONFIM - Sua gente, suas entradas e saídas. *Mapeamento elaborado como parte do projeto "O Bonfim na Balança: perfil nutricional e percepções sobre práticas alimentares e de atividade física em um bairro rural de Petrópolis, Rio de Janeiro"* [S.I.], 2008.

LUIJTEN, J. C. *et al.* Dynamic modelling of strategic water availability in the Cabuyal River, Colombia: the impact of land cover change on the hydrological balance. *Advance in Environmental Monitoring and Modelling* [S.I.], v. 01, n. 01, p. 36-60, 2000.

MALAM ISSA, O. *et al.* Dynamic Evolution of the Unsaturated Hydraulic Conductivity of a Developing Crust. *Earth Surface Processes and Landforms* [S.I.], v. 29, p. 1131-1142, 2004.

MANNING, J. C. *Applied Principles of Hydrology*. 2. ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1992.

MARTINS, E. S. *et al.* Relação solo-relevo em vertentes assimétricas no Parque Nacional da Serra dos Orgãos, RJ. *revista Brasileira de Geomorfologia* [S.I.], v. 8, n. 1, p. 45-62, 2007.

MEDINA, B. F. Influência de dois métodos de preparo de área na compactação de um Latossolo Amarelo *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 9, p. 67-71, 1985.

MENDES, R. M. *et al.* Avaliação do sensor de matriz granular (GMS) para medição de sucção. *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*. Salvador - BA2007.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e os atributos físicos do solo. *Ciência Rural* [S.I.], v. 34, n. 3, p. 963-969, mai-jun 2004.

MIRANDA, J. P. L. *Propriedades físico-hídricas de um solo submetido a cultivos perenes e a pousio em ambiente agrícola serrano – bom jardim (rj)* (2008). 123 f. (mestrado) - programa de pós-graduação em Geografia Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro 2008.

MORAIS, F.; BACELLAR, L. A. P. Uso de traçadores na avaliação da infiltração em solos de áreas gnaissicas do Complexo do Baçõ, MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia* [S.I.], v. 9, n. 2, p. 83-93, 2008.



NDIAYE, B. *et al.* Effects of agricultural practices on hydraulic properties and water movement in soils in Britany (France) *Soil & Tillage Research* [S.I.], v. 93, p. 251-263, 2007.

NEGREIROS, A. B. *Respostas geohidroecológicas em clareira de deslizamento numa encosta florestada: alto rio dos macacos, maciço da tijuca (rj)*. (2006). 88 f. (Mestre) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro 2006.

NEWSON, M. *Hydrology and the River Environment*. Oxford: Oxford University Press, 1996.

NOGUCHI, S. *et al.* Subsurface runoff characteristics from a forest hillslope soil profile including macropores, Hitachi Ohta, Japan. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 15, n. 11, p. 2131-2149, 2001.

OLIVEIRA, S. N. *et al.* Identificação de unidades de paisagem e sua implicação para o ecoturismo no Parque Nacional da Serra dos Orgãos, Rio de Janeiro *revista Brasileira de Geomorfologia* [S.I.], v. 8, n. 1, p. 89-108, 2007.

O'LOUGHLIN, E. M. Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 53, p. 229-246, 1981.

OR, D. *et al.* *Agricultural and Environmental Soil Physics*. 2002. p.

PAIGE, G. B.; HILLEL, D. Comparision of Three Methods for Assessing Soil Hydraulic Properties. *Soil Science* [S.I.], v. 155, n. 3, p. 175-188, 1993.

PAIXÃO, F. J. R. *et al.* Estimativa da infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* [S.I.], v. 5, n. 1, p. 01-11, 2004.

PARK, S. J.; VAN DE GIESEN, N. Soil-landscape delineation to define spatial sampling domains for hillslope hydrology. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 295, n. 1-4, p. 28-46, 2004.

PEREIRA, F. A. C. *et al.* Comparação entre Condutividade Hidráulica Saturada Determinada em Campo e Laboratório *Magistra* [S.I.], v. 13, n. 1, p. 1-6, 2001.

PETRÓPOLIS, T. D. Desapropriação ameaça produtores do Bonfim. *TRIBUNA DE PETRÓPOLIS* 2009.

PORTELA, J. C. *et al.* Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistemas tabuleiros costeiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [S.I.], v. 5, n. 1, p. 49-54, 2001.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 27, p. 19-27, 2003.

REICHARDT, K. *Água em sistemas Agrícolas*. São Paulo: Manole, 1987.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A Reexamination of The Constant Head Well Permeameter Method for Measuring Saturated hydraulic Conductivity Above The Water Table. *Soil Science* [S.I.], v. 136, n. 4, p. 250-267, 1983.

\_\_\_\_\_. In Situ Measurement of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity, and The Alfa-Parameter Using The Guelph Permeameter. *Soil Science* [S.I.], v. 140, n. 4, p. 292-302, 1985.

\_\_\_\_\_. Measurement of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and The Conductivity-Pressure Head Relationship Using The "Guelph Permeameter". In: National Water Well Association Conference on Characterization and Monitoring of the Vadose (Unsaturated) Zone, November, Denver, Colorado. 1985.

REYNOLDS, W. D. *et al.* The Constant Head Well Permeater: Effect of Unsaturated Flow. *Soil Science* [S.I.], v. 139, n. 2, p. 172-181, 1985.

REYNOLDS, W. D.; ZEBCHUK, W. D. Hydraulic Conductivity in a Clay Soil: Two Measurement Techniques and Spatial characterization. *Soil Science Society American Journal* [S.I.], v. 60, p. 1679-1685, 1996.

RIBEIRO, K. D. *et al.* Relações matemáticas entre porosidade drenável e condutividade hidráulica do solo saturado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [S.I.], v. 11, n. 06, p. 600-606, 2007.

ROCHA, J. S. M.; KURTS, S. M. J. M. *Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas*. 4ª. ed. Santa Maria (RS): ed. Santa Maria: UFSM/CCR, 2001.

ROCHA, L. G. M. *Os parques nacionais do Brasil e a questão fundiária o caso do Parque Nacional da Serra dos Órgãos*. (2002). 203 f. (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, 2002.

\_\_\_\_\_. *Os parques nacionais do Brasil e a questão fundiária o caso do Parque Nacional da Serra dos Órgãos*. (2002). 203 f. - Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2002.

\_\_\_\_\_. A situação fundiária do Parque Nacional da Serra dos Órgãos In: CRONENBERG, C. C., E. B.V. (Ed.). *Ciência e Conservação na Serra dos Órgãos*. Brasília: Ibama, 2007.

ROTH, C. H. A framework relating soil surface condition to infiltration and sediment and nutrient mobilization in grazed rangelands of Northeastern Queensland, Australia. . *Earth Surface Processes and Landforms* [S.I.], v. 29, p. 1093-1104, 2004.

RUPP, D. E. *et al.* Analytical methods for estimating saturated hydraulic conductivity in a tile-drained field. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 289, p. 111-127, 2004

SAAD, A. M.; LIBARDI, P. L. *Uso do tensiômetro pelo agricultor irrigante*. São Paulo: IPT, 1992. Unpublished Work.

SALES, L. E. O. *et al.* Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo *Pesq. agropec. Brasília* [S.I.], v. 34, n. 11, p. 2091-2095, 1999.

SANTOS, I. Monitoramento e Modelagem de Processos Hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica. Florianópolis, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina 2009. 167f. (*Doutorado em Geografia*)

SCHOENEBERGER, P. J. *et al.* Physical property variation of a soil and saprolite continuum at three geomorphic positions. *soil Science Society American Journal* [S.I.], v. 59, p. 1389-1397, 1995.

SCHWARTZ, R. C. *et al.* Soil hydraulic properties of cropland compared with reestablished and native grassland. *Geoderma* [S.I.], v. 116, p. 47-60, 2003.

SHOCK, C. Instrumentos para determinação da umidade do solo. . *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. v. 27. Poços de Caldas: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1998.

SHOCK, C. *et al.* Calibration of watermark soil moisture sensors for irrigation management. . *Internacional Irrigation Show*. San Diego: The irrigation Association, 1998. p. 139-146.

SIDLE, R. C. Field observations and process understanding in hydrology: essential components in scaling. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 20, n. 6, p. 1439-1445, 2006.

SILVA, A. J. N. *et al.* Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um argissolo amarelo de Tabuleiro Costeiro. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 29, p. 833-842, 2005.

SILVEIRA, A. L. *et al.* Infiltração armazenamento no solo In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). *HIDROLOGIA* Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993.

SO, H. B. *et al.* The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia *Soil & Tillage Research* [S.I.], 2008.

SOUZA, A. P. D. *Mensuração do potencial matricial e da umidade através de tensiômetros, GMS e TDR em campo e em laboratório para fins de monitoramento da água no solo.* (2001). 68 f. (Bacharel em Geografia) - Departamento de Geografia Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. *Monitoramento da erosão de solos durante eventos pluviométricos: subsídio à compreensão dos processos erosivos em ambiente agrícola serrano.* (2003). 170 f. (Título de Mestre em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2003.

SOUZA, L. D. *et al.* Disponibilidade de Água em Pomar de Citros Sumetido a Poda e Subsolação em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. *Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP* [S.I.], v. 26 n. 1, p. 69-73, abril 2004.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. (Eds.) **Solos e fertilidade do solo** São Paulo Organização Andrei Editora Ltda, 6 ed. 2007.

THOMAS, E. L. Geomorfologia e agrossistemas: indicadores de degradação do solo. In: NUNES, J. O. R.; ROCHA, P. C. (Ed.). *Geomorfologia: aplicação e metodologias.* São Paulo: Expressão Popular, 2008. p. 33-56.

TIAN, D. *et al.* Variation in runoff with age of Chinese fir plantations in Central South China. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 22, p. 4870-4876, 2008.

TICEHURST, J. L. *et al.* Interpreting soil and topographic properties to conceptualise hillslope hydrology. *Geoderma*, [S.I.], v. 137, p. 279-292, 2007.

TROMP-VAN MEERVELD, H. J.; MCDONNELL, J. J. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. *Advances in Water Resources* [S.I.], v. 29, p. 293-310, 2006.

TUCCI, C. E. M.; CLARK, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *I Fórum Geo-Bio-Hidrologia: estudo em vertentes e microbacias hidrográficas.* v. único. Curitiba: UFPR, 1998. p. 39-49.

VIEIRA, B. C. *Caracterização in situ da Condutividade Hidráulica dos Solos e sua Influência no Condicionamento dos Deslizamentos da Bacia do Rio Papagaio, Maciço da Tijuca (RJ).* (2001). (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 2001.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes* [S.I.], v. 18, p. 791-805, 2004.

VIEIRA, S. R. *et al.* Spatial Variability of Field-Measured Infiltration Rate. *Soil Science Society American Journal* [S.I.], v. 45, p. 1040-1048, 1981.

\_\_\_\_\_. Spatial variability of hydraulic properties in a high structured clay soil. *International Conference and Workshop on the Validation of Flow and transport Models for the Unsaturated Zone*. Novo México: College of Agriculture and Home Economics, 1988.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China *Soil & Tillage Research* [S.I.], v. 60, p. 11-19, 2001.

WANG, K. *et al.* Characterizing heterogeneity of soil water flow by dye infiltration experiments. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 328, p. 559-571, 2006.

WANG, T. *et al.* Spatial trends in saturated hydraulic conductivity of vegetated dunes in the Nebraska Sand Hills: effects of depth and topography. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 349, p. 88-97, 2008.

WAHL, N. A. *et al.* Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: hydraulic conductivity, water repellency and water retention. *Physics and Chemistry of the Earth* [S.I.], v. 28, p. 1377-1387, 2003.

WEST, L. T. *et al.* Saturated hydraulic conductivity of soils in the southern Piedmont of Georgia, USA: Field evaluation and relation to horizon and landscape properties. *Catena* [S.I.], v. 73, p. 174-179, 2008.

WESTERN, A. W. *et al.* Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial. hydrological processes.. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 286, p. 113-134, 2004.

ZHOW, X. *et al.* Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena* [S.I.], v. 73, p. 180-188, 2008

ZHU, J.; MOHANTY, B. P. Effective scaling factor for transient infiltration in heterogeneous soils. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 96-108, 2006.

ZIMMERMANN, B. *et al.* The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* [S.I.], v. 222, p. 29-38, 2006.