

AVALIAÇÃO INTEGRADA DA INFILTRAÇÃO E DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL FRENTE A DIFERENTES EVENTOS DE CHUVAS – BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO VAÇUNUNGA (LUIS ANTÔNIO – SP), BRASIL

Integrated assessment of the infiltration and overland flow for different rainfall events – Córrego do Vaçununga basin, municipality of Luis Antônio, State of São Paulo, Brazil.

Janaina Barrios Palma*
Lázaro Valentin Zuquette*

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados da avaliação integrada das condições de infiltração e do escoamento superficial, assim como da aplicação do modelo de Green e Ampt (1911) considerando as modificações de Morel-Seytoux e Khanji (1976) e de Chu (1978) para chuvas com intensidades constantes e transientes. O estudo foi desenvolvido na Bacia do Córrego Vaçununga, na cidade de Luis Antônio (SP), estado de São Paulo, Brasil, por esta ter o substrato rochoso constituído na quase totalidade (90%) de arenitos da Formação Botucatu. Seu objetivo foi avaliar o comportamento de recarga e, conseqüentemente, o transporte de poluentes. Foram realizados ensaios *in situ* e em laboratório para caracterizar os materiais inconsolidados quanto aos índices físicos, capacidade de infiltração, sucção matricial e condutividade hidráulica. Os dados pluviométricos foram coletados de janeiro de 2000 a dezembro de 2002 e enquadrados em 12 cenários que representaram todos os tipos de precipitações ocorridas no período considerando-se a relação entre intensidade e tempo efetivo de duração. Observou-se que, embora os materiais geológicos da região apresentem homogeneidade textural, o comportamento hidrodinâmico sofre significativa influência do tipo de uso instalado e seu estágio em termos de manejo.

ABSTRACT – This work presents the results for infiltration and overland flow obtained according to Morel-Seytoux and Khanji (1976) and Chu (1978) adaptation of the Green and Ampt (1911) model for steady and transient rainfalls, respectively. The study was carried out in the Córrego do Vaçununga basin, in the city of Luiz Antônio, state of São Paulo, Brazil. Ninety percent of the basin is constituted of eolian sandstones of Botucatu Formation and residual unconsolidated materials. These two geological materials constitute the main aquifer of the region. Laboratorial and *in situ* tests were performed to characterize the unconsolidated materials in terms of basic physical properties, potential infiltration, suction and hydraulic conductivity. Rainfall data were collected from January of 2000 to December of 2002 and twelve scenarios were defined considering the intensities and duration. Instead of high homogeneity in terms of texture of unconsolidated materials the infiltration and overland flow ratio depends on the uses and associated management techniques.

Palavra Chave – Infiltração, escoamento superficial, aquífero, formação Botucatu.

*Escola de Engenharia de São Carlos. Email: lazarusl@sc.usp.br

1 – INTRODUÇÃO

Nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil ocorrem os arenitos de origem eólica da Formação Botucatu que se comportam como diferentes aquíferos. Esse sistema, com aproximadamente 10⁶km², tem uma parte que aflora, basicamente, de duas formas: (1) como um pacote altamente silicificado e fraturado, ou (2) como camadas pouco cimentadas e porosas que são geradoras de vazões de até 300m³/h em poços profundos. Na maior parte de sua extensão, os arenitos são recobertos por pacotes espessos de diversos materiais geológicos (basaltos da Formação Serra Geral e arenitos, siltitos e argilitos do Grupo Bauru), conferindo-lhes características de semiconfinamento. Porém, uma parcela dos arenitos não silicificados aflora recoberta por um pacote de materiais inconsolidados residuais arenosos e, em alguns locais, sobreposta por camadas pouco espessas de materiais inconsolidados retrabalhados areno-argilosos (colúvio), fruto da mistura de materiais inconsolidados argilosos oriundos dos basaltos (Formação Serra Geral) e arenosos dos arenitos (Formação Botucatu).

O conjunto dos materiais inconsolidados e arenitos é uma parte especial do aquífero geral, considerado livre e com recarga direta. A espessura do pacote é variável (de poucos metros a valores próximos a 100m), assim como sua continuidade lateral, visto que, em muitos canais de drenagem, o mesmo foi totalmente erodido, perdendo a continuidade.

Essa zona, além de ser o arcabouço de reserva de água subsuperficial, é a responsável por manter os canais com uma descarga básica.

A relação entre as chuvas e os materiais geológicos, em termos de infiltração (recarga) e escoamento superficial, é fundamental para o gerenciamento e planejamento da exploração das águas e, principalmente, para avaliar os eventos de contaminação e riscos associados. Devido ao aumento da ocupação e, conseqüentemente, do consumo de água do aquífero, surge a necessidade de planejar o uso e dar orientações quanto aos problemas ambientais. Apesar da grande importância socioeconômica do aquífero, há poucos estudos integrados destinados a avaliar as características da infiltração/descarga baseados em ensaios de campo e de laboratório. Conseqüentemente, não há muitas informações técnicas sobre a dinâmica das águas nestas áreas onde os arenitos e os materiais inconsolidados são aflorantes. Os trabalhos desenvolvidos até a atualidade são, predominantemente, sobre o comportamento dos poços profundos que, em decorrência do grande uso, em alguns locais, apresentam um rebaixamento intenso e variação da produção.

Um significativo número de estudos sobre avaliações dos parâmetros hidrogeológicos, considerando a bacia hidrográfica como unidade básica, pode ser encontrado na literatura, tanto nacional como internacional. Trabalhos como o de Colenbrander (1965) e o de Dunne e Black (1970) já apresentavam métodos de mensurar os aspectos envolvidos no ciclo hidrológico e de avaliar suas relações. Ando et al. (1983) monitoraram uma bacia hidrográfica em termos de precipitação, evapotranspiração, descarga e infiltração e, a partir dos dados obtidos, elaboraram um modelo hidrológico diário. Sullivan et al (1996) avaliaram o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica e, através de correlações entre estudos de campo e modelos de infiltração, observaram a grande influência do tipo de uso no comportamento hidrodinâmico. No entanto, trabalhos que envolvem uma análise integrada dos diferentes componentes de uma bacia para que sejam possíveis simulações diversas são raros e, normalmente, executados para condições muito diferentes das citadas anteriormente. Recentemente, alguns trabalhos considerando a integração de dados de campo e laboratoriais foram desenvolvidos em diferentes países para avaliar condições de recarga e aspectos da dinâmica das águas, como a relação escoamento superficial e infiltração, como os de Giambelluca et al. (1996), Abu-Taleb (1999), Gburek e Folmar (1999), Gau e Liu (2000), Lange et al. (2003), Cosh, Stedinger e Brutsaert (2004), Culligan et al. (2004), Lubczynski e Gurwin (2005) e Ghayoumian et al. (2005).

Segundo Dykes e Thornes (2000), a melhor combinação de técnicas para se obter uma resposta adequada sobre a dinâmica das águas envolve a obtenção de três grupos de informações: (1) informações sobre os materiais geológicos; (2) dados referentes às chuvas; e (3) respostas da interação do meio físico com os eventos de chuva.

Com o objetivo de avaliar o comportamento das águas nas áreas de ocorrência das condições de recarga direta, foi selecionada a bacia hidrográfica do Córrego Vaçununga, que é constituída, em 90% da sua extensão, de pacotes de arenitos recobertos pelos materiais inconsolidados residuais arenosos. A baixa heterogeneidade dos materiais geológicos na bacia hidrográfica do Córrego Vaçununga não é uma característica comum a toda a área de afloramento da Formação Botucatu. Assim, a bacia citada representa a condição mais favorável de recarga e, por esse motivo, foi selecionada para o desenvolvimento deste estudo.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho seguiu, em termos gerais, a sugestão básica de Dykes e Thornes (2000). Entretanto, especificamente, as informações foram obtidas pelos métodos que seguem:

- (1) Os materiais geológicos presentes na área foram mapeados na escala 1:10.000, caracterizados e classificados a partir de trabalhos de campo e de laboratório. As litologias rochosas e os materiais inconsolidados (distribuição e espessura) foram individualizados a partir de fotointerpretação e trabalhos de campo, enquanto a caracterização foi obtida por ensaios *in situ* e laboratoriais em amostras deformadas e indeformadas. Em laboratório, foram executados ensaios para determinar os índices físicos dos materiais inconsolidados segundo as normas ABNT (1984a), ABNT (1984b) e ABNT (1984c).
- (2) Ensaios específicos para caracterização da sucção, infiltração e condutividade hidráulica para diferentes condições de umidade foram desenvolvidos em laboratório e *in situ*, de acordo com os métodos descritos a seguir:

A medida de sucção matricial dos materiais inconsolidados foi obtida pelo método do papel de filtro (Whatman No. 42) segundo as recomendações de Marinho (1994), e a equação de calibração aplicada foi a de Chandler et al. (1992):

$$\log \psi = 6,05 - 2,48 \log wf \quad (1)$$

Sendo:

ψ : Sucção Matricial (MPa); e

wf: Umidade do papel de filtro (%).

A curva de retenção foi obtida a partir da equação (2) de Van Genuchten (1980), e o programa computacional utilizado foi o CURVARET – Versão 2.16 de 1992.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (2)$$

Sendo:

θ = Umidade volumétrica (cm^3/m^3);

θ_r = Umidade volumétrica residual (cm^3/m^3);

θ_s = Umidade volumétrica de saturação (cm^3/m^3);

ψ = Sucção matricial (KPa);

n, m = Parâmetros de ajuste da curva, onde: $m = 1 - 1/n$;

α = Parâmetros de ajuste ($1/\text{KPa}$).

A taxa de infiltração potencial depende de vários fatores, como o tipo e natureza dos materiais inconsolidados (textura, estrutura, grau de evolução, composição química e mineralógica), declividade do terreno, vegetação e outras formas de ocupação e profundidade do substrato rochoso. Ela foi avaliada a partir de ensaios de infiltração *in situ* utilizando-se o infiltrômetro de duplo anel e pelo método do perfil instantâneo modificado por Libardi (1980). O infiltrômetro de duplo anel é um dos equipamentos mais utilizados atualmente para medida de infiltração. Ele possibilita o fluxo de água através de volumes relativamente grandes de materiais inconsolidados, representando a geometria porosa dos materiais, além de ser simples e de fácil manejo. Uma limitação, mesmo quando se usa o duplo anel, é a infiltração horizontal induzida pelos fortes gradientes hidráulicos de pressão entre o solo muito úmido sob o infiltrômetro e o solo seco circundante, já que os anéis são cravados poucos centímetros (15 cm) no terreno. Foram realizados doze ensaios buscando abranger os diferentes tipos de materiais geológicos e os principais usos, sendo nove em materiais inconsolidados arenosos (residual da Formação Botucatu), dois em residuais argilosos (Formação Serra Geral) e um em materiais aluvionares.

A condutividade hidráulica saturada foi calculada pela equação 3 (para carga constante):

$$k_{fs} = \frac{Q}{\left(\frac{H + Z_W}{Z_W} \right) A \cdot t} \quad (3)$$

Onde: k_{fs} = Condutividade hidráulica saturada de campo (m/h); Z_W = Profundidade da frente saturada (m); A = Área da seção do anel (m²); t = tempo (H); Q = Volume de água infiltrada (m³); H = profundidade da água no anel quando é ensaiada a regime constante (m).

Para obter a função de redistribuição da água no solo, além das coletas iniciais, foram amostrados três perfis em tempos subseqüentes que permitiram avaliar a velocidade da drenagem interna.

O ensaio de perfil instantâneo modificado por Libardi (1980) tem como principal vantagem, em relação ao duplo anel, permitir a definição de equações que correlacionam condutividade hidráulica com umidade volumétrica, segundo a equação:

$$K(\theta) = K_0 \times e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad (4)$$

Sendo: $K(\theta)$ a condutividade hidráulica não saturada em função da umidade volumétrica (θ), K_0 a condutividade hidráulica saturada, γ o coeficiente linear do gráfico de umidade volumétrica versus tempo, θ o valor de umidade volumétrica de correlação e θ_0 a umidade volumétrica saturada. Foram realizados 4 ensaios buscando caracterizar os tipos de materiais inconsolidados e de usos da bacia. Neste trabalho, são apresentados os 3 ensaios em material arenoso. Para a realização, foi construída uma estrutura em forma de piscina com área de 9 m², e o volume de água infiltrado foi de 7 m³; as paredes foram construídas com o solo do local e cobertas com plástico para evitar perdas de água. A água foi sendo colocada lentamente de acordo com a velocidade de infiltração com vistas a manter o nível de água constante (lâmina mínima de água de 10 cm) e evitar deformar a estrutura do solo. Imediatamente após a infiltração, foram feitas tradagens para a coleta de amostras de 20 em 20 cm para a determinar da umidade e avaliar a redistribuição da água (em espaços irregulares de tempo).

- (3) Os dados de precipitação e intensidade de chuva foram obtidos para o período de Janeiro de 2000 a dezembro de 2002, por meio de um pluviógrafo com medidas contínuas de precisão de 5 minutos, e, em razão da extensão da bacia, os valores foram considerados

homogêneos para toda a bacia. Todos os dados foram analisados e 12 eventos foram selecionados por representar os diferentes cenários de chuvas ocorridos nesse período de 3 anos.

A evapotranspiração não foi considerada nesta análise, pois a umidade relativa do ar estava alta e os eventos de chuvas considerados ocorreram em intervalos de tempos relativamente curtos.

(4) Para avaliar o comportamento dos diferentes eventos de chuva frente às características do meio físico, foram aplicados modelos de infiltração da água no solo.

Existem diversos modelos matemáticos para descrever o processo de infiltração. Entre eles, destaca-se o modelo de Green e Ampt (1911), que é baseado em equações físicas e tem como vantagens a facilidade de obtenção dos parâmetros necessários para simular diversos tipos de condições de solo, a simplicidade e a possibilidade de adaptação a diversos cenários. As principais limitações são: considerar apenas solos homogêneos e assumir que o movimento da água ocorre em forma de frente de molhamento com limite bem definido entre a zona saturada e não saturada (mudança abrupta do valor de umidade). Vários estudos baseados no conceito da equação inicial de Green e Ampt (1911) foram desenvolvidos visando-se superar as limitações citadas. Bouwer (1969) utiliza o conceito para solos com várias camadas e com valores de umidade inicial não-homogêneos no perfil; Swartzendruber (1974) avalia o comportamento antes e após o material atingir a saturação, obtendo a altura de infiltração acumulada em função do tempo; Morel – Seytoux e Khanji (1976), além das modificações anteriores, também consideram valores de sucção; Chu (1978) avalia chuvas com intensidades variáveis. Além destes trabalhos, cabe destacar as modificações de Smith & Parlange (1978), Flerchinger et al. (1980), Philip (1993) e Salvucci e Entekhabi (1994) e Esteves et al. (2000).

Os eventos de chuvas podem ser considerados constantes em um determinado intervalo de tempo ou com intensidades variáveis ao longo do período da precipitação. Para considerar essas situações, foram aplicados o modelo de Morel – Seytoux e Khanji (1976) para intensidade de precipitação constante e o modelo de Chu (1978) para intensidade variável em um mesmo evento de chuva, subdividindo-se o evento de chuva e calculando-se os parâmetros para cada intervalo de tempo. As equações representativas dos modelos a partir do tempo de *ponding* são:

<p>Morel – Seytoux e Khanji (1976)</p> $tp = [(\theta - \theta_i) \cdot Hb(\theta, \theta_i)] / r (r/K - 1) \quad (5)$ <p>sendo:</p> <p>θ: Umidade volumétrica saturada (m^3/m^3);</p> <p>θ_i: Umidade volumétrica inicial (m^3/m^3);</p> <p>Hb: Capilaridade efetiva (m);</p> <p>K: Condutividade hidráulica saturada (m/h);</p> <p>r: Intensidade de chuva (m/h);</p>	<p>Chu (1978)</p> $tp = \{[KSM/(I-K) - P_{(t_{n-1})} + R_{(t_{n-1})}]/I\} + t_{n-1} \quad (6)$ <p>K: Condutividade hidráulica saturada (m/h);</p> <p>S: Diferença entre a capilaridade potencial no tempo inicial e a final (m);</p> <p>M: Diferença entre a umidade volumétrica inicial e a final;</p> <p>I: Intensidade de chuva (m/h);</p> <p>P: Precipitação acumulada até t_{n-1} (m); e</p> <p>R: Escoamento superficial até t_{n-1} (m).</p>
---	---

A altura de chuva infiltrada, calculada pelo modelo de Chu (1978), reflete a quantidade da chuva que efetivamente se infiltra. Assim, se o evento de chuva não gerou *ponding*, toda a precipitação irá infiltrar.

O tempo de *ponding* será zero para chuvas com intensidade igual à capacidade de infiltração, e o *ponding* não ocorre se a intensidade de chuva for menor que a capacidade de infiltração. Se a intensidade da precipitação (P em m/h) não exceder a capacidade de infiltração, pode-se assumir que todo o volume irá infiltrar e não ocorrerá escoamento superficial. No entanto, ainda que P seja maior que a capacidade de infiltração, o escoamento superficial pode não ocorrer em função de acúmulos em superfície.

$$P = F + R$$

$$\text{Se } R = 0 \rightarrow F = P.$$

Sendo:

P: precipitação (m);

F: altura real de chuva infiltrada (m);

R: escoamento superficial (m).

O modelo de Morel-Seytoux e Khanji (1976) permite obter a altura potencial de água infiltrada (W) em mm, considerando vários fatores, conforme o seguinte modelo matemático proposto por Abdulaziz e Turbak (1996):

$$W = i_r t_p + [2(\theta - \theta_i) H_c K]^{1/2} \frac{i_r^*}{i_r^* - 1} \left[(t - t_p) + \frac{t_p}{2} \left(\frac{i_r^*}{i_r^* - 1} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{t_p}{2} \left(\frac{i_r^*}{i_r^* - 1} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} + K(t - t_p) \quad (7)$$

sendo:

i_r : intensidade de chuva (m);

i_r^* : intensidade da chuva normalizada (m);

K: condutividade hidráulica saturada (m/h);

t: tempo de duração da chuva (h);

θ : umidade volumétrica saturada (m³/m³);

θ_i : umidade volumétrica inicial (m³/m³);

t_p : tempo de ponding (h); e

H_c : altura de capilaridade (m).

O cálculo da altura potencial de água infiltrada obtido pelo modelo de Morel – Seytoux e Khanji (1976) reflete o valor potencial considerando que a duração da chuva (t) seja igual ou maior que o tempo de *ponding*.

3 – RESULTADOS

3.1 – Características gerais da área

A Bacia hidrográfica do Córrego Vaçununga está localizada na região de Luís Antonio, nordeste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 21° 30' - 21° 45' latitude Sul, e 47° 30' - 47° 45' longitude Oeste (Figura 1), com 80,53 Km², perímetro de 41,25 Km e altitudes variando de 620 m a 871 m. O clima, de acordo com a Classificação de Koeppen, está entre o grupo A e o C e apresenta características bem definidas com inverno (seco) e verão (úmido). A temperatura média varia de 13° C a 30° C, com média anual de 23° C e pluviosidade anual média de 1300 mm.

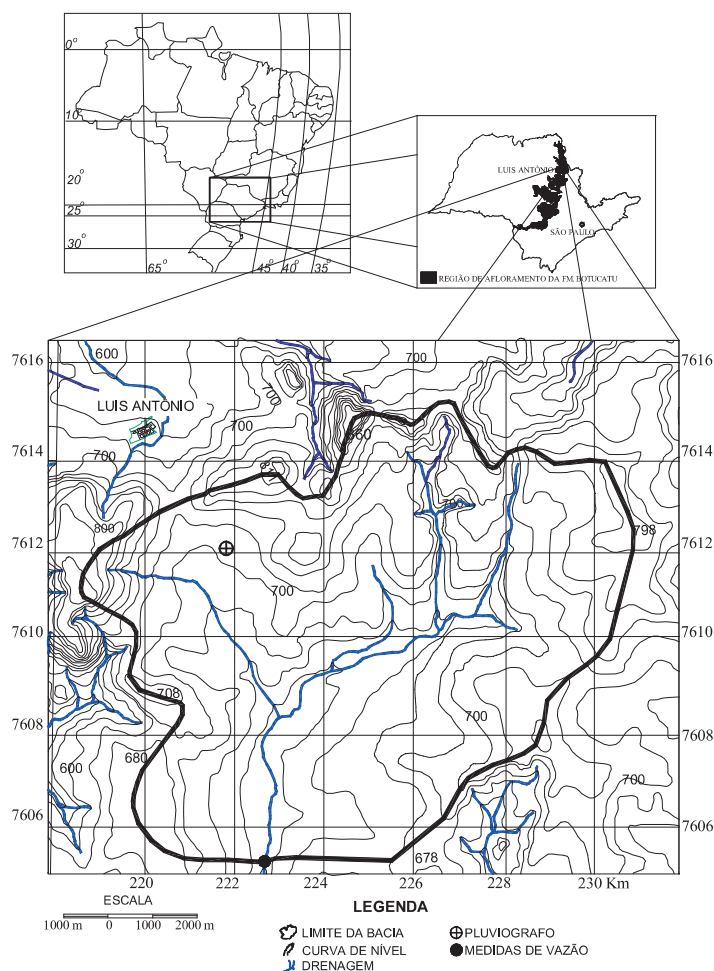


Fig. 1 – Localização da Bacia hidrográfica do Córrego Vaçununga (Zona UTM – 23S).

3.2 – Precipitação

Os valores de precipitação para os anos de 2000, 2001 e 2002 obtidos a partir de pluviogramas com medidas de precisão de 5 minutos permitiram avaliar os eventos de chuvas e definir 12 cenários (Tabela 1) que representam a variabilidade das precipitações ocorridas no período (relação intensidade de chuva e tempo efetivo de chuva).

3.3 – Substrato rochoso

A bacia é constituída por arenitos da Formação Botucatu (cerca de 90%) e basaltos da Formação Serra Geral aflorantes em pontos isolados da área, recobrendo os arenitos. Os arenitos são homogêneos quanto à textura (fina a média) e mineralogia (basicamente quartzo), de origem eólica, com grãos bem selecionados e arredondados, com superfície fosca; a cor varia de amarelo claro até avermelhado, e pouco cimentados. Os poços profundos na bacia indicam que a espessura da Formação Botucatu na área ultrapassa 50 m.

Tabela 1 – Características dos cenários quanto às intensidades e duração das chuvas.

Cenários	Tempo Parcial – Condição Transiente (h)	Tempo Total – Condição Constante (h)	Intensidade (m/h)	Cenários	Tempo Parcial – Condição Transiente (h)	Tempo Total – Condição Constante (h)	Intensidade (m/h)
1	0,166		0,012	6	0,166		0,0204
	0,333		0,036		0,499		0,0740
	1,333		0		1		0,0090
	1,666	1,666	0,009		2	2	0,0130
2	0,166		0,024	7	0,166		0,0564
	1,166	1,166	0,008		0,333		0,0234
3	0,333	0,333	0,0174		1,333	1,333	0,0019
4	0,333	0,333	0,0024	8	2		0,0037
	0,833		0,0036		2,166	2,166	0,0096
	1,833		0,002	9	0,166		0,0168
	2,333		0,024		0,333		0,0384
	3,333		0,002		1	1	0,0540
	4,333	4,333	0,0008	10	3,5	3,5	0,0020
5	0,083	0,083	0,1056	11	0,333	0,333	0,0420
				12	0,166		0,0684
					1,499	1,499	0,0405

3.4 – Material inconsolidado

Os materiais inconsolidados (Figura 2) foram classificados em materiais retrabalhados e residuais. Os materiais inconsolidados residuais dos arenitos ocupam a maior parte da área e são caracterizados por apresentarem elevada percentagem de areia (Tabela 2), cor predominante amarela a avermelhada em alguns pontos; a espessura é superior a 5m e inferior a 20m, apresenta alta homogeneidade vertical e lateral em termos granulométricos.

Os residuais da Formação Serra Geral são encontrados nos topos dos morros e apresentam pequenas espessuras. Granulometricamente, há predomínio da faixa argila e silte, e sua composição mineralógica engloba argilominerais (destacando-se a caulinita), quartzo, gibsit, hidróxidos de ferro, magnetita e ilmenita, além de feldspatos nos horizontes de rochas alteradas e saprolitos.

Os materiais retrabalhados mistos são originados da mistura dos residuais argilosos da Formação Serra Geral e dos materiais arenosos da Formação Botucatu, e a proporção destes materiais varia em função da proximidade do corpo de basalto. Na bacia, apresentam pequena espessura e distribuição lateral.

Outro tipo de material presente na área são os materiais retrabalhados aluvionares, que compreendem os materiais formados pela sobreposição de camadas sedimentares recentes, de natureza heterogênea, ocupando áreas de baixa declividade (0 – 2%) próximas ao leito do Córrego Vaçununga. Eles apresentam espessura variada e coeficiente de permeabilidade próximo a 10^{-3} cm/s. A Tabela 2 mostra os valores referentes às diferentes frações granulométricas e do peso específico dos sólidos para os diversos tipos de materiais inconsolidados.

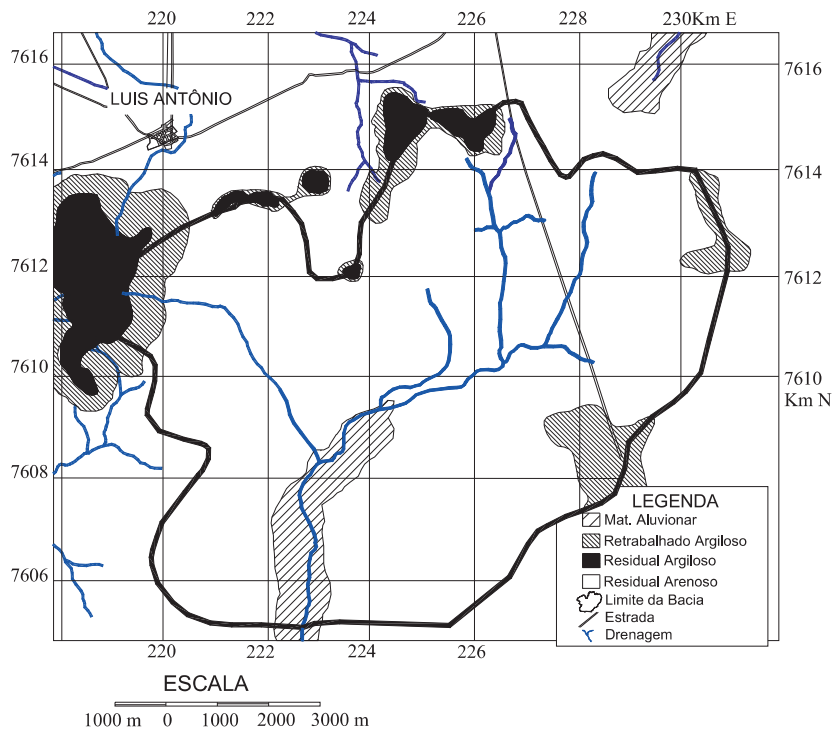


Fig. 2 – Mapa de materiais inconsolidados.

Tabela 2 – Resultados de ensaios laboratoriais para os materiais inconsolidados.

Tipo de Material Inconsolidado	γ_s * (kN/m³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Porosidade (%)	γ_d ** (kN/m³)
Residual da Fm Botucatu	26,71 a 27,60	0 a 5	8 a 18	35 a 41	38 a 49	0 a 3	41 a 54	11,7 a 15,1
Residual da Fm Serra Geral	27,89 a 28,73	40 a 44	30 a 35	15 a 21	3 a 5	0 a 4	36 a 51	14,7 a 16,3
Retrabalhado Misto	26,70 a 27,99	31 a 37	20 a 25	11 a 29	10 a 29	3 a 6	44 a 49	13,1 a 15,7
Aluvionar	27,10	0 a 4	7 a 31	11 a 39	15 a 41	0 a 6	40 a 50	14,2 a 15

* Peso específico dos sólidos

** Peso específico aparente seco natural

3.5 – Uso e ocupação

A delimitação das unidades do Mapa de Uso e Ocupação foi desenvolvida a partir de controle de campo e imagem de satélite. A bacia é ocupada, basicamente, por plantações de cana-de-açúcar e eucaliptos, e, secundariamente, aparecem as pastagens (Figura 3). Esse mapa orientou quanto à escolha dos locais para os ensaios de infiltração, pois o tipo de manejo e uso afeta a taxa de infiltração. O manejo da cana-de-açúcar apresenta 2 fases distintas: sulcamento do solo para o plantio e posterior manutenção durante um período de 5 anos. Durante a fase do sulcamento, as estruturas da camada superficial são destruídas, e a capacidade de infiltração é muito alta. Depois, instala-se o processo de sealing, e a infiltração diminui consideravelmente.

Os eucaliptos são plantados nesta área há aproximadamente 30 anos, em corredores e, ao atingir o tamanho ideal (com cerca de 8 anos), são cortados, e são plantadas novas mudas nos espaços utilizados anteriormente como corredores. O grau de compactação dos materiais inconsolidados é baixo e, devido às queimadas freqüentes, é possível encontrar carvão vegetal na parte superior do solo (aproximadamente 30 cm), o que gera uma estrutura diferenciada.

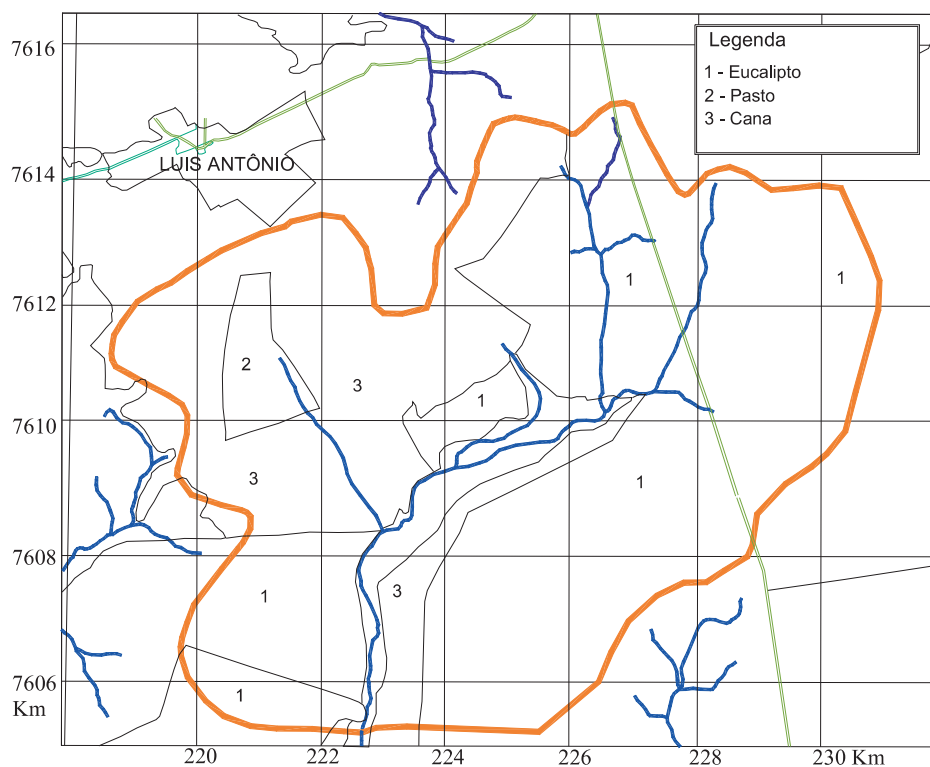


Fig. 3 – Mapa da distribuição dos usos e ocupações.

3.6 – Ensaios de sucção

A sucção matricial dos materiais inconsolidados foi obtida pelo ensaio de papel de filtro segundo orientações de Marinho (1994). Para cada tipo de material inconsolidado foram coletadas 12 amostras indeformadas com profundidade média de 30 cm (Figura 4).

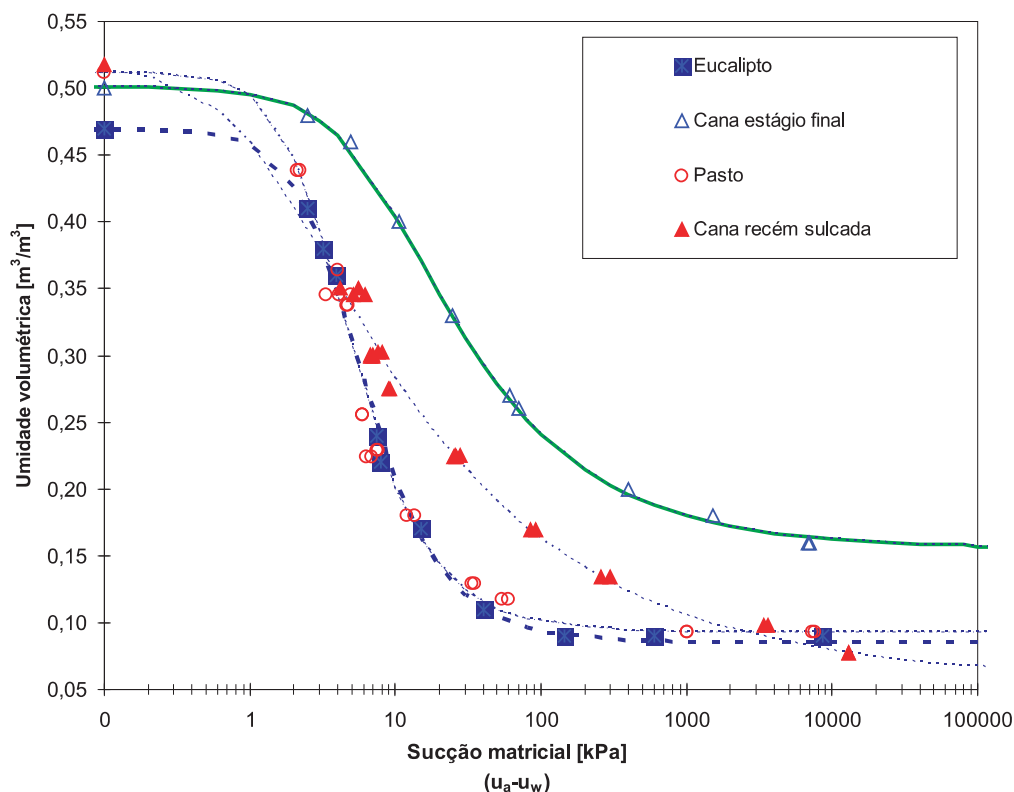


Fig. 4 – Curvas de Retenção para os materiais inconsolidados residuais arenosos.

Observa-se que, embora com valores de índices físicos semelhantes, os materiais inconsolidados apresentam comportamento diferenciado. Os valores de sucção matricial estão relacionados ao tamanho dos poros e as características eletroquímicas dos minerais. Assim, mesmo com valores de porosidade total semelhantes, a sucção resultante pode apresentar valores diferentes, importantes para o entendimento da dinâmica da água no solo. Sullivan et al. (1996) mostram que mesmo uma pequena variação pode afetar de maneira significativa o início do escoamento superficial.

A curva de retenção para a condição com cana-de-açúcar no estágio final do ciclo reflete a compactação e a consequente diminuição nos tamanhos dos poros, devido ao manejo (uso de máquinas pesadas) e o uso de fertilizantes, predominantemente, sais que auxiliam na defloculação dos agregados.

3.7 – Ensaio de infiltração

(1) Ensaio de infiltração com duplo anel

Os ensaios de infiltração com duplo anel indicam valores de condutividade hidráulica saturada variando de $3,65 \times 10^{-5}$ e $1,48 \times 10^{-6}$ cm/s para os materiais inconsolidados residuais de basalto, entre $3,2 \times 10^{-3}$ e $2,01 \times 10^{-5}$ cm/s para os materiais inconsolidados residuais arenosos, e $4,52 \times 10^{-4}$ cm/s para os materiais inconsolidados aluvionares. O valor obtido para os materiais inconsolidados mistos foi da ordem de $5,18 \times 10^{-5}$ cm/s. Os ensaios também permitiram a obtenção da capacidade de

infiltração do material (corresponde à taxa de infiltração por tempo) que indica a capacidade máxima de infiltração do solo, determinando o excedente de água que será revertido em escoamento superficial. A Figura 5 apresenta os dados referentes aos valores obtidos nos ensaios em materiais inconsolidados arenosos, e observa-se que, apesar da relativa homogeneidade textural, os ensaios apresentaram uma significativa variação da capacidade de infiltração em função do uso. Os dados de materiais arenosos, por serem predominantes na bacia e controladores da dinâmica da água são, conseqüentemente, controladores da recarga e do transporte de poluentes.

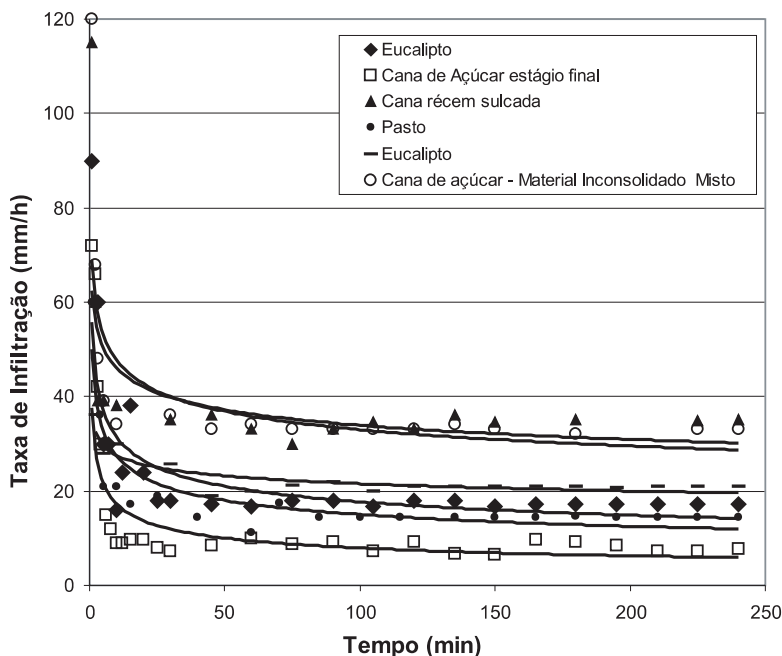


Fig. 5 – Capacidade de infiltração para os materiais inconsolidados residuais arenosos com diferentes usos e misto com cana-de-açúcar.

A variação da taxa de infiltração (capacidade de infiltração) com o tempo para o mesmo material inconsolidado e mesmo uso é função, principalmente, da alteração dos valores de umidade volumétrica. Os pontos iniciais do gráfico (perfil seco) são chamados de capacidade de infiltração máxima, e o segmento final reflete a capacidade de infiltração mínima do material, compatível com a condição saturada.

Nota-se que a alteração nos valores de taxa de infiltração não ocorre de forma linear em função do tempo. Os resultados de infiltração são altos na parte inicial e decrescem rapidamente, com tendência a permanecer constantes após um determinado momento, sendo que o tempo médio observado foi de aproximadamente 45 minutos. No tempo inicial, ocorrem a saturação da camada superior do solo e altos valores de potencial mátrico; a partir do ponto de inflexão da curva, a frente se comporta como um pistão, como sugerido por Green e Ampt (1911), fazendo com que a taxa de infiltração seja constante. A curva de infiltração para as condições com cana-de-açúcar em estágio final reflete as menores taxas de infiltração, confirmando as curvas de retenção.

Embora a influência do uso seja mais acentuada nas camadas superiores, observam-se variações nas características de redistribuição da água nas camadas mais profundas (Figura 6).

Nota-se na Figura 6 que, apesar de os materiais apresentarem valores de umidade inicial semelhantes, a forma da frente de molhamento é muito diferente. O perfil (A) reflete um aumento gradual no valor de umidade, ao passo que no perfil (B) aparece um nível definido do posicionamento da frente (aproximadamente a 125 cm). O volume de água infiltrada foi de aproximadamente 0,210 m³/m² (coluna de água infiltrada durante o ensaio de 22 cm/2 h) para o material da Figura 6(A) e de 0,280 m³/m² (altura da coluna de água infiltrada de 28 cm/h) para o material do perfil da Figura 6(B). Essas variações podem ser atribuídas aos diferentes valores de condutividade hidráulica não saturada.

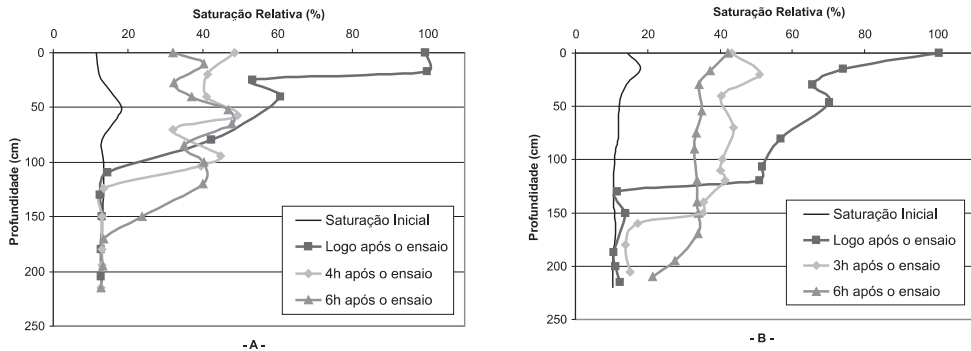


Fig. 6 – Curva de umidade após os ensaios de infiltração para os materiais inconsolidados arenosos.
(A) Material ocupado com cana-de-açúcar; (B) Plantações de eucalipto.
Nos dois ensaios, o tempo de percolação total foi de 2 horas.

(2) Ensaios de infiltração segundo o método do perfil instantâneo.

3.8 – Material inconsolidado residual arenoso – Plantação de eucalipto

O tempo necessário para a infiltração da água foi de aproximadamente 2 horas. Este material apresenta valores variando para o peso específico dos sólidos e seco, de 27,42 a 27,60 kN/m³, e de 14,2 a 15,60 kN/m³, respectivamente, e para a porosidade de 0,42 a 0,50.

Os resultados do ensaio de infiltração (Figura 7A) indicam que nos tempos iniciais a velocidade de redistribuição da água é alta. No entanto, após 21 horas, a umidade volumétrica atinge valores próximos à capacidade de campo, e os valores de umidade ficam, praticamente, estáveis durante as demais tratagens (aproximadamente 0,13 m³/m³). Correlacionando os dados obtidos entre a curva de retenção e o perfil de distribuição de água no solo a partir do ensaio de infiltração, obtém-se a distribuição do potencial de sucção mátrico em função do tempo e da profundidade (Figura 7B), sendo possível observar, melhor, a frente de molhamento, com comportamento similar à condição considerada no modelo de infiltração de Green e Ampt (1911).

Os valores de condutividade hidráulica variaram no perfil, sendo que a condutividade hidráulica saturada (K_s) obtida da superfície até a profundidade de 20 cm foi 0,00771 cm/s, com a equação de correlação com a umidade volumétrica: $K(\theta) = 0,00771548 \times e^{46,5116(\theta - 0,429)}$; no intervalo de 20 a 40 cm, foi de 0,0099 cm/s, e a equação foi $K(\theta) = 0,00998281 \times e^{47,6190(\theta - 0,372)}$; para o intervalo de 60 a 120 cm, foi de 0,001647 cm/s, com a equação de $K(\theta) = 0,001647715 \times e^{52,9101(\theta - 0,427)}$. Profundidades maiores que 120 cm apresentam K_s médio de 0,0078236 cm/s e a equação $K(\theta) = 0,00782366 \times e^{41,6667(\theta - 0,442)}$.

3.9 – Material inconsolidado residual arenoso – Plantação de cana-de-açúcar

Os materiais arenosos ocupados com cana-de-açúcar podem apresentar dois comportamentos bem distintos, dependendo do estágio da cultura: (1) No primeiro estágio, imediatamente após a aração do solo, verificam-se valores muito altos de condutividade hidráulica ($K_o = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) e de taxa de infiltração (Figura 4); (2) Com a evolução da cultura da cana, o material inconsolidado torna-se mais compacto devido ao trânsito de máquinas pesadas, favorecendo o escoamento superficial. A primeira condição não foi ensaiada pelo método de umidade de Libardi (1980), pois para todos os eventos de chuvas observados no período, não foram registradas intensidades que gerassem escoamento superficial. Assim, toda a precipitação será infiltrada.

Os índices físicos indicam também a homogeneidade vertical do pacote, sendo que o peso específico dos sólidos e o específico seco variam de 27,23 a 27,6 kN/m^3 , e de 14,10 a 15,6 kN/m^3 , respectivamente, enquanto a porosidade varia de 0,43 a 0,48.

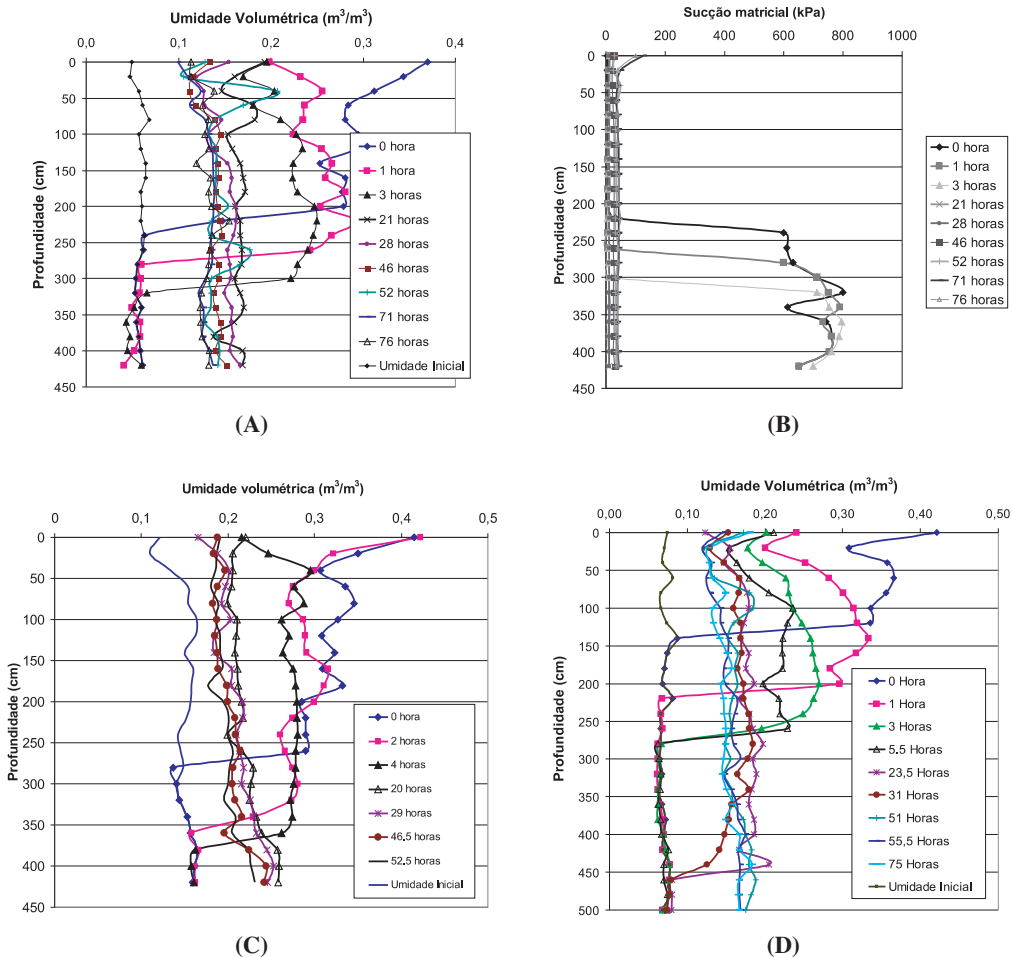


Fig. 7 – Variação da redistribuição da umidade volumétrica (A) e da sucção matricial em função do tempo (B) no material inconsolidado residual arenoso - eucalipto; (C) redistribuição da água no material inconsolidado residual arenoso – cana-de-açúcar; e (D) redistribuição da água no material inconsolidado residual arenoso com pastagem.

O solo ocupado por cana-de-açúcar apresentou dois intervalos bem definidos de valores de condutividade hidráulica (Figura 7C): (1) do topo até a profundidade de 80cm obtiveram-se valores de K_0 variando de 0,000113 a 0,00066 cm/s, com as respectivas equações de correlação (máximo e mínimo obtido): $K(\theta) = 0,00011 \times e^{26,5252(\theta - 0,3071)}$ e $K(\theta) = 0,000657 \times e^{62,1118(\theta - 0,35)}$.

(2) Em profundidades superiores a 80 cm, observam-se valores maiores de K_0 e com pequena variação de K_0 , variando de 0,00201 cm/s a 0,00298 cm/s, e com as equações de condutividade hidráulica não saturada máximas e mínimas em função do valor de umidade de $K(\theta) = 0,002012 \times e^{32,0513(\theta - 0,3454)}$ e $K(\theta) = 0,00298 \times e^{45,6621(\theta - 0,3898)}$.

O valor de umidade volumétrica média para as tradagens finais foi de aproximadamente 0,2 m³/m³.

3.10 – Material arenoso – Pastagem

Além da tradagem inicial, foram realizadas mais 6 tradagens em espaços irregulares de tempo. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 7D. Para profundidades de até 120 cm, os índices físicos apresentam baixa variação, sendo que o peso específico dos sólidos e o específico seco variam de 25,96 a 26,15 kN/m³, e de 14,22 a 16,10 kN/m³, respectivamente, enquanto a porosidade varia de 0,42 a 0,49.

Os valores de condutividade hidráulica determinam 3 intervalos de comportamento hidrodinâmico. O valor de K_0 até 20 cm foi de 0,0024865 cm/s e $K(\theta) = 0,0024865 \times e^{52,91005(\theta - 0,3079)}$ e, para profundidades de 20 cm a 80 cm, tem K_0 médio de 0,004615 cm/s e $K(\theta) = 0,0046154 \times e^{56,4971(\theta - 0,3575)}$ e profundidades maiores que 80cm com K_0 de 0,00162 cm/s e $K(\theta) = 0,001623 \times e^{31,15265(\theta - 0,3361)}$. O valor de umidade volumétrica nas tradagens finais foi de aproximadamente 0,15 m³/m³.

Os ensaios de infiltração de duplo anel e do perfil instantâneo apresentaram boa concordância entre os valores. O ensaio de perfil instantâneo proposto por Libardi (1980) tem a vantagem de permitir avaliar a condutividade hidráulica para cada profundidade do perfil amostrado e obter o valor de condutividade hidráulica para condições não saturadas. No entanto, como neste estudo é aconselhável trabalhar com um valor de condutividade hidráulica médio para o pacote superior de solo, optou-se por utilizar os dados obtidos nos ensaios de duplo anel que refletem o comportamento da camada superior (aproximadamente 1,5m). Os valores obtidos para K_0 foram de $5,2 \times 10^{-4}$ cm/s, $4,52 \times 10^{-4}$ cm/s e $1,82 \times 10^{-5}$ cm/s para os materiais com eucalipto, com pasto e com cana-de-açúcar, respectivamente.

A influência do tipo de uso e manejo na taxa de infiltração tem sido documentada em vários trabalhos, como Sharma et al. (1980) e Gaze et al. (1997). Casenave e Valentin (1992) citam que a taxa de infiltração é função da combinação da intensidade de chuva, das condições superficiais do solo e relevo. Gaze et al (1997) mediram a infiltração através de tensiômetros em uma bacia hidrográfica ocupada com plantações de milho e verificaram que o valor da infiltração pode ser três vezes maior em um ponto que em outro em função do estágio evolutivo da plantação.

O comportamento da condutividade hidráulica para condição não saturada mostrou ser diferente em função do uso, mesmo com materiais inconsolidados com características físicas similares, e com variabilidade muito baixa (inferior a 5%).

4 – INTERAÇÃO ENTRE CHUVAS E MATERIAIS GEOLÓGICOS

Os cenários foram simulados para os três tipos de uso e cenários de chuva, gerando 36 modelos de interação entre meio físico e chuvas.

Os valores de tempo de *ponding* (tp) e infiltração foram obtidos a partir do modelo geral de Green e Ampt (1911) aplicando-se as modificações de Morel-Seytoux e Khanji (1976), para condições de chuvas constantes (estado de equilíbrio) e de Chu (1978) para situações de chuva transiente (Figuras 8 A, B). Os resultados de tempo de *ponding* obtidos pelo método de Chu (1978) são mais adequados e dentro do esperado em termos teóricos do que os de Morel-Seytoux e Khanji (1976).

A variação de tempo de *ponding* pode ser atribuída à forma em que cada modelo considera a umidade inicial e os valores de intensidade de chuva. É possível observar que, para chuvas com intensidade baixa (<0.005 m/h), existe a tendência que todo volume de água infiltre, principalmente em solos ocupados com eucalipto e pasto (taxa de infiltração $>$ Intensidade de chuva), como é observado nos dois modelos aplicados, principalmente, nos cenários 1, 2, 4, 8 e 10.

Comparando-se os resultados obtidos, verifica-se uma boa correlação quanto à existência ou ausência de tempo de *ponding* para as simulações com o modelo de Morel – Seytoux e Khanji (1976) e o de Chu (1978). Para as simulações que consideram o uso com cana, apenas o cenário 10 não apresentou tempo de *ponding* para o modelo de Chu (1978) devido à baixa intensidade de chuva.

O cenário 5 apresenta a chuva com maior intensidade e representa uma chuva de verão típica, com alta intensidade e pequena duração. Conseqüentemente, o tempo de *ponding* obtido é muito baixo.

Na Figura 8 (C, D), observa-se que os valores para infiltração gerados pelos dois modelos fornecem 3 agrupamentos de valores relacionados aos tipos de ocupação (cana-de- açúcar, eucaliptos e pastagem) e refletem as diferentes características de fluxo de águas. Os resultados constantes da Figura 8 comprovam a influência dos tipos de ocupação na dinâmica das águas, controlando as taxas de infiltração e escoamento superficial.

O valor de umidade volumétrica inicial influi nos resultados dos modelos e foi considerado igual para todos os cenários ($0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$), permitindo comparar os valores obtidos, conforme resultados apresentados nas Figura 8. A adoção deste valor buscou representar uma condição (solo úmido) propícia à formação de *ponding*, com valor de umidade próximo à capacidade de campo. Com o objetivo de avaliar a influência da umidade, foram realizadas simulações alterando esse parâmetro. O cenário 5 foi selecionado por apresentar tempo de *ponding* e infiltração para os 3 tipos de uso, senão os resultados encontrados na Tabela 3; situações semelhantes são observadas em todos os cenários.

O cenário 5 é caracterizado por chuva de alta intensidade e tempo de *ponding* muito pequeno. Nesse tipo de condição, observou-se que o valor de umidade inicial tem pequena importância. Porém, para precipitações com intensidades baixas ou moderadas, a influência do valor de umidade inicial é significativa. Na Tabela 4, são apresentados os valores de tempo de *ponding* para 3 cenários de chuva considerando os materiais com plantações de cana-de- açúcar, sendo possível observar a importância da umidade volumétrica inicial. Os cenários 8 e 10 foram selecionados por representar as condições de maior tempo de *ponding* e refletirem variações de tempo de *ponding* com mudanças nos valores de umidade. O cenário 6 indica condições de menor influência da umidade em função do menor tempo de *ponding*.

Como é possível notar na Tabela 4, a umidade inicial tem grande influência no tempo de *ponding*, já que afeta a capacidade de infiltração da água nos materiais geológicos (Figura 4). As variações são mais significativas em precipitações com intensidades menores, portanto, mesmo chuvas de baixa intensidade com duração muito longa ($>10\text{h}$) ou em final do período chuvoso podem gerar escoamento superficial. Condição semelhante é observada no cenário 6, quando da simulação com as condições consideradas no modelo de Chu (1978).

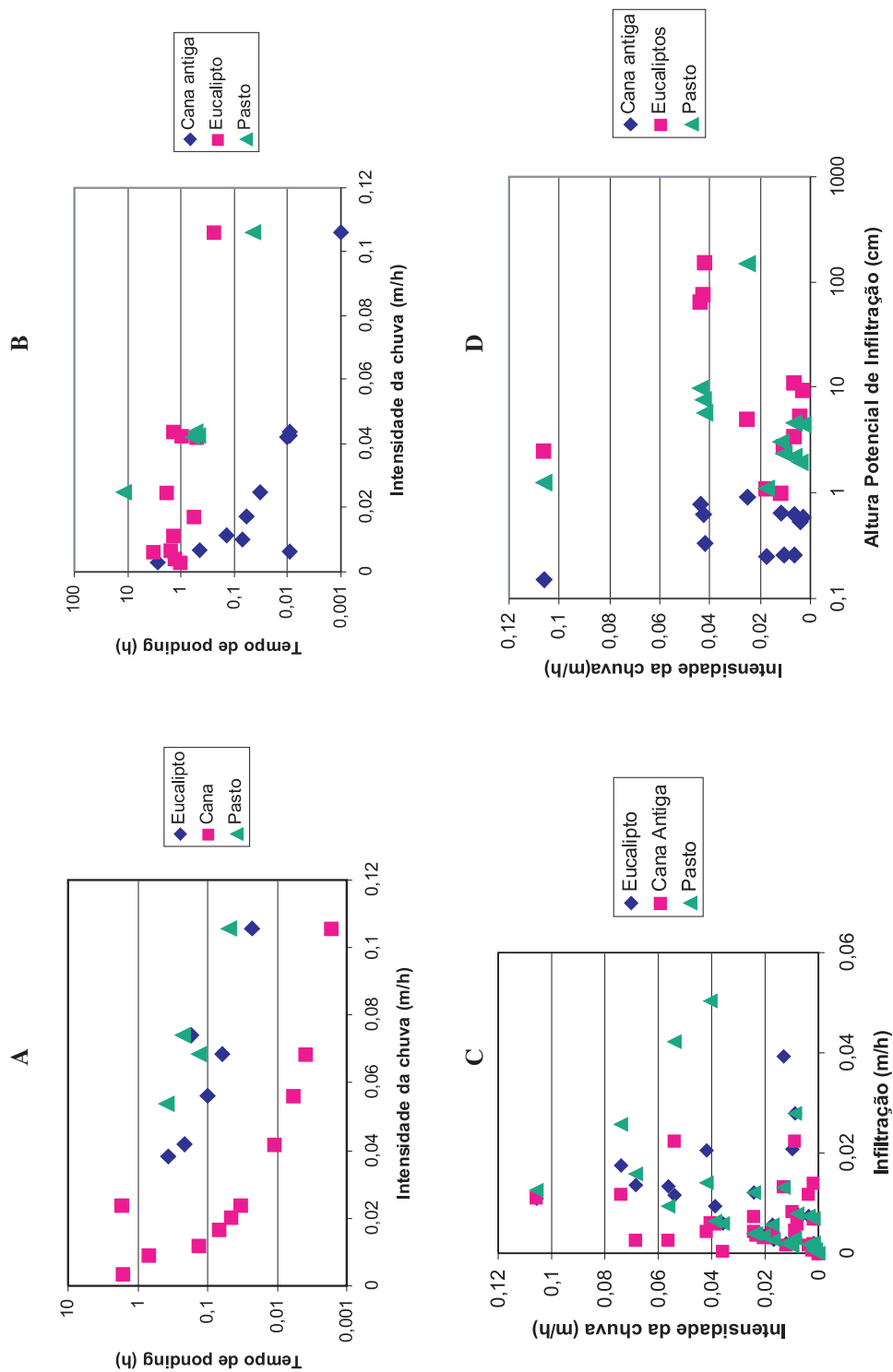


Fig. 8 – Tempo de ponding para as diferentes intensidades de chuvas, (A) Modelo de Chu (1978) e (B) Modelo de Morel – Seytoux e Khanji (1976); Infiltração (C) obtida para o modelo de Chu (1978) e Altura potencial de chuva infiltrada (D) até o tp para o modelo de Morel – Seytoux e Khanji (1976).

Tabela 3 – Variação do tempo de ponding (horas) em função da variação da umidade inicial (modelo de *Morel – Seytoux* e *Khanji*, 1976).

Umidade m ³ /m ³	Pasto		Cana		Eucalipto	
	tp (h)	W (cm)	tp (h)	W (cm)	tp (h)	W (cm)
0,05	0,082	1,836	0,002	0,215	0,099	2,108
0,10	0,073	1,706	0,002	0,2	0,088	1,953
0,15	0,063	1,57	0,002	0,185	0,076	1,792
0,20	0,054	1,427	0,001	0,168	0,065	1,624
0,25	0,044	1,276	0,001	0,152	0,053	1,447
0,30	0,035	1,114	0,001	0,147	0,042	1,259
0,35	0,025	0,937	0,001	0,132	0,03	1,055
0,40	0,015	0,734	0,0001	0,109	0,018	0,824

tp – tempo de *ponding* (h), W – altura potencial de água infiltrada (cm).

Tabela 4 – Variação do Tempo de ponding (tp) em função da variação da umidade inicial (modelo de *Morel – Seytoux* e *Khanji*, 1976).

Umidade m ³ /m ³	Cenário 6	Cenário 8	Cenário 10
0,05	0,053	2,072	4,406
0,10	0,046	1,819	3,868
0,15	0,04	1,566	3,331
0,20	0,033	1,257	2,794
0,25	0,027	1,061	2,257
0,30	0,021	0,808	1,719
0,35	0,014	0,556	1,182
0,40	0,008	0,303	0,645

5 – CONCLUSÕES

O ensaio de perfil instantâneo proposto por Libardi (1980) gera resultados mais completos que o de duplo cilindro. Porém, devido às características do material inconsolidado arenoso, observou-se que os resultados obtidos para tempos muito longos (>21 horas) não refletem a redistribuição de água no perfil, que ocorre nos períodos iniciais. Dessa forma, é mais adequado concentrar as amostragens nas primeiras 5 horas, após a finalização do ensaio.

Os resultados obtidos pela aplicação dos modelos de *Morel-Seytoux* e *Khanji* (1976) e de *Chu* (1978) mostram variação quanto ao tempo de *ponding* que pode ser atribuída à forma em que cada modelo considera a umidade inicial e os valores de intensidade de chuva.

Os maiores valores de escoamento superficial foram encontrados em cenários transientes (cenários 6 e 12) em função do valor de umidade volumétrica inicial maior, e conseqüentemente, taxas de infiltração menores.

A bacia apresenta um aspecto muito particular quando a preparação do solo para os plantios (cana-de-açúcar e outros) coincide com o período de chuvas, visto que a capacidade de infiltração supera as diferentes intensidades pluviométricas, havendo, conseqüentemente, uma infiltração total em relação aos eventos.

O tipo de uso e ocupação afeta profundamente a dinâmica das águas na bacia, em decorrência do manejo. As porções da bacia com cana-de-açúcar sofrem com o uso intenso de máquinas agrícolas e fertilizantes (defloculantes) que provocam a compactação da camada superficial. Isto significa que, durante o ciclo da cana-de-açúcar (6 anos), há uma mudança na relação infiltração/escoamento superficial. Assim, a recarga ocorre basicamente nos 2 primeiros anos do ciclo da cana-de-açúcar, enquanto no restante praticamente toda a água flui como escoamento superficial.

Para a condição de cana-de-açúcar antiga (3 ou mais cortes), a maior parte dos cenários (11) são caracterizados por apresentarem tempo de *ponding* menores que a duração das chuvas e, portanto, escoamento superficial. Como cerca de 30% da bacia (encosta do lado direito) está ocupada com este cultivo, os canais de drenagem sofrem aumento da vazão com tempo de pico muito pequeno.

A característica do modelo utilizado é mais concreta quando se analisa o tempo de *ponding*, com o uso com eucalipto que, segundo o modelo de Morel-Seytoux e Khanji (1976), ocorre somente para o cenário 5, enquanto para Chu (1978) há para os cenários 5, 6, 7, 9, 11 e 12. A modificação proposta por Chu (1978) reflete melhor a relação entre as chuvas e os materiais geológicos.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq/FINEP, Processos N° 62.0031/01-8, 476592/2001 - 1 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Processo No 00/03027-7, 96/1502-2) imprescindíveis à realização deste trabalho, assim como a contribuição dos membros da Comissão Editorial pelas sugestões que aprimoraram o trabalho.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulaziz, S; Turbak, A.L. (1996). Geomorphoclimatic peak discharge model with a physically based infiltration component. *Journal of Hydrology*, 176: 1-12.
- Abu-Taleb, M.F. (1999). The use of infiltration field tests for groundwater artificial recharge. *Environmental Geology*, 37(1-2):64-71.
- Ando, Y.; Musiak, K.; Takahashi, Y. (1983). Modelling of hydrologic processes in a small natural hillslope basin, based on the synthesis of partial hydrological relationships. *Journal of Hydrology*, 64: 311 – 337.
- Anon (1990). Tropical residual soil. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23(1): 4-93. London.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12004 (1984a). Determinação do índice dos vazios de solo não coesivos. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6508 (1984b). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 (1984c). Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Bouwer, H. (1969). Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. *Water Resources Research*, 2: 729-738.
- Casenave, A; Valentin, C. (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130: 231 – 249.
- Chandler, R. J.; Crilly, M. S; Montgomery-Smith, G. (1992). A low cost method of assessing clay desiccation for low buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 92(2): 82-89.
- Chu, S. T. (1978). Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research*. 14 (3): 461-466.
- Colenbrander, H. J. (1965). The research watershed “Leerinkbek”, Netherlands. I.A.S.H. Symp. On representative and experimental areas, Budapest. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, 66 – 2, 558-563.
- Cosh, M. H.; Stedinger J. R. and Brutsaert, W. (2004). Variability of surface soil moisture at the watershed scale, *Water Resour. Res.*, 40, W12513, doi:10.1029/2004WR003487.
- Culligan, K. A., D.; Wildenschild, B. S. B.; Christensen, W. G.; Gray, M. L. Rivers, and A. Tompson, F. B. (2004). Interfacial area measurements for unsaturated flow through a porous medium, *Water Resour. Res.*, 40, W12413, doi:10.1029/2004WR003278.
- Dunne, T.; Black, R. D. (1970). An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources*, 6 (2): 179 -191.
- Dykes, A. P.; Thornes, J. B. (2000). Hillslope hydrology in tropical rainforest steep lands in Brunei. *Hydrological Processes*, 14: 215 – 235.
- Esteves, M.; Faucher, X; Galle, S; Vauclin, M. (2000). Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed values. *Journal of Hydrology*. 228: 265 – 282.
- Flerchinger, D. L.; Reeder, J. W.; Franzini, J.B; Remson (1980). Application of the Green – Ampt Model to infiltration under time – Dependent surface water depths. *Water Resources Research*, 16: 517 – 528.
- Gau, H. S. Liu, C. W. (2000). Estimation of the effective precipitation recharge coefficient in an unconfined aquifer using stochastic analysis. *Hydrological Processes*, 14 (4): 811-830.
- Gaze, S.R.; Simmonds, L.P.; Brouwder, J.; Bouma, J. (1997). Measurement of surface redistribution of rainfall and modelling its effects on water balance calculations for a millet field on sandy soil in Niger. *Journal of Hydrology*. 188 – 189: 267 – 284.
- Gburek, W. J.; Folmar, G. J. (1999). A groundwater recharge field study: site characterization and initial results. *Hydrological Processes*, 13(17): 2813-2831.
- Ghayoumian, J.; Ghermezcheshme, B.; Feiznia, S.; Norrozi, A. A. (2005). Integrating GIS and DSS for identification of suitable areas for artificial recharge, case study Meimeh Basin, Isfahan, Iran. *Environmental Geology*, 47:493-500.
- Giambelluca, T.W., Ridgley, M. A. and Nullet, M.A. (1996). Water balance, climate change and land-use planning in the pearl Harbor basin, Hawai’i. *Water Resources Development*, 12 (4): 515-530.

- Green, W. H.; Ampt, C.A (1911). Studies on soils physics I.: The flow of air and water through soils. *Journal Agr. Science*, IV (Part I): 1 – 24.
- Lange, J. ;Greenbaum, N.; Husary, S.; Ghanem, M.; Leibundgut, C. and Schick, A. P. (2003). Runoff generation from successive simulated rainfalls on a rocky, semi-arid, Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 17(2): 279-296.
- Libardi, P. L. (1980). Dinâmica da água no solo. Departamento de Ciências Exatas. ESALQ / USP. Piracicaba. 509p.
- Lischeid, G.; Kolb, A.; Alewell, C. (2002). Apparent translatory flow in ground water recharge and runoff generation. *Journal of Hydrology*, 265, 195-211.
- Lubczynski, M. W.; Gurwin, J. (2005). Integrating of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes – Sardon study case, Spain. *Journal of Hydrology*. Doi: 101016/j.jhydrol.2004.08.038.
- Marinho, F. A. M. (1994). Medição de sucção com o método do papel de filtro. *Anais do X Cobramsef*. V. 2: 515 – 522.
- Morel – Seytoux, H. J.; Khanji, J. (1976). Derivation of an equation of infiltration. *Water Resources Research*, 10 (4): 795 – 800.
- Morel- Seytoux, H. J. (1976). Derivation of equations for rainfall infiltration. *Journal Hydrology*, 31: 203-219.
- Philip, J. R. (1993) Variable-head ponded infiltration under constant or variable rainfall. *Water Resources Research*, 29 (7): 2155-2165.
- Salvucci, R. E; Entekhabi, D. (1994). Explicit expressions for Green-Ampt (Delta Function Diffusivity). Infiltration rate and cumulative storage. *Water Resources Research*, 30 (9): 2661 – 2663.
- Sharma, M. L; Gander, G. A; Hunt, C. G. (1980). Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology*. 45: 101 – 122.
- Smith, R.E; Parlange, J.Y. (1978). Parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, 14 (3): 533-538.
- Sullivan, M; Warwick, J.J.; Tyler, S.W. (1996). Quantifying and delineating spatial variations of surface infiltrating in a small watershed. *Journal of hydrology*. 181: 149 -168.
- Swartzendruber, D. (1974). Infiltration of constant – flux rainfall into soils as analyzed by the approach of Green and Ampt. *Soil Science*, 117: 272 – 281.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Journal of Soil Science Society of America*, 44: 892-898.