

Modelação física da infiltração de água no solo durante eventos chuvosos

José Anderson do Nascimento Batista¹; Danilo Bossarino²; Fernanda Taukeuti Pinto³;

Rogério Sampaio Gomes⁴

RESUMO – Parte da vulnerabilidade ambiental urbana é devida ao colapso dos sistemas de drenagem pluvial. O crescimento da população induz o desenvolvimento dos terrenos e, como consequência, os picos de vazão. Este trabalho tem o objetivo de reproduzir medidas de infiltração e geração de escoamento superficial direto de duas bacias hidrográficas (uma urbanizada, outra com floresta) da região metropolitana de Campinas em um modelo físico de laboratório. A bacia do ribeirão Pinheirinhos (urbanizada) e a do córrego do Bom Jardim (com floresta) serão instrumentadas com lisímetro, linígrafo e uma estação meteorológica. Um lisímetro será construído e monitorado também em laboratório com flexibilidade de configuração para reproduzir condições de declividade e rugosidade do terreno. O modelo de laboratório funcionará com um extravasor no topo do permitindo simular chuvas de intensidade elevada e a separação da chuva na superfície. Essa técnica e o conhecimento gerado neste trabalho contribuirão com a viabilização 1) da aplicação das ciências dos solos em análises hidrológicas e 2) de ensaios de infiltração de águas de chuva em perfis de solos.

ABSTRACT –Urban areas are vulnerable to environmental risks partially due to the collapses in drainage systems. The population growth increases land development and, as a consequence, peakflows. This work has the objective of to reproduce soil infiltration and overland flow generation measures taken from two river basins (one urbanized, other forested), in the metropolitan region of Campinas, in laboratory. Both, Pinheirinhos creek basin (urbanized) and the Bom Jardim stream basin (forested) are to be monitored with a lysimeter, which is to separate overland flow, level-meters and a weather station. A standpipe lysimeter, which is a prototype soil column, is still to be constructed in laboratory designed to allow configuration adjustments to reproduce slope and roughness of terrain. The standpipe lysimeter has a spillway faced on top to allow simulate high intensity rainfalls on top and their decomposition in volumes into the soil and flowed overland. It is expected after this technique throughout this work to contribute to 1) application of soil sciences in hydrological analysis and 2) testing stormwater infiltration profiles in laboratory.

Palavras-chave: infiltração de água no solo; geração de escoamento direto; modelação física

¹ Professor Doutor, Departamento de Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Av. Albert Einstein, 951, CEP13083-820, Cx Postal 6021, Campinas-SP, Email: nbatista@fec.unicamp.br

² Bolsista CAPES para mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Av. Albert Einstein, 951, CEP13083-820, Cx Postal 6021, Campinas-SP, Email: danilobossarino@yahoo.com.br

³ Engenheira do Departamento de Projetos e Licenciamento Ambiental da Sabesp; Mestranda em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp; Email: ftaukeuti@sabesp.com.br

⁴ Mestrando em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp; cvrogerio@terra.com.br

1 INTRODUÇÃO

A segurança das populações contra desastres naturais é feita de acordo com a eficiência da infra-estrutura hidrológica da bacia hidrográfica, dos sistemas de alerta e das alternativas de recuperação de danos. Entre as causas dos muitos desastres ocasionados por chuvas estão presentes a perda de eficiência da infra-estrutura de drenagem com o crescimento da população e a discrepâncias entre resultados previstos e observados pelos sistemas de alerta sobre eventos extremos. Com o crescimento da população e das atividades agrícolas, crescem as regiões de baixa permeabilidade, a velocidade e volume das águas sobre os terrenos, além de tornar as bacias mais sensíveis às precipitações de menores durações, mais intensas. Isso torna menor o intervalo de recorrência da infra-estrutura e mais freqüentes as probabilidades de falhas. Do ponto de vista econômico o crescimento da população e das atividades produtivas aumenta o valor dos patrimônios públicos e privados. Com as modificações das paisagens, ocorre o aumento da freqüência dos eventos danosos que combinado ao aumento da quantidade de bens vulneráveis fazem os riscos envolvidos em cada evento crescerem a uma razão geométrica. Diversas frentes podem ser utilizadas para combater as possibilidades de danos buscando o controle dos eventos e a segurança dos patrimônios sócio-econômicos e ambientais. Essas frentes são estabelecidas em um ciclo formado por prevenção, mitigação e recuperação dos danos. O projeto e construção de infra-estruturas eficientes e um sistema de alerta com avaliações de riscos precisas são, portanto, tarefa para engenheiros entre outros profissionais que atuam na fase de prevenção. Porém a precisão esperada das avaliações e projetos só é efetiva se controlados os fatores de incertezas. As incertezas presentes nas avaliações dos riscos de inundações estão carregadas tanto de fatores naturais quanto de fatores da própria avaliação, que são os fatores epistêmicos. Merz e Thielen (2005) realizaram um estudo para analisar as discrepâncias entre a freqüência de eventos de cheia observados e freqüências estimadas para distinguir magnitudes de incertezas naturais de incertezas epistêmicas. O estudo não identificou exatamente o teor de incertezas epistêmicas das avaliações, mas identificou reduções desses teores de acordo com a retirada de hipóteses como estacionariedade da série de dados. Binley et al. (1991) já haviam apontado a grande quantidade de parâmetros dos modelos distribuídos a ajustar e a perda de representatividade dos dados coletados para a bacia como fontes de grandes incertezas. De fato, as teorias e modelos disponíveis em hidrologia possuem fortes compromissos com escalas de intervalos de tempo e de comprimentos, incluindo-se extensão e profundidade, as quais determinam a presença e a ausência de processos. Ainda segundo Binley et al. (1991) uma calibração de modelo produzirá resultados com menor grau de incerteza somente se

houver correspondência com condições físicas conhecidas na bacia e se cada mudança de condições for acompanhada de um novo conjunto de dados e uma nova calibração.

Os processos e condições físicas dos solos das vertentes das bacias hidrográficas são determinantes para a evolução das enchentes nos cursos de água. Os eventos de precipitações atmosféricas transferem para a superfície terrestre grandes quantidades de energia. As transformações dessa energia na superfície dos terrenos ocorrem na forma de infiltração de água no solo ou da passagem de água sobre as superfícies de acordo com as propriedades e fenômenos dos solos na zona não-saturada (zona vadosa). A gênese do escoamento superficial tem sido abordada por estudos realizados no século XIX, como os de Buckingham nos EUA e os de Green-Ampt na Austrália, e pelos estudos mais recentes do Engenheiro norte-americano Robert Horton. As teorias desses estudos têm em comum o fato de serem baseadas na curva de retenção dos solos, que é resultado de ser assumido que conteúdo de água e energia potencial possuem uma relação biunívoca. As teorias de infiltração de água no solo ainda têm tido pouca participação nos métodos de previsão de vazões. Segundo Vereecken et al. (2008), os métodos de estimativas e as metodologias de monitoramento da água no solo não estão produzindo previsões de vazões mais confiáveis que as os modelos calibrados por vazões apenas. A determinação do escoamento direto, assim como, recarga e evapotranspiração de plantas dependem de informações a respeito do conteúdo de água no solo. A quantificação desses fluxos requer de um lado uma caracterização espacial e temporal de dados de umidade do solo e de outro lado um modelo hidrológico capaz de relacioná-los aos volumes escoados. Grande parte dos estudos de fluxo de umidade do solo até agora lidou apenas com latossolo ou solos ainda mais profundos. Ainda são poucos os estudos que comprovam a eficiência da aplicação de medidas de umidade junto à superfície, seja por sensoriamento remoto seja por medidas pontuais, como alguma vantagem para as previsões de vazões ou inundações por modelos de hidrologia de superfície. Por isso a contribuição das medidas de conteúdo de umidade no solo nas previsões de vazões ainda é tema de debates. Além disso, esses resultados têm sido contestados. Um estudo explica com dados de umidade estimados por microondas em 320 bacias que a falta de vantagem de incluir esses dados nos modelos é que as previsões de vazões com dados apenas de precipitação e vazão já eram suficientemente satisfatórios. A ausência de ganhos com dados pontuais é percebida com frequência com erros de balanço hídrico entre 20 e 50% ou superiores (Vereecken et al., 2008).

Porém, se por um lado informações sobre a água no solo pouco tem esclarecido sobre enchentes, por outro, cresce o emprego de técnicas de gerenciamento de águas pluviais baseadas em infiltração. Obras para infiltração de águas de chuva exercem a função de reter o volume precipitado em alguma medida, transferi-lo para o subsolo e eliminar contaminantes das águas

pluviais. Essas obras têm como principal objetivo reproduzir das componentes hidrológicas naturais do terreno, como modelo mais eficiente de gerenciamento de águas de chuva. Os resultados de avaliação da eficiência de retenção de volumes e de remoção de contaminantes em técnicas de infiltração são animadores embora ainda pouco se saiba sobre como exatamente se processam.

O objetivo deste estudo é representar processos naturais de infiltração e deflúvio de chuvas para obter modelos baseados em dados de solos viáveis para o mecanismo de formação de enchentes e para ensaiar técnicas de infiltração de águas de chuva. A simulação de condições de infiltração e de deflúvio de bacias em laboratório e em modelos matemáticos será abordada inicialmente com a perspectiva de identificar causas físicas para discrepâncias de medidas de volumes infiltrados de uma chuva e resultados de modelos. O prosseguimento dessas pesquisas tem a perspectiva de encontrar relações diretas e indiretas dos parâmetros de solo e produzir ensaios confiáveis de perfis de infiltração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em um curso de água, a vazão de água é proveniente fundamentalmente do escoamento direto e da descarga de fundo, ou descarga de base. O *escoamento direto* é caracterizado pelas respostas rápidas em relação à precipitação e a sua curta duração. A descarga de fundo é constituída de águas subterrâneas rasas e profundas, as quais apresentam variados tempos de percurso no interior dos solos e rochas. O volume de escoamento direto distribuído pela área da bacia é chamado de precipitação efetiva. A *precipitação efetiva* representa, portanto, a parcela de precipitação que não é interceptada e nem infiltrada na bacia. Diversos métodos hidrológicos existem para determinar a precipitação efetiva, porém nenhuma formulação generalizada. As hipóteses fundamentais da lei de Buckingham deram um importante passo até explicar a curva de retenção dos solos. A equação de Richards, em continuação permitiu descrever alguns fenômenos de instabilidade na percolação de água no solo. Entretanto, as previsões hidrológicas de geração de escoamento direto desconhecem os caminhos da água no solo. A equação de Richards é utilizada com razoável sucesso na descrição de escoamento direto (Vereecken et al, 2008). Segundo Vereecken et al. (2008) esses bons resultados são encontrados utilizando-se tanto de medidas de umidade do solo e energia potencial. Entretanto, Vereecken et al. (2008) também advertem que a despeito das aplicações bem sucedidas, a equação de Richards ainda precisa de consolidação por causa da fraca possibilidade de obter medidas médias de potencial e de condições de contorno em solos. As variações de condições de contorno e os valores das grandezas físicas (potencial e conteúdo de água) no interior do solo possuem variações ainda sem relações bem definidas. Segundo Nielsen (1997), os desafios estão

postos sobre as variáveis que governam a histerese da curva de retenção, que leis governam a relação entre potencial e temperatura e a variação da temperatura no solo.

2.1 Monitoramento de campo

A avaliação de cenários de riscos de inundações e enchentes em uma bacia requer o conhecimento do funcionamento natural do sistema hídrico com levantamento de dados de forma direta ou indireta. Resultados de estudos recentes demonstram que a correlação entre modificações de paisagens e aumento do pico de vazões tende a enfraquecer tanto com o intervalo de recorrência quanto com a extensão da bacia hidrográfica. De outra forma, as alterações de picos de vazão são mais percebidas nas chuvas mais comuns e nas pequenas bacias. Beschta et al. (2000) avaliaram os efeitos da abertura de clareiras em áreas nativas utilizando-se séries de período longo para picos de enchentes em três bacias pequenas (60 a 101ha) e seis bacias médias (62 a 640km²) no município de Oregon, nos EUA. Duas das pequenas bacias sofreram modificações de paisagem enquanto a terceira permaneceu sem alterações, servindo de controle para a situação das outras duas. Em média os picos cresceram aproximadamente entre 13 e 16% depois das alterações sofridas a um tempo de retorno de 2 anos e de 6 a 9% para eventos com tempo de retorno de 6 anos. Nas outras seis bacias médias, a regressão múltipla em relação a 1) magnitude do pico e 2) diferença percentual da área devastada trouxe resultados com baixo índice de significância. As explicações para esses resultados estão na resposta da água nos solos.

Para Bonell (1993), descrever a formação de descargas em canais naturais é uma tarefa que precisa superar os desafios de levar em conta os mecanismos de solo encontrados nas vertentes. Para Bazemore et al. (1994) a água no solo constitui em uma incógnita chave na determinação de problemas ambientais em escala de bacias hidrográficas. Os autores fizeram avaliações dessa variável por métodos de traçadores, que faziam a sua abordagem em um lisímetro do tipo tensão zero e métodos hidrométricos em uma pequena bacia com floresta na Virgínia, EUA. Dois hidrogramas de cheia foram analisados com base no balanço de massa dos traçadores para chegar no que seriam três componentes do volume descarregado. Observou-se que em uma grande enchente na bacia a água do solo antecedente contribuiu com 36% do volume da enchente e muito contribuiu para a magnitude do pico, com 65% da vazão. Em chuvas menores a contribuição passaria a ser menor. Esses dois estudos foram os responsáveis pela grande confiabilidade adquirida pelos métodos de análise hidrológica baseados em traçadores.

Latron e Gallart (2008) analisam o escoamento superficial direto em uma bacia pequena do Mediterrâneo por intermédio do registro contínuo de dados de nível saturado do solo e potencial mátrico da região não-saturada (o potencial devido às forças químicas entre a matriz e os poros do

solo) e vazão do exutório superficial durante chuvas por seis anos. Em nível de escala diária, foram observadas fortes características de não-linearidades entre precipitações e vazões do exutório e nos efeitos das precipitações sobre as variações de nível saturado. As medidas de potencial mátrico mostraram o aparecimento relativamente freqüente de saturação com água aprisionada ainda na zona não-saturada no perfil de monitoramento (valores nulos e valores positivos), exercendo a contribuição favorável à produção de água na superfície (escoamento direto). Mas as medidas de potencial mátrico também mostraram valores favoráveis à retenção de água (valores negativos). A Figura 1 ilustra essa variação.

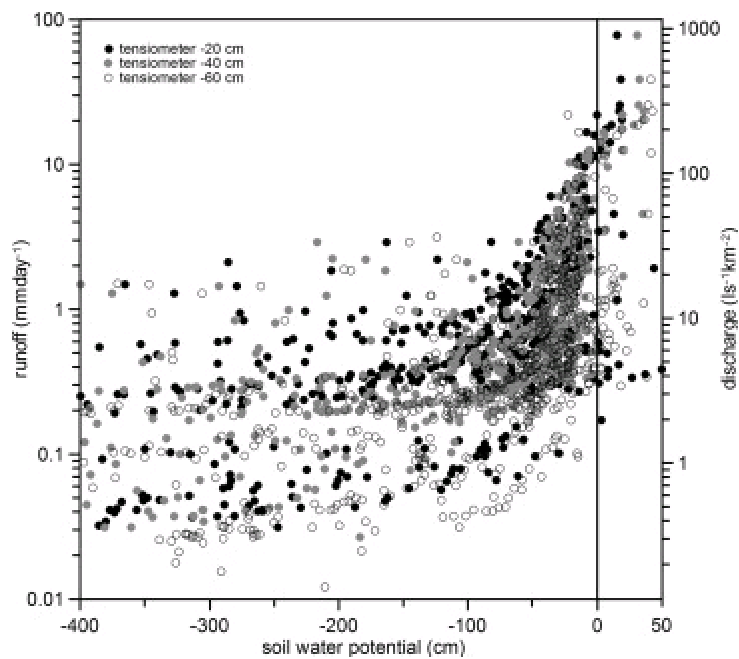


Figura 1: Medidas de volume de escoamento direto em relação ao potencial mátrico do estudo de Latron e Gallart (2008); os dois eixos verticais convertem medidas entre dois diferentes sistemas de unidades.

Segundo Latron e Gallart (2008), o estudo revelou três tipos de comportamento durante o ano. Os hidrogramas dos eventos do tipo I (condições secas) eram provocados pela superação da capacidade de infiltração apenas em áreas de baixa condutividade. Hidrogramas do tipo II (condições de transição de umidade) e do tipo III (condições úmidas) eram resultados da superação do volume saturado no topo do solo, com a diferença de que durante condições de transição, o terreno demonstra saturação aprisionada em partes esparsas, enquanto em condições úmidas, essas partes saturadas se ligam ao nível saturado do solo, acumulando-se e elevando a carga hidráulica.

Medidas de conteúdo de água no solo podem ser realizadas por meio de diversos métodos. Métodos baseados na curva de retenção são os mais frequentes. Porém a curva de retenção de água no solo, que relaciona o conteúdo de água e o potencial mátrico do solo, apresenta uma relação histerética, em que curvas de retenção são obtidas distintas em diferentes condições físicas. Sendo assim, os resultados de Latron e Gallart (2008) que são baseados em métodos tensiométricos, podem apresentar incertezas histeréticas.

2.2 Modelagem física em lisímetros

Lisímetros são mais comumente utilizados para determinar volumes de água perdidos por evapotranspiração de massas vegetais e volumes de água que ultrapassam zonas de raízes. Porém, experimentos da relação entre taxa de aplicação de água no solo, potencial mátrico e conteúdo de água no solo estão baseados em tamanhos diferentes de colunas de solo. Nichol et al. (2008) construíram uma coluna de solo em escala piloto para estudar em laboratório. Como vantagens, os autores mencionam os baixos custos e a alternativa viável de substituir experimentos de lisímetros *in situ* e instalações de tensiômetros em campo. A coluna de solo funciona como um lisímetro *ex situ* e foi construída em laboratório com 56cm de diâmetro e 3,6m de altura. As dimensões da coluna são importantes. Testes preliminares dos autores resultaram em medidas que subestimaram o potencial mátrico entre menos de 4 a 12%. Com o uso de modelos computacionais as dimensões da coluna foram reavaliadas para que com as atuais dimensões fossem obtidas medidas com erro menor que 2,5%. Um programa de laboratório foi criado para representar as condições físicas de uma determinada área de estudo. O material utilizado possui a curva granulometria típica da área. Usando um simulador de precipitação à base de uma bomba peristáltica era aplicada uma taxa constante de volume de água no topo da coluna para se observar a distribuição de umidade e potencial mátrico no equilíbrio. As estimativas da condutividade hidráulica não saturada foram determinadas com regime estacionário utilizando curvas de retenção levantadas *in situ*.

O lisímetro utilizado por Nichol et al. (2008), porém, não permitia a simulação de aplicações de água no solo com taxas realísticas, taxas observadas durante eventos de chuva. Por isso, o presente estudo utilizará um lisímetro dotado de um vertedor hidráulico no topo para avaliar a geração de escoamento direto, bem como avaliar a indução de infiltração pela própria lâmina excedida (lâmina de escoamento direto).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O estudo de campo e a coleta de material para o modelo físico serão realizados em duas bacias hidrográficas que estão localizadas a 20km de Campinas. A bacia do Córrego Pinheirinhos⁵ e a bacia do Córrego Bom Jardim⁶ possuem, respectivamente, áreas de, aproximadamente, 18,1km² e 22,5km² constituídas por partes de territórios dos municípios de Vinhedo, Valinhos e uma pequena parte de Itatiba nas cabeceiras. A bacia do Córrego Bom Jardim está em maior parte no município de Valinhos e é predominantemente ocupada por áreas de vegetação nativa (7,0 km²). O restante da área é ocupada por pastos e áreas de solo exposto isoladas (0,3km²). A bacia do Córrego Pinheirinhos apresenta, aproximadamente, 50% de sua área ocupada por usos urbanos que pertencem na sua totalidade ao município de Vinhedo (Figura 2). Segundo o levantamento censitário do ano de 2007 aponta para uma população de 57 mil habitantes (50 mil em áreas urbanas). Essa diferença representa uma taxa geométrica de crescimento anual de 6,6 %.O restante da bacia é ocupada por 70% áreas de pastagens, 20% de vegetação nativa e, aproximadamente, 0,4km² de áreas destacadas com solo exposto.

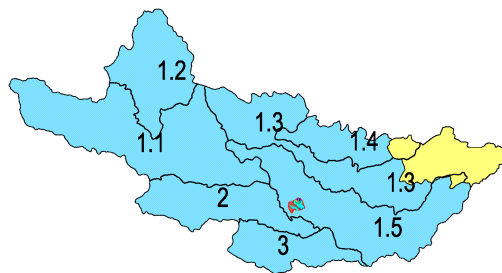
Os locais previstos para a instalação das estações fluviométricas e da estação hidrometeorológica pertencem a empresas de saneamento (Sanebavi e DAEV) e à prefeitura de Vinhedo (Parque Municipal João Gasparini), respectivamente. A instalação dessas estações dependerá, portanto, da aprovação de termos específicos aos convênios que, porventura, possam existir entre essas instituições e a Unicamp, como proponente do estudo.

⁵ Cartas 1:50.000 do IBGE denominam o trecho do Córrego Pinheirinhos na área de estudo como Córrego Cachoeira

⁶ Cartas 1:50.000 do IBGE denominam o Córrego Bom Jardim como Ribeirão do Jardim

SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

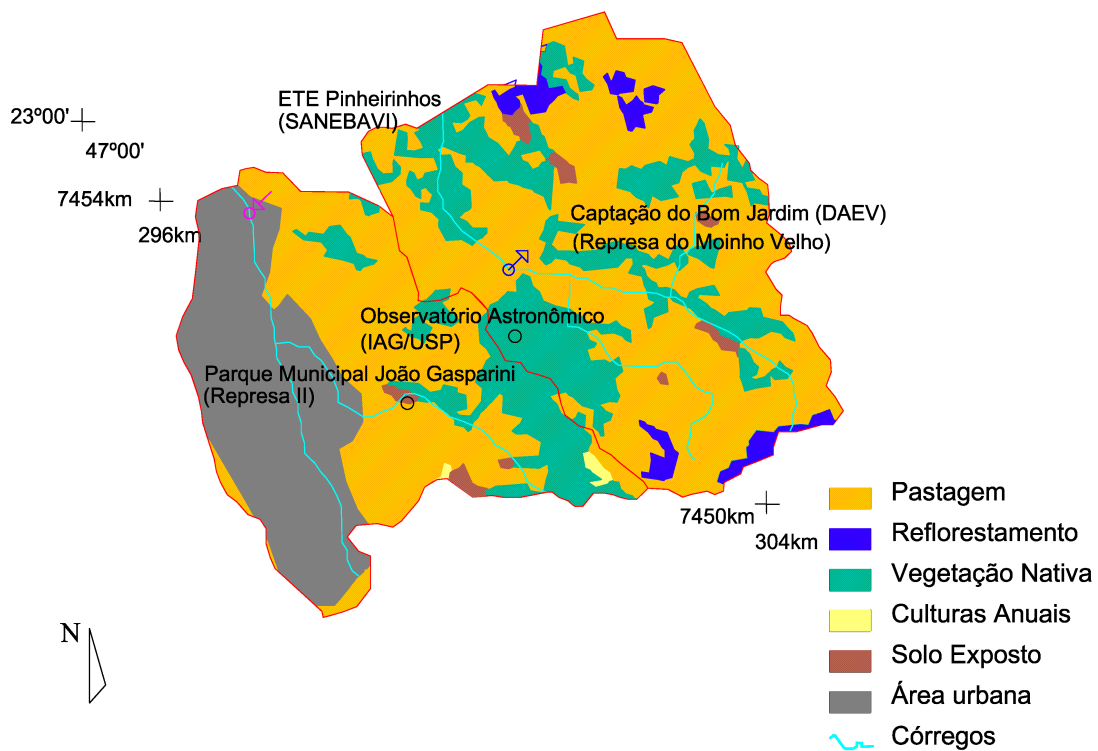
LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ



■ SÃO PAULO
■ MINAS GERAIS
■ ÁREA DE ESTUDO

1.1 - Rio Piracicaba
 1.2 - Rio Corumbataí
 1.3 - Rio Jaguari
 1.4 - Rio Camanducaia
 1.5 - Rio Atibaia
 2 - Rio Capivari
 3 - Rio Jundiá

(a)



(b)

Figura 2: Localização das bacias hidrográficas dos córregos Pinheirinhos e Bom Jardim

3.2 Balanço hídrico das bacias

Medidas meteorológicas e do solo estão planejadas para se realizarem na área urbana de Vinhedo, no Parque Municipal João Gasparini e na área do Observatório Astronômico Abrahão de Moraes em Valinhos (Figura 2). Lisímetros de pesagem são indicados para estudos de balanço hídrico do solo com a vantagem de permitir extrair medidas exatas do conteúdo de água no solo. A precisão das balanças utilizadas deve permitir acompanhar a mudança de conteúdo de água no solo, mas, por outro lado, também pode permitir que o instrumento sofra interferências indesejadas de rajadas de vento e efeitos da velocidade das gotas de chuva (Pereira, et al. 2002). Eventualmente, mudanças de pressão atmosférica também são captadas por balanças. Felizmente, a mensuração de cada um desses fatores em balanças é um problema bem conhecido na Engenharia, de modo que o isolamento desses efeitos das medidas de peso do lisímetro pode ser conseguido com medições meteorológicas.

Para medição de chuvas com um amplo espectro de abrangência em um lisímetro também é necessário o emprego de alguns acessórios especiais para capturar a água de escoamento direto. Rufos terão importante papel de impedir a presença de volume escoado de outras partes do terreno (Figura 3). O segundo acessório especial são as rebarbas do tanque que permitirão encaminhar o volume de escoamento direto gerado sobre o lisímetro para uma calha coletora (Figura 3). O volume conduzido pela calha é coletado em um ou mais recipientes até 60 litros. Ainda o volume drenado pelo fundo do lisímetro está planejado para ser coletado por uma calha inferior e ser conduzido até mais um recipiente, concebido para ser uma proveta. Considerando-se, que durante eventos de chuva, a evapotranspiração é nula, o volume retido no lisímetro é dado por (1):

$$P \times A - Q - R = \Delta U \times Vol \quad (1)$$

sendo A a área do topo do lisímetro e Vol o volume do lisímetro; P é a lâmina precipitada, Q é o volume vertido do topo do lisímetro, R é o volume drenado para a recarga direta e $\Delta U \times Vol$ a variação do volume de água no lisímetro. A curva de retenção também será explorada por tensiômetros dentro do lisímetro. Feitas as medidas de tensiômetros em diversas profundidades, obtém-se, mediante curva de retenção, o perfil de umidade cuja integral dá o volume retido no lisímetro. As medidas de peso de água no lisímetro, por outro lado, fornecerão avaliações pares que permitem avaliar discrepâncias na integração do perfil de umidade.

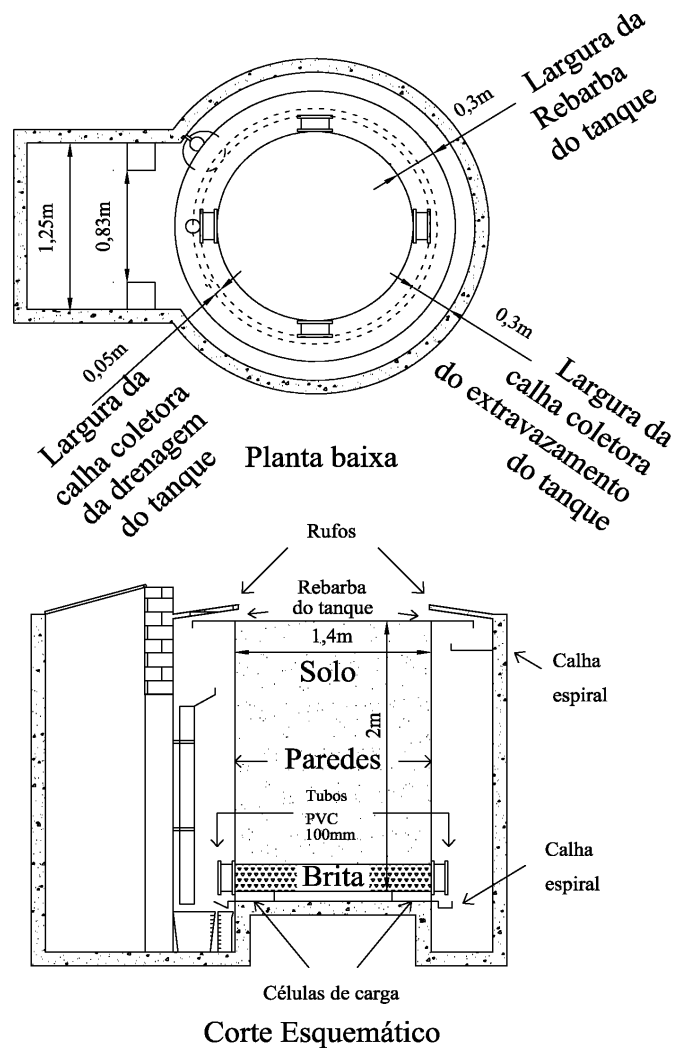


Figura 3: Planta baixa e corte esquemático do lisímetro de campo

A recuperação da capacidade de infiltração do solo, que é promovida pela perda de água no solo, é dada pelo volume de água perdido por evapotranspiração e por percolação. Considerando-se a evapotranspiração apenas dos intervalos sem chuvas, o volume evapotranspirado é fornecido pela diferença de volume armazenado no lisímetro e pelo volume drenado no intervalo, conforme (2).

$$ETR = \Delta U \times Vol - R \quad (2)$$

As medidas meteorológicas, que incluem medidas instantâneas de lâmina de precipitação, medidas radiométricas (radiação ultravioleta e duração do dia), medidas termométricas (temperatura e umidade relativa do ar) e medidas aerodinâmicas (intensidade do vento e pressão barométrica) permitirão o levantamento de hietogramas e de taxas de evaporação de água livre, que é a base para

a avaliação de taxas de evapotranspiração potencial e real de vegetações. As estimativas de evapotranspiração do lisímetro (2) formarão pares para comparações para avaliar discrepâncias de fórmulas empíricas de evapotranspiração potencial e real.

Os volumes de escoamento, de infiltração e de perdas do lisímetro permitirão, ainda, a análise de hidrogramas com estimativas de vazão de base e de vazão de escoamento direto das bacias do Córrego Pinheirinhos e do Ribeirão Bom Jardim. O acréscimo de vazão em um rio é produzido tanto pelo acréscimo de água infiltrada nos terrenos como pelo deflúvio direto da água sobre os terrenos. O intervalo de tempo necessário para a formação de uma enchente depende do prevaecimento de uma forma ou de outra de escoamento. De qualquer forma, é durante chuvas intensas que ocorrem os processos de formação de enchentes e a medição do volume de deflúvio direto se torna possível. Os métodos de medidas de vazões convencionais, que é velocimetria a molinetes hidrométricos, não são indicados para a medição de vazões de enchentes porque despendem tempo para posicionamento do instrumento a diferentes profundidades e diversas descidas de uma margem à outra. O tempo necessário para esse percurso pode implicar em se perceberem mudanças das condições de medida, por exemplo, a lâmina de água. Métodos baseados em efeito Doppler acústico permitem o levantamento rápido suficiente da seção para não sofrer as alterações hidráulicas da passagem de uma onda de cheia ou de manobras de comporta em reservatórios. Esses métodos incluem a aplicação de um aparelho portátil composto de um emissor e de receptores de ondas ultra-sônicas sobre a superfície da água. Lu *et. al* (2006), em seu estudo coletou dados de 5 estações hidrológicas dos rios Wu e Choshui na área central de Taiwan. Através de um sistema Doppler acústico portátil para coleta de dados de vazões em rios íngremes, mostrou que este sistema é bastante eficiente para obtenção de dados de vazões para casos onde há situações adversas, como escoamento rápido e íngreme. As limitações da sua aplicabilidade foram atribuídas a situações de altos teores de concentração de sedimentos em suspensão. O estudo mostrou que o sistema portátil de medição de vazões utilizando Doppler acústico teve sucesso em várias declividades de rios com fluxos rápidos e pequenas profundidades.

Normalmente o sistema é afixado em um mini-bote, que é movimentado por um cabo de uma margem à outra de cima de uma ponte ou de um teleférico. Na ausência de pontes ou teleféricos sobre aos pontos de coleta de dados e a pequena largura dos corpos de água será utilizado neste trabalho um aparato especial para guiar o aparelho de uma margem à outra. O aparato é composto por 4 módulos, conforme ilustrado na Figura 4 e na Figura 5, para ser portátil em um veículo do tipo caminhonete. A modulação do aparato, que é um mini-guindaste inspirado nos pequenos guindastes modelo girafa.

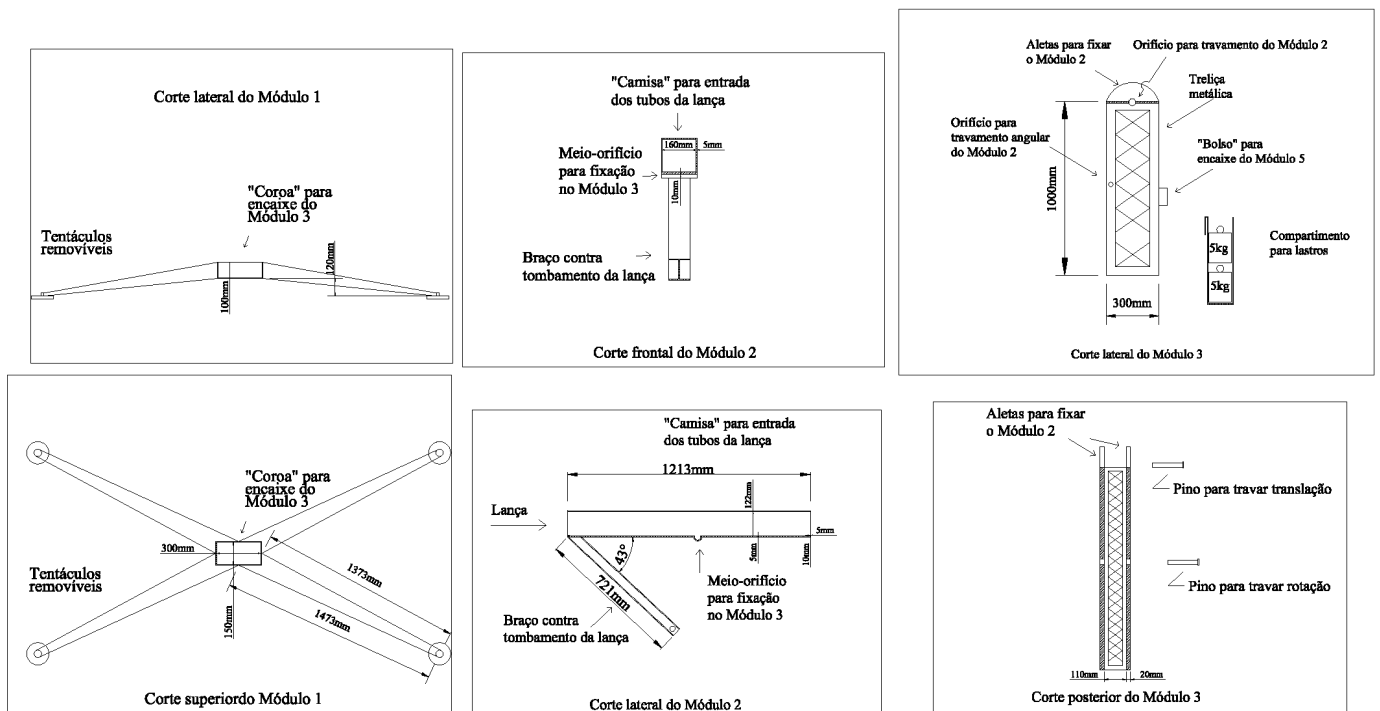


Figura 4: Esboço dos módulos 1,2 e 3 do mini-guindaste para manuseio do medidor de vazões.

Os módulos são: módulo 1, a base desmontável constituída de quatro tentáculos e um pescoço, módulo 2, uma base em forma de camisa para a fixação da lança na torre, módulo 3, a torre mais um recipiente para contrapesos e módulo 4, a lança retrátil inclusiva para permitir a introdução de novos trechos de lança (em número de 5 com comprimento de 2m cada) até atingir o comprimento total necessário.

Medidas tomadas da estação meteorológica e das estações linimétricas fornecerão, respectivamente, as estimativas das componentes de entrada e de saída de água das bacias. Com as estimativas de precipitação e de evapotranspiração são conhecidos os volumes de entrada e de saída atmosféricas. Com as estimativas de vazão nos rios é conhecido o volume de saída terrestre das bacias. A equação que expressa o balanço entre essas componentes é (3):

$$P \times A - E \times A - Q = \Delta S \quad (3)$$

sendo A a área da bacia, P a taxa de precipitação média na bacia, E a taxa de evapotranspiração real média na bacia e Q o volume escoado pelo rio e ΔS a variação de volume retido na bacia. A

variação de volume retido na bacia (ΔS) é composta por uma parcela do volume retido no solo e uma parcela de volume drenado até o nível saturado (recarga).

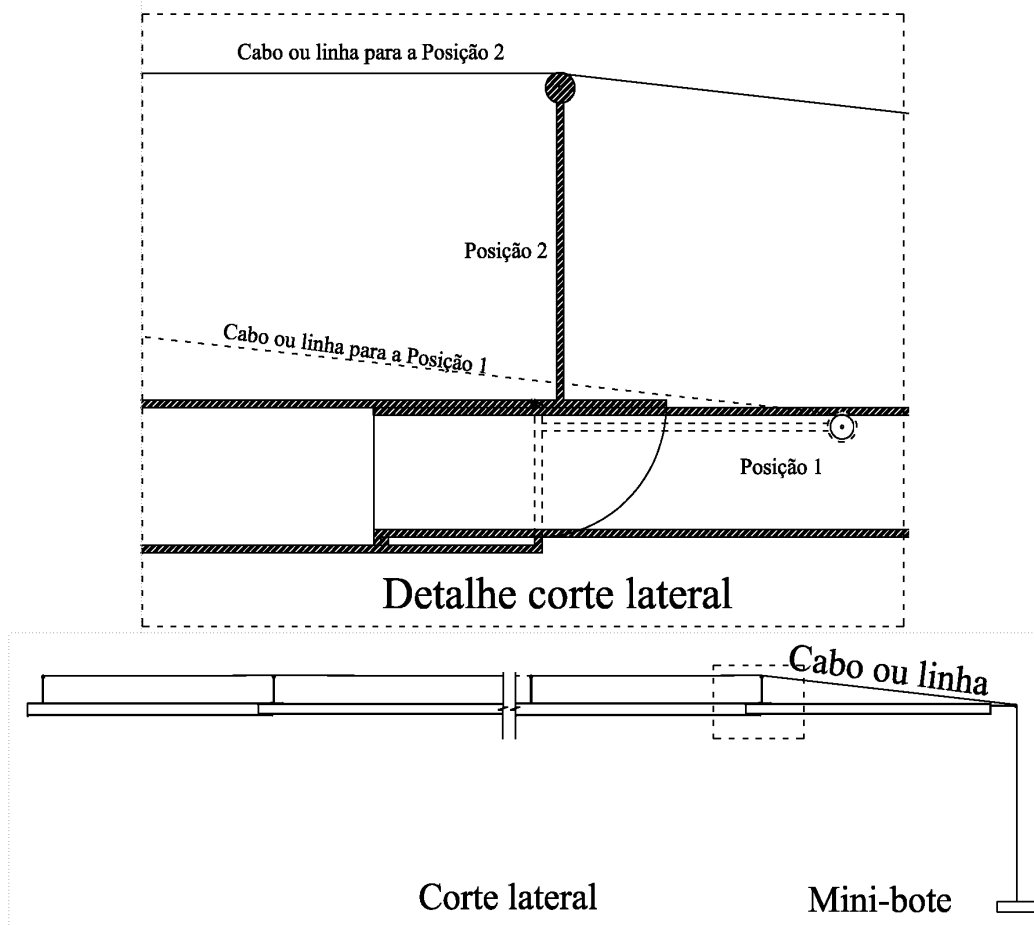


Figura 5: Corte lateral e detalhe do braço do mini-guindaste para manuseio do medidor de vazões

Por outro lado, uma parte do volume retido no solo entra em sulcos do terreno e deixa a bacia pelo rio e uma parte da recarga também deixa a bacia pelo rio. De acordo com Latron e Gallart (2008), as chuvas mais rápidas produzem enchentes apenas pelo escoamento direto (tipo i) e pelo escoamento subsuperficial raso (tipo ii). As elevações do nível saturado observadas por Latron e Gallart (2008) em sua pequena bacia de estudo somente contribuem para a enchente quando ocorrem chuvas prolongadas (tipo iii). Assim, o volume de uma enchente fica decomposto em três componentes: escoamento direto, água de solo raso e água subterrânea. Cada componente será observada nos hidrogramas de acordo com a duração e a intensidade das chuvas.

3.3 Modelagem Física em Laboratório

O presente estudo propõe a construção de um lisímetro *ex situ* para representar paralelamente o funcionamento do lisímetro *in situ* durante a chuva e o funcionamento da bacia hidrográfica do ribeirão Pinheirinhos e do córrego Bom Jardim. A chaminé de solo representará as condições de precipitação, infiltração e de deflúvio da área de estudo, que são as responsáveis pela geração do escoamento direto. Por isso, a chaminé de solo deverá prover um simulador de chuva no seu topo e uma abertura inferior para coleta do volume drenado, além de tensiômetros para permitir o monitoramento do perfil de umidade na coluna durante o ensaio baseado no modelo de Nichol et al. (2008). Diferentemente, porém, do estudo de infiltração estacionária de Nichol et al. (2008), a chaminé de solo deste estudo será provida de um vertedor no topo para extravasar o volume não-infiltrado (Figura 6).

O volume infiltrado em uma bacia é crescente em relação à intensidade de precipitação no local e à presença da lâmina de escoamento direto que atravessa o local (aquele proveniente do local de cota imediatamente mais alta para o local de cota imediatamente mais baixa). O topo da chaminé promoverá também mais infiltração quanto maiores forem, ambas, a taxa de aplicação de água e a acumulação de lâmina no topo. A presença de um vertedor no topo regula a liberação de água do topo da chaminé pelo mesmo princípio de resistência hidráulica encontrado em campo. A abertura do vertedor auxiliará no controle das condições de contorno da infiltração da precipitação na chaminé e as características hidráulicas do vertedor estabelecerão uma analogia à rugosidade e à declividade da superfície. Assim, as condições de contorno das medidas de infiltrações tanto em campo e quanto em laboratório poderão apresentar características além das propriedades hidráulicas do subsolo. As medidas de infiltração poderão ser relacionadas às propriedades hidráulicas da superfície.

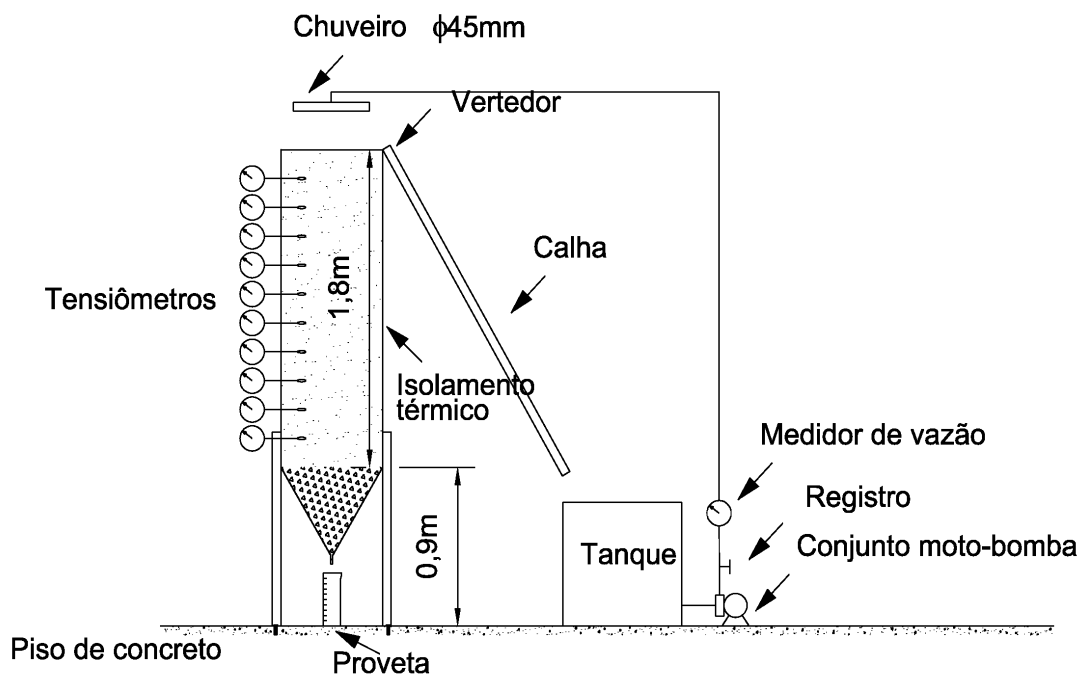


Figura 6: Esboço da simulação de chuvas no topo da coluna de solo e sua instrumentação

O vertedor no topo da coluna terá a função de reproduzir o controle hidráulico do escoamento direto exercido pelas condições hidráulicas de declividade e rugosidade encontradas em campo. Um vertedor instalado no topo da chaminé é capaz de controlar a liberação de água de sobre o solo. A analogia entre um vertedor no topo da chaminé de solo e as condições naturais de infiltração e escoamento direto é uma novidade do projeto. A analogia permitirá 1) avaliar a sensibilidade do volume infiltrado e do volume de escoamento direto a condições hidráulicas do terreno; 2) reproduzir na chaminé de solo as condições superficiais de infiltração e de escoamento direto encontradas tanto em lisímetros quanto em bacias hidrográficas. De modo especial, a chaminé permitirá ajustar tanto suas condições superficiais pelo vertedor quanto subsuperficiais pelo perfil de umidade às condições de funcionamento de lisímetros. Cada evento a ser simulado na chaminé de solo será representado desde o perfil inicial de umidade. Reproduzido o perfil inicial de umidade na chaminé, a abertura do vertedor é ajustada para reproduzir a precipitação efetiva obtida em lisímetro. Com a reprodução do perfil inicial e da precipitação efetiva, a chaminé deverá reproduzir, por conseqüência, também o processo de percolação. Trabalhos futuros avaliarão as possibilidades da coluna também permitir que sejam simuladas taxas de evaporações (também evapotranspiração) de água no solo, com a instalação de um sistema de aquecimento no topo.

A partir da reprodução em laboratório de um processo observado em lisímetro será possível simular o processo de infiltração sob condições outras de umidade inicial e de deflúvio e estudar a

sensibilidade do processo às novas condições. O estudo da sensibilidade da precipitação efetiva nas bacias quer às condições de umidade quer às condições hidráulicas do terreno somente será possível depois de reproduzidos os processos observados no lisímetro. Embora a geração de escoamento direto e infiltração de água no terreno estejam intrinsecamente ligadas, por princípios de continuidade do escoamento, às condições de deflúvio do terreno e de umidade do perfil de solo, a escala de micro-bacia hidrográfica será também ensaiada na chaminé de solo. A realização de ensaios de precipitação efetiva de micro-bacias na chaminé de solo permitirá que seja verificado como um perfil de umidade regionalizado pode afetar a precipitação efetiva em escala regional. Dada uma determinada condição de operação observada em lisímetro ensaiada em chaminé de solo, o perfil inicial de umidade do ensaio será utilizado também na representação da micro-bacia. Com a extrapolação das condições subsuperficiais do lisímetro para o ensaio da micro-bacia, a chaminé de solo deverá reproduzir a precipitação efetiva agora da micro-bacia tendo apenas que encontrar o ajuste do vertedor para as condições superficiais regionais. Reproduzida a precipitação efetiva para as condições regionais da micro-bacia, obviamente o perfil de umidade na chaminé terá resultado em curvas diferentes daquelas exibidas localmente no lisímetro. Essas discrepâncias, porém, deverão demonstrar apenas a existência de variabilidades na bacia. Testes na chaminé sob uma variedade de condições iniciais de umidade total e também de perfis de umidade na escala de micro-bacias serão realizados para avaliar a sensibilidade da geração de escoamento direto às condições subsuperficiais.

4 RESULTADOS ESPERADOS

4.1 Resultados gerais

Ao final do trabalho são esperados os seguintes resultados:

- Avaliação da retenção de água das bacias do córrego Bom Jardim e do córrego Pinheirinho
- Avaliação da recuperação da capacidade de infiltração do solo das bacias do córrego Bom Jardim e do córrego Pinheirinho
- Avaliação da vazão de pico de vazão das bacias do córrego Bom Jardim e do córrego Pinheirinho em relação à eficiência de conservação do volume precipitado;
- Prognosticar a potencialidade de possíveis reduções do volume de escoamento direto na bacia do córrego Pinheirinho.

4.2 Resultados parciais

Durante a primeira etapa do desenvolvimento deste trabalho são esperados os seguintes resultados parciais:

- Uma simulação de infiltração durante eventos chuvosos sintéticos em laboratório
- Medidas de geração de escoamento direto durante eventos chuvosos em um lisímetro de campo
- Medidas de vazão máxima nas bacias do córrego Pinheirinho e do ribeirão Bom Jardim

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foram apresentadas razões técnicas que demonstram a viabilidade de um estudo de campo e de laboratório para isolar volumes de água infiltrada no solo e volumes de escoamento direto, como mecanismos participantes do processo de formação de enchentes. Colunas de solo já têm sido construídas em laboratório, como a de Nichol *et al.* (2008) produzindo medidas confiáveis de água no solo. Em um primeiro momento, a coluna de solo deste estudo reproduzirá condições hidráulicas de infiltração e deflúvio direto encontradas em um lisímetro de pesagem instalado em campo, que apresenta acessórios especiais para isolar o deflúvio direto. Medidas de volume retido em lisímetro, volume extravasado no topo do lisímetro e coletas de dados pluviométricos serão utilizadas para monitorar infiltração e geração de escoamento direto. Estimativas de evaporação no lisímetro e coleta de volume drenado abaixo do lisímetro serão determinadas para avaliar a recuperação da capacidade de infiltração no lisímetro. Em um segundo momento, medidas de vazões de cursos de água durante enchentes nas bacias e as estimativas de evapotranspiração da bacia permitirão a separação de componentes de vazão, entre escoamento direto e escoamento subsuperficial. Em laboratório, a simulação de chuvas e a regulação da altura do vertedor, que guarda analogias hidráulicas com a regulação hidráulica dos terrenos permitirá reproduzir medidas de volumes específicos de escoamento direto gerado nas bacias. Estudos futuros avaliarão a viabilidade técnica de simulação de taxas de evaporação, eventualmente evapotranspiração, em uma coluna de solo em laboratório.

BIBLIOGRAFIA

BAZEMORE, DE; ESHLEMAN, KN e HOLLENBECK, KJ. (1994). "The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence". *Journal of Hydrology* 162 (1-2) pp. 47-75.

BESCHTA, R. L.; PYLES, M. R.; SKAUGSET, A. E. e SURFLEET, C. G. (2000) “Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA”, *Journal of Hydrology*, 233 (1-4), pp. 102-120.

BINLEY, A. M.; BEVEN, K. J.; CALVER, A. e WATTS, L. G. (1991), “Changing Responses in Hydrology: Assessing the Uncertainty in Physically Based Model Predictions”, *Water Resour. Res.*, 27(6), pp. 1253–1261.

BONELL, M. (1993) “Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests”. *Journal of Hydrology*, 150 (2-4), pp. 217-275.

LATRON, J. e GALLART, F. (2008) “Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees)”, *Journal of Hydrology*, 358(3-4), pp. 206-220

LU, J.Y.; SU, C.C. e WANG, C.Y. (2006), “Application of a portable measuring system with acoustic Doppler current profiler to discharge observations in steep rivers”, *Flow Measurement and Instrumentation* 17, pp. 179-192.

MERZ, B. e THIEKEN, A. H. (2005) “Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis”, *Journal of Hydrology*, 309 (1-4), pp. 114-132.

NICHOL, C. F.; ROWLETT, D. K. e BARBOUR, S. L. (2008). “A new standpipe lysimeter design for the measurement of soil matric suction”. *Vadose Zone Journal* 7(3), pp. 919-929

NIELSEN, D.R. (1997). “A challenging frontier in hydrology – The vadose zone”. In: *Reflections on hydrology: Science and practice*. Org. por Buras, N. Washington-DC EUA, AGU, pp. 205-226

PEREIRA, A. R.; SANTIAGO, A. V.; MAGGIOTTO, S. M.; FOLLEGATTI, M. V. (2002) “Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento”. *Revista brasileira de agrometeorologia*, 10(1), pp. 51-56