

Estabilidade Temporal da Distribuição Espacial da Umidade do Solo em uma Bacia Intermittente no Semiárido de Minas Gerais

Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

rmontemor@unifei.edu.br

Luiz Rafael Palmier

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

palmier@ehr.ufmg.br

Eber José de Andrade Pinto, José do Espírito Santo Lima

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

eber.andrade@cprm.gov.br, jose.lima@cprm.gov.br

Recebido: 08/02/11 - revisado: 03/07/11 - aceito: 12/04/12

RESUMO

O entendimento do comportamento hidrológico de bacias depende da disponibilidade de dados e a manutenção de redes de monitoramento demanda elevados recursos econômicos, principalmente no caso de medições das variáveis de umidade do solo, pressão da água no solo, escoamento superficial em encostas, vazão sólida etc, além das normalmente monitoradas variáveis de precipitação, evaporação e vazão. Em regiões semiáridas a situação é agravada pela necessidade de medições contínuas de forma a representar eventos climatológicos infrequentes. Neste trabalho é apresentada uma análise da variabilidade espaço-temporal de dados de um monitoramento de umidade do solo realizado na bacia representativa do córrego Teixeira, localizada na bacia do rio Jequitinhonha, no nordeste de Minas Gerais. Nessa bacia, em 2005, iniciou-se o monitoramento hidrológico da precipitação, evaporação e vazão. Em 2009, foram instalados tubos de acesso para monitoramento da umidade do solo. Com os dados obtidos e utilizando a técnica da diferença relativa, foi possível identificar os pontos que, independentemente do tempo, representam a média real e os extremos de umidade. A análise realizada permite obter um conjunto de dados de umidade de solo para ser utilizado na modelagem hidrológica dessa bacia hidrográfica.

Palavras-Chave: Umidade do solo, hidrologia do semiárido, monitoramento hidrológico.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a disponibilidade de água é abundante, entretanto, sua distribuição ocorre de forma irregular, como mostram, por exemplo, os dados do balanço hídrico das regiões hidrográficas Amazônia e Atlântico Nordeste Oriental, cujos valores de vazão específica são iguais a, respectivamente, 34,2 L/s/km² e 2,81 L/s/km² (MMA, 2000).

Em 2004, foi instituída pelo Ministério da Integração Nacional (MI) e pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) uma nova delimitação do semiárido brasileiro, que tomou por base três critérios técnicos: precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros (sem que tenha sido indicado o período de análise); índice de aridez de até 0,5, calculado pelo balanço hídrico que relaciona a

precipitação e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990; e risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990 (MI, 2005).

Com essa atualização, a área classificada oficialmente como semiárido brasileiro aumentou de 892.309,4 km² para 969.589,4 km², sendo composta por 1.133 municípios dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, totalizando uma população de 20.858.264 milhões de pessoas, 44% dessas residindo na zona rural.

O estado de Minas Gerais possui uma região semiárida em suas porções norte e nordeste, onde predominam os biomas de Cerrado e Caatinga e o tipo de uso dado aos recursos hídricos, edáficos e vegetais está gerando graves problemas socioeco-

nômicos e de degradação ambiental. Essa região é considerada uma das mais pobres do Brasil.

No Brasil a região semiárida não constitui um espaço homogêneo, tampouco desértico ou impróprio à vida. Pelo contrário, essa região apresenta alta diversidade ecológica, possuindo ricos recursos naturais. Os conhecimentos acumulados sobre o clima permitem concluir não ser a falta de chuvas a responsável pela oferta insuficiente de água nessas regiões, mas sua má distribuição, associada à alta taxa de evapotranspiração, que resultam no fenômeno da seca, a qual periodicamente assola suas populações (MI, 2005).

Face à vasta extensão de regiões semiáridas (e áridas) no mundo, é essencial aprofundar o conhecimento dos processos hidrológicos nessas regiões. Porém, de acordo com Pilgrim *et al.* (1988), a falta de dados nessas regiões – situação ainda persiste nos dias atuais – aumenta as dificuldades e incertezas de estimativas e é o principal obstáculo para a utilização de modelos hidrológicos.

A produção de escoamento em ambientes semiáridos é geralmente dominada por componentes de escoamento rápido de superfície, durante e imediatamente após a chuva. De acordo com Pilgrim *et al.* (1988), os hidrogramas observados em regiões áridas e semiáridas tendem a ser efêmeros, com tempos de base curtos, curvas de ascensão e recessão íngremes, e, em particular, com tempo de subida observados muito curtos.

Esse comportamento é observado em função das características da precipitação, muitas vezes de alta intensidade, excedendo a capacidade de infiltração do solo.

A umidade do solo é um fator chave na determinação da resposta do escoamento superficial para um dado evento de precipitação, sendo a variável de estado natural da superfície terrestre, que varia espacialmente e temporalmente sobre a área da bacia.

A umidade do solo representa uma pequena proporção (0,05%) da água doce na Terra (Dingman, 2002), sendo um reservatório influente no ciclo hidrológico.

De acordo com Western & Blöschl (1999), a umidade do solo é a variável chave nos processos hidrológicos na superfície terrestre, cujo conhecimento é importante para entender e prever uma amplitude de processos hidrológicos. A variação espacial da umidade do solo é importante porque afeta a agricultura, o clima, a ecologia e a hidrologia.

Segundo Qiu *et al.* (2001), existem diversos fatores que podem influenciar a sua distribuição,

tais como: uso do solo, declividade, topografia, propriedades do solo, precipitação, radiação solar e outros fatores climatológicos.

A evolução espacial e temporal da umidade do solo é controlada por vários fatores. Para Robinson *et al.* (2008), a topografia e a posição do declive são dominantes durante os períodos úmidos, enquanto os aspectos da declividade, da vegetação, da textura e da estrutura vertical são mais importantes nos períodos secos.

Numerosos estudos observados por Famiglietti *et al.* (2008) sugerem que a representação realista da variabilidade espacial do teor de umidade da superfície do solo pode melhorar a habilidade de previsão de modelos hidrológicos, climatológicos e de circulação geral, incluindo processos como a evapotranspiração, escoamento superficial, precipitação e variabilidade atmosférica.

No que se refere à variabilidade da umidade do solo, destacam-se, no Brasil, os recentes estudos desenvolvidos por Medeiros *et al.* (2007) e por Santos (2010). No primeiro a estabilidade temporal no padrão espacial da umidade do solo foi avaliada numa pequena bacia rural no Rio Grande do Sul. O objetivo do estudo foi identificar pontos de amostragem que reproduzem o comportamento médio e extremo da umidade. O monitoramento da umidade do solo foi realizado durante um ano agrícola, com a coleta de amostras nas profundidades de 0 cm (superfície – método gravimétrico), e de 30 cm (TDR). Os resultados obtidos indicam que a estabilidade completa do padrão espacial da umidade do solo foi observada na profundidade de 30 cm, mas que não existe na camada superficial (principalmente em função da influência de eventos chuvosos).

No segundo estudo (Santos, 2010), a bacia representativa do Alto Ipanema, localizada na região agreste do estado de Pernambuco, foi equipada com uma estação climatológica, duas estações pluviográficas e duas sondas TDR. O monitoramento foi realizado em encostas da bacia com análises de perdas de água em quatro parcelas experimentais que apresentavam os seguintes tipos de uso do solo: cobertura natural; palma forrageira; barramentos em pedras com cobertura morta; e solo descoberto. Após uma análise estatística dos dados obtidos observou-se que a umidade do solo apresentou elevada variabilidade no tempo, estando relacionada aos diferentes tipos de cobertura e propriedades do solo, sendo mais dependente da intensidade de precipitação do que do total precipitado, bem como da umidade antecedente.

As bacias hidrográficas localizadas em áreas de difícil acesso em regiões semiáridas ou as de pe-

quenas áreas de drenagem, geralmente, não contam com uma rede de coleta de informações hidrológicas adequada. Nessas situações, as séries de observações hidrológicas podem ser inapropriadas em termos de escala temporal e espacial para subsidiar aplicações de engenharia de recursos hídricos.

A implantação de bacias representativas ou experimentais permite ampliar o conhecimento dos processos hidrológicos de biomas específicos, como, por exemplo, o cerrado ou o semiárido. Dessa forma, a associação entre o aprimoramento dos métodos de modelagem e o maior conhecimento dos processos hidrológicos, em diferentes escalas, pode resultar em menores incertezas na predição de variáveis hidrológicas em bacias pouco monitoradas. Esse é um desafio enfrentado pela comunidade hidrológica internacional por meio do programa *Prediction in Ungauged Basins, de iniciativa da International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*.

As bacias representativas representam um ganho para o conhecimento hidrológico, principalmente em áreas pouco monitoradas, como é o caso da região nordeste do estado de Minas Gerais. É notória a necessidade de se dispor de séries longas de dados hidrológicos para se aumentar a confiança nas extrapolações, principalmente em bacias do semiárido, cuja variabilidade é maior.

Em situações como essas, os modelos de simulação hidrológica podem ser de grande utilidade. Essencialmente, a simulação de bacias não monitoradas (ou pouco monitoradas) envolve, em maior ou menor grau, algum tipo de extrapolação do que é observado ou inferido em uma bacia monitorada. Independentemente dos métodos utilizados, as simulações em bacias pouco monitoradas apresentam incertezas que são inerentes à abordagem do problema, pois os resultados não podem ser avaliados ou verificados com confiança.

A diminuição dessas incertezas está associada ao desenvolvimento de métodos utilizados na modelagem de bacias pouco monitoradas que possam ser elaborados a partir dos dados observados em bacias monitoradas de características físicas semelhantes. Esses métodos decorrem do conhecimento ou da descrição dos processos hidrológicos alcançados em laboratório, ou em experimentos de campo, ou, ainda, desenvolvidos com a aplicação de teorias fundamentais condicionadas pelas observações.

Com o objetivo de ampliar o conhecimento de processos hidrológicos no semiárido de Minas Gerais, em outubro de 2005 foi iniciado um projeto de pesquisa no âmbito do edital de Bacias Representativas da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Optou-se pela implantação da bacia represen-

tativa do córrego Teixeira, na região do médio Jequitinhonha, pois essa é uma bacia com cursos d'água intermitentes que apresenta características de uma região de transição entre o cerrado e a caatinga.

Neste trabalho, é apresentada uma análise da variabilidade temporal da umidade do solo em uma das áreas monitoradas na bacia do córrego Teixeira. Essa análise permitirá uma melhor compreensão do comportamento da umidade na bacia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Bacia experimental do Teixeira

A bacia do córrego intermitente do Teixeira, cuja área é de aproximadamente 142 km², está localizada na região do médio rio Jequitinhonha, no município de Itinga, conforme indicado na Figura 01. A bacia situa-se entre os paralelos 16°37' e 16°50' de latitude sul e os meridianos 41°42' e 41°51' de longitude oeste.

Considerando os dados de normais climatológicas publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação de Araçuaí, código 83442, distante de aproximadamente 35 km da área de estudo, verifica-se que a temperatura média anual varia entre 21 e 26,5°C. O mês mais quente, fevereiro, apresenta média das máximas de 33,4°C. No período outono-inverno ocorre um decréscimo de temperatura, sendo que a média das mínimas do mês mais frio, julho, é de 15,3°C (DNM, 1992).

Com relação às precipitações observam-se duas estações bem definidas, uma úmida, de outubro a março, e a outra seca, de abril a setembro. O total pluviométrico anual médio (1961-1990) de Araçuaí é de 841,2 mm. O trimestre mais chuvoso, novembro-dezembro-janeiro, contribui com 55% do total anual precipitado. Já o trimestre mais seco, correspondente aos meses de junho, julho e agosto, contribui com 2% da precipitação anual. Na estação de Itinga, localizada na seção exutória da bacia do córrego Teixeira, adjacente à do córrego Teixeira, em uma altitude aproximada de 260 m, existe uma estação pluviográfica da Agência Nacional de Águas (ANA), código 01641010, cujo total pluviométrico anual médio por ano hidrológico é de 741,7 mm (out/1977 a set/2007), sendo que a precipitação do trimestre mais chuvoso, novembro-dezembro-janeiro, corresponde a 59% do total anual precipitado. Em Itinga, o número médio de dias chuvosos por ano hidrológico é igual a 71.

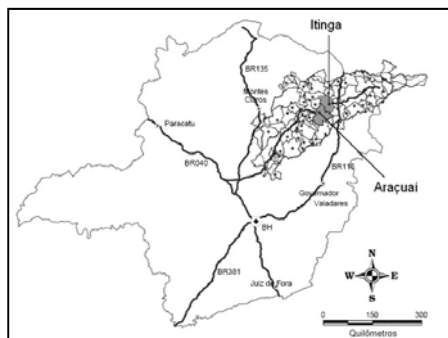


Figura 01 - Localização dos municípios de Araçuaí e Itinga em Minas Gerais

A evapotranspiração potencial de Araçuaí, estimada pelo método de Thornthwaite, utilizando as temperaturas médias normais, é de 1321,6 mm. Na Figura 02, são ilustradas as médias mensais das precipitações de Itinga e Araçuaí, bem como as taxas de evapotranspiração potencial de Araçuaí.

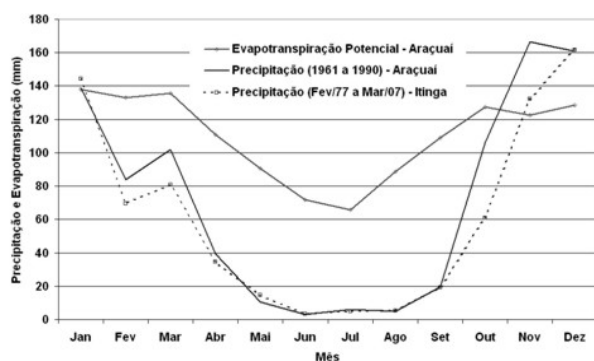


Figura 02 - Média mensal da precipitação e evapotranspiração potencial (Thornthwaite)

Na Figura 03 é apresentado o mapa de uso e ocupação vegetal das bacias dos córregos Teixeira (bacia à esquerda) e Teixeira.

O mapa foi elaborado a partir da classificação supervisionada das imagens do LANDSAT 7-TM, de 01/07/2007.

Na Figura 04 exibe-se a distribuição espacial das principais unidades litoestratigráficas encontradas nessa área, conforme publicado por CPRM (2008).

De acordo com Pinto *et al.* (2008), na área abrangida pelas bacias afloram rochas piroclásticas, graníticas e metamórficas. As coberturas que ocorrem capeando o granito Teixeira constituem latossolos areno-argilosos.

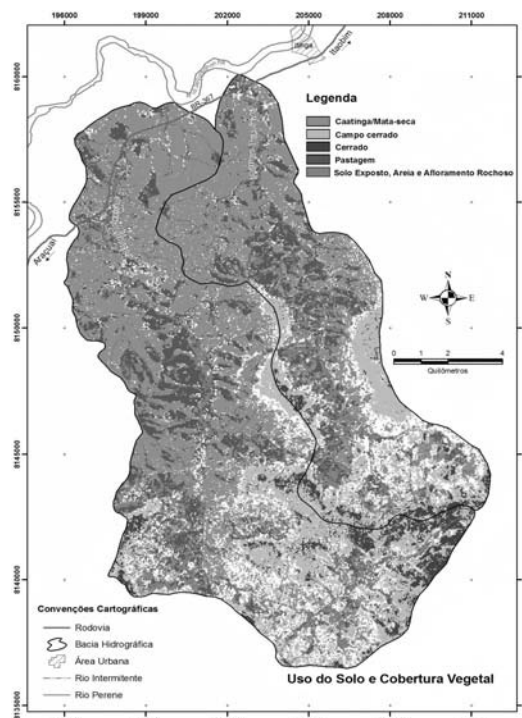


Figura 03 - Mapa do uso e ocupação do solo

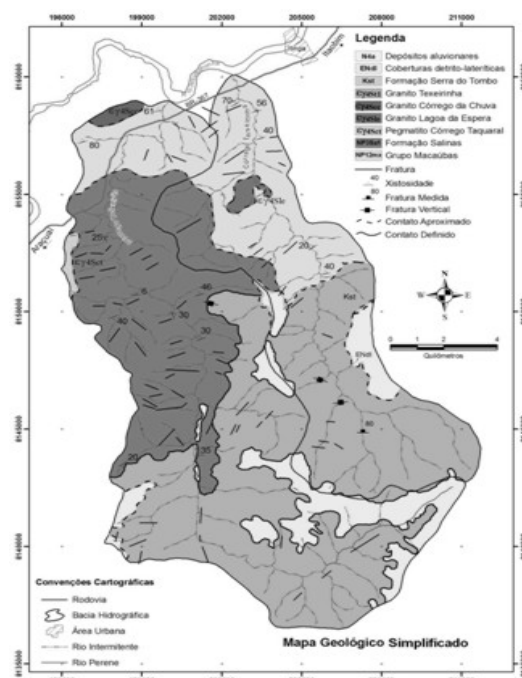


Figura 04 - Mapa geológico simplificado

As vazões fornecidas pelos poços perfurados nos aquíferos fissurais são geralmente baixas, e a água, em função da baixa velocidade de circulação e

dos elevados valores da evaporação, apresenta uma concentração relativamente alta de sais (Pinto *et al.*, 2008).

Monitoramento hidrológico

A bacia do Teixeira foi objeto de uma pesquisa financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e executada em parceria pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE-UFGM) e a CPRM - Serviço Geológico de Brasil, com o objetivo principal de avaliar a eficiência de técnicas de captação de água de chuva, como barragens subterrâneas e estruturas de microcaptação (Viana, 2006; Hernandez-Bernal, 2007). Em 2004 e 2005, no âmbito desse projeto, foram instaladas nessa bacia, estações pluviográficas e evaporimétricas e uma estação fluviográfica próximo à foz.

Além da implantação e da ampliação de estações hidrométricas, foram fabricadas e instaladas régua de máximo *crest-stage* (Pinto *et al.*, 2007), equipamento simples que permite a materialização do nível máximo alcançado por um curso d'água durante o intervalo de tempo entre duas visitas de equipes de campo.

Oliveira e Silva *et al.* (2007) utilizaram um modelo chuva-vazão adaptado para simulação de bacias com rios intermitentes do semiárido para avaliar a possibilidade de simular bacias pouco monitoradas utilizando os parâmetros calibrados em outra bacia com características fisiográficas semelhantes. Esse modelo é concentrado, contínuo, de simulação em intervalo de tempo diário e horário, composto de dois módulos: produção e concentração. O módulo de produção é baseado no modelo Xinanjiang e calcula o balanço hídrico na bacia (Zhao, 1980). O módulo de concentração utiliza o conceito do hidrograma unitário de Clarke para representar a distribuição temporal do escoamento no exutório da bacia.

O modelo foi calibrado com as informações da bacia do córrego intermitente Teixeira (142 km²) e com os valores otimizados dos parâmetros foi realizada a simulação da bacia vizinha, do córrego Teixeira (80 km²), na qual também foi instalada uma estação fluviométrica e régua de máximo. Os resultados foram considerados apenas satisfatórios para as duas bacias e espera-se que o monitoramento da umidade do solo na bacia possa fornecer elementos para modificações no modelo utilizado ou para a escolha de outro modelo de simulação.

No ano de 2009, foram implantadas na bacia do córrego Teixeira duas estações climatológi-

cas da marca Squitter para monitoramento de dados de precipitação, umidade do ar, temperatura, radiação solar, velocidade e direção do vento. Adicionalmente, no mesmo ano, iniciou-se o monitoramento da umidade do solo utilizando uma sonda de capacidade, desenvolvida pela empresa Delta-T.

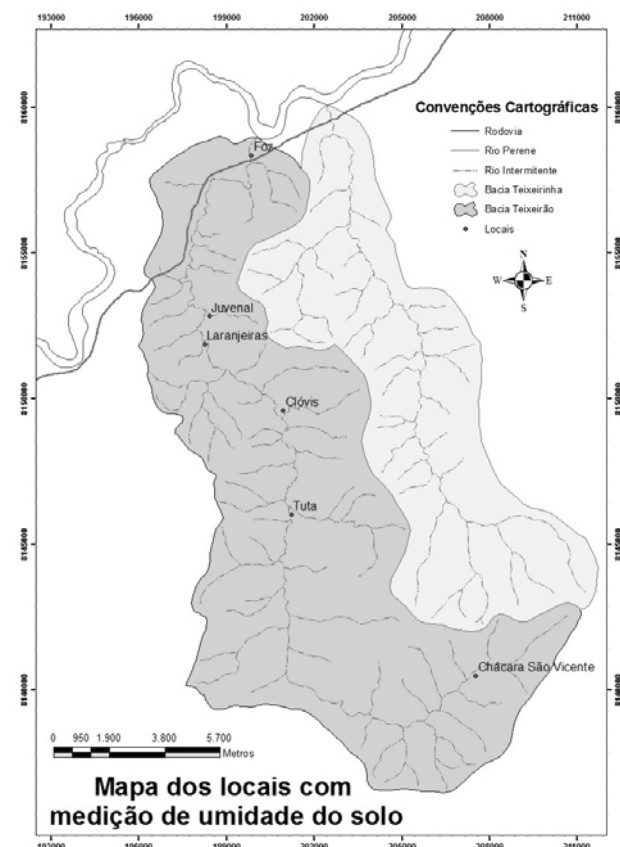


Figura 05 - Mapa dos locais com medição de umidade do solo

Tabela 01 – Localização dos tubos de acesso

Área	Quantidade	Localização no curso d'água	Tipo de vegetação
Chácara	1	Alto	Gramínea
Barragem do Clóvis	2	Médio	Gramínea
Tuta	4	Médio	Gramínea
Laranjeiras	6	Médio	Árvores e gramínea
Juvenal	5	Médio	Árvores e gramínea
Foz	2	Baixo	Gramínea

Optou-se pela aquisição dessa sonda em decorrência da possibilidade de se realizar o levantamento de dados de forma rápida e não-destrutiva, e em diversos locais, pois a sonda é inserida em tubos de acesso previamente instalados no solo. Lima (2010) utilizou o mesmo equipamento para avaliar os dados de umidade do solo na zona não saturada, até um metro de profundidade, em uma bacia experimental localizada no bioma Cerrado. Entretanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois subestimam os valores obtidos pelo método gravimétrico. Embora o referido autor tenha apresentado restrições ao uso da sonda para trabalhos que requeiram dados precisos de umidade, ressalta-se que o interesse no presente estudo é o de avaliar a variabilidade temporal dos valores integrados medidos em diferentes profundidades em um mesmo tubo de acesso.

A instalação dos tubos foi realizada nos dias 15/09/2009 e 10/10/2009. Para se tentar obter uma representação espacial da umidade do solo na bacia do córrego Teixeira, foram instalados 20 tubos de acesso em suas partes alta, média e baixa.

Os pontos de instalação dos tubos de acesso, representativos da bacia, foram escolhidos com base em visita de campo. Alguns pontos foram determinados de forma a procurar representar a variabilidade da umidade do solo ao longo de um perfil transversal ao curso d'água principal, tendo sido também consideradas características de cobertura vegetal.

A instalação foi feita de modo a garantir um bom contato entre o solo e os tubos de acesso, ficando os mesmos cerca de 4 cm acima da superfície do solo. As leituras dos sensores de umidade foram realizadas em frequência mensal.

Na Figura 05 e na Tabela 01 são apresentadas as localizações dos pontos de monitoramento do teor de umidade do solo na bacia do Teixeira.

A estimativa da umidade do solo numa bacia hidrográfica com base em análise estatística requer uma densa rede de sondas de umidade. Face às dificuldades inerentes de instalação de uma rede dessa natureza, procura-se prever as médias de umidade em grande escala com apenas alguns sensores instalados em locais representativos. Esses locais são identificados com base em uma análise de estabilidade temporal, a qual, caso seja estabelecida, permite o uso de um pequeno número de sensores para prever, com a precisão requerida, as médias de umidade do solo da bacia hidrográfica. Análise desse tipo pode também ser realizada para a determinação dos locais que apresentam valores extremos (máximo e mínimo) de umidade do solo na bacia hidro-

gráfica. Para a determinação da estabilidade temporal do padrão espacial da umidade do solo foi utilizada a metodologia proposta por Vachaud *et al.* (1985).

Análise estatística

Uma análise de estabilidade temporal e de variabilidade espaço-temporal do armazenamento da umidade do solo foi desenvolvida com base em dados coletados durante os anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011. Vachaud *et al.* (1985) definiram a estabilidade temporal como a associação invariável no tempo entre a localização espacial e parâmetros estatísticos clássicos. Em relação à umidade do solo (θ), a estabilidade temporal sugere que o padrão de variabilidade espacial não muda no tempo quando o indivíduo θ é classificado de acordo com sua magnitude, ou quando ponderado em relação ao valor médio para a área em estudo (Van Pelt & Wierenga, 2001).

Para avaliar a estabilidade temporal dos dados de umidade do solo monitorados em campo, Vachaud *et al.* (1985) utilizaram uma técnica baseada na diferença (Δ_{ij}) entre uma medição individual de θ_{ij} no local i e no tempo j , e a média diária espacial da umidade do solo ($\bar{\theta}_j$) no mesmo tempo para todos os locais, ou seja:

$$\Delta_{ij} = \theta_{ij} - \bar{\theta}_j \quad (1)$$

Sendo

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{ij} \quad (2)$$

e N é o número de locais amostrados.

A diferença relativa (δ_{ij}) pode ser calculada por:

$$\delta_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\bar{\theta}_j} \quad (3)$$

A média temporal da diferença relativa ($\bar{\delta}_i$) e o seu desvio padrão ($\sigma(\bar{\delta}_i)$) são determinados para cada localização por, respectivamente:

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (4)$$

E

$$\sigma(\bar{\delta}_i) = \left[\sum_{j=1}^m \frac{(\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2}{m-1} \right]^{1/2} \quad (5)$$

sendo m o número de amostras diárias.

O uso de diferenças relativas permite a identificação de locais que representem a média da umidade do solo da bacia ou locais de valores extremos dessa grandeza, e, ao mesmo tempo, permite produzir uma medida de variabilidade (Vachaud *et al.*, 1985). Os valores obtidos com as equações (4) e (5) são utilizados para avaliar a estabilidade temporal em cada local. Valores de $\bar{\delta}_i$ próximos de zero indicam locais que têm uma média θ próxima da média da bacia, enquanto valores com $\bar{\delta}_i$ maiores ou menores do que zero indicam uma superestimativa ou subestimativa, respectivamente, em relação à média da bacia. Locais com $\sigma(\bar{\delta}_i)$ pequenos são considerados temporalmente estáveis.

A segunda técnica utilizada por Vachaud *et al.* (1985) é o teste não paramétrico de Spearman. O coeficiente de correlação de Spearman (r_s) pode ser calculado por:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{ij} - R_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

em que R_{ij} é a posição ordenada da variável θ_{ij} observada no tempo j no ponto i ; $R_{ij'}$ é a posição da mesma variável observada no tempo j' no ponto i ; e n é o número de pontos de medição. O valor de $r_s = 1$ corresponde a posições idênticas em todos os pontos de medição, ou seja, perfeita estabilidade temporal entre as datas j e j' . Quanto mais próximo de 1 for o valor de r_s , mais estável é o processo.

Com esse teste é possível avaliar a persistência no tempo do padrão espacial do conteúdo de água no solo, pois se pode inferir o quanto da variabilidade observada no instante j pode ser explicada pela variância presente no instante j' .

Medeiros *et al.* (2007) observaram que a existência e a localização de pontos com estabilidade temporal no comportamento da umidade do solo, assim como a possibilidade de se determinar sua posição em função da textura e profundidade do solo e da posição topográfica, são fundamentais no planejamento de qualquer programa de monitoramento. Entretanto, esse conceito precisa ser analisado em um número maior de ambientes e escalas para testar: se a existência desses locais é geral; e se é possível identificar fatores do terreno e do solo que

podem ser utilizados para definir a determinação desses locais.

Neste trabalho, serão analisados somente 6 pontos monitorados na bacia do córrego Teixeira, localizados em Fazenda Laranjeiras. Esses pontos foram escolhidos devido a sua proximidade da estação climatológica implantada na fazenda e pela quantidade de dados existentes, o que facilita a aplicação da metodologia apresentada por Vachaud *et al.* (1985). Adicionalmente, deve considerar-se que os pontos utilizados foram implantados de forma a acompanhar o perfil topográfico da região monitorada.

Na Figura 06, apresenta-se um esquema do perfil do terreno com a localização dos pontos monitorados na Fazenda Laranjeiras, conforme localização apresentada na Figura 05.

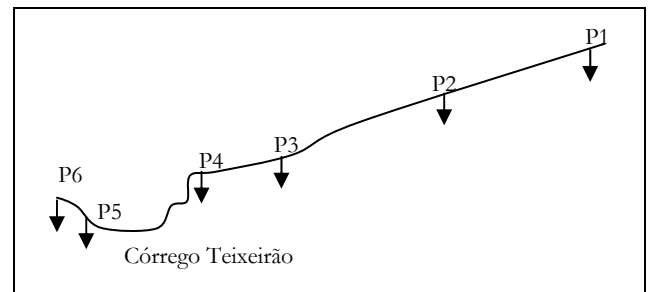


Figura 06 - Esquema do perfil topográfico da fazenda Laranjeiras com a localização dos tubos de acesso implantados

Quanto ao uso e ocupação dos solos na fazenda Laranjeiras, observou-se que os pontos 1 e 6 estão em uma área vegetada, e os pontos 3, 4 e 5 em área de pasto sujo. Já o ponto 2 encontrava-se inicialmente em uma área de pasto sujo, que posteriormente foi desmatada e passou a ser utilizada como área para a criação de porcos.

Armazenamento

A variação do conteúdo de água no perfil de solo (ΔW) pode ser calculada por:

$$W(t) = \sum_{z_i}^{z_j} \bar{\theta}_{(z_y - z_x)} \cdot (z_y - z_x) \cdot 100 \quad (7)$$

sendo W a água armazenada no perfil do solo (mm) e $\bar{\theta}_{(z_y - z_x)}$ o conteúdo da umidade média (%) medido nas profundidades z_x e z_y .

A variação da água armazenada no perfil do solo é dada por:

$$\Delta W = W_j - W_{j-1} \quad (8)$$

Balço Hídrico

O balanço hídrico por ano hidrológico na região pode ser calculado por:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - E - DE \quad (9)$$

sendo $\Delta V / \Delta t$ a variação do volume armazenado na bacia (mm), P a precipitação (mm), E a evaporação (mm) e DE o deflúvio médio (mm).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 07 e 08 são apresentadas, respectivamente, as variações da precipitação e da evapotranspiração de referência (calculada utilizando o método de Penman-Monteith) na estação climatológica implantada em Fazenda Laranjeiras.

Nessa estação observa-se a concentração das chuvas nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2009 e 2010 e março de 2010 e 2011 (valores entre 125 e 250 mm). Entretanto, os valores de precipitação nos meses de janeiro e fevereiro de 2010 e 2011, no meio da estação chuvosa, são relativamente baixos (valores entre 10 e 75 mm), sendo que os valores de janeiro de 2010 e fevereiro de 2011 são próximos dos valores observados para o período seco.

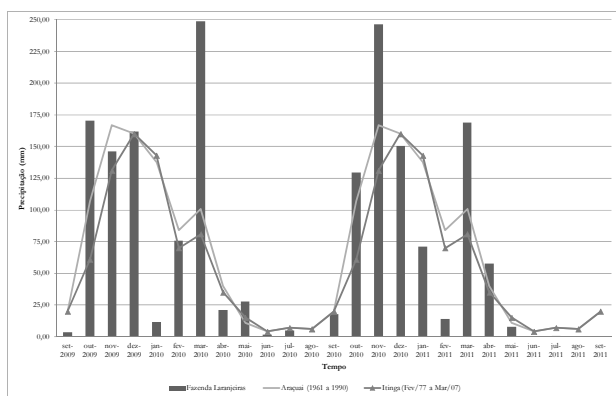


Figura 07 - Precipitação mensal (Fazenda Laranjeiras)

Analisando a Figura 08 observa-se que os valores da evapotranspiração média potencial (ETp) obtida em Araçuaí utilizando as normais climatológicas fornecidas pelo INMET e o método de Thorn-

thwaite são superiores aos valores estimados da evapotranspiração média de referência (ETo) com os dados observados em Fazenda Laranjeiras entre os meses de outubro a maio.

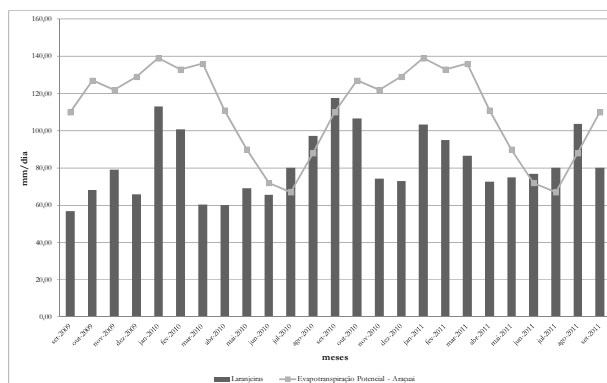


Figura 08 - Evapotranspiração mensal (Fazenda Laranjeiras)

Os dados obtidos permitem avaliar o comportamento da evapotranspiração na região de estudo. Quanto ao método de Thornthwaite, Amorim *et al.* (1999) observaram que a metodologia de cálculo é bastante criticada por considerar somente dados de temperatura do ar como variável independente e que sua utilização deve ser feita na caracterização de grandes áreas na forma de zoneamento agroclimático. Já Allen *et al.* (1998) observaram que a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) considera o método de Penman-Monteith como o padrão de estimativa de evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos.

Os resultados obtidos com o método Penman-Monteith são geralmente mais robustos em razão do maior número de parâmetros utilizados e por ser calculado na bacia de estudo.

Nas Figuras 09 a 14 são apresentados os valores temporais de umidade do solo em cada uma das profundidades durante o período de setembro de 2009 a setembro de 2011 (20 observações em intervalos de aproximadamente um mês). Como era de se esperar, face às características arenosas do solo, observa-se que os teores de umidade do solo nas profundidades de 100 mm, 200 mm e 300 mm são bastante influenciados pela precipitação e evapotranspiração.

Analisando os pontos 1 e 2, localizados em áreas de maior cobertura vegetal, são observados os mais altos valores de umidade do solo durante o período monitorado.

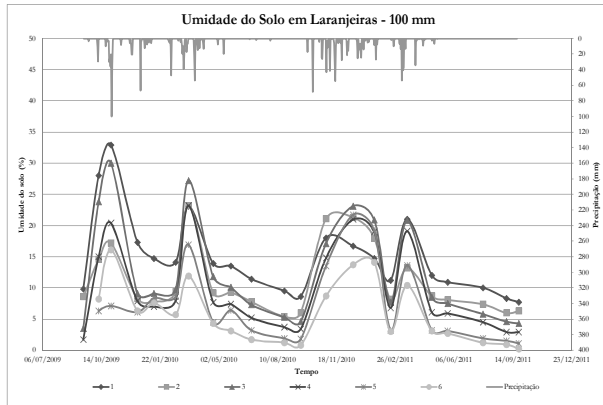


Figura 09 - Umidade do solo durante o período de estudo na profundidade de 100 mm

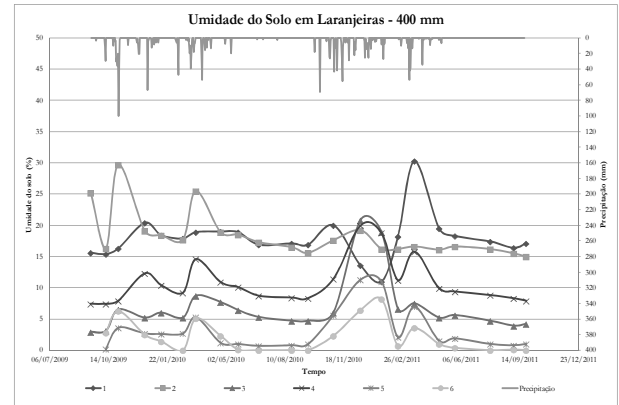


Figura 12 - Umidade do solo durante o período de estudo na profundidade de 400 mm

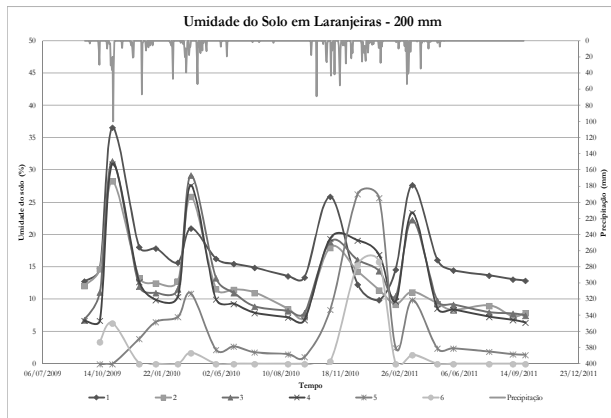


Figura 10 - Umidade do solo durante o período de estudo na profundidade de 200 mm

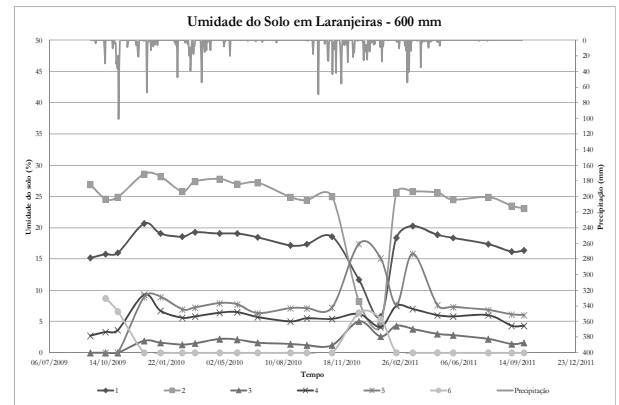


Figura 13 - Umidade do solo durante o período de estudo na profundidade de 600 mm

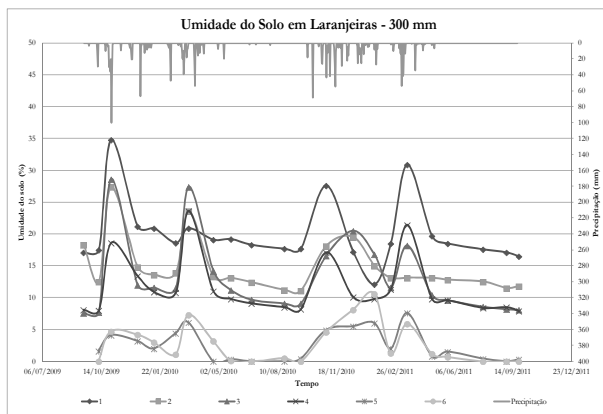


Figura 11 - Umidade do solo durante o período de estudo na profundidade de 300 mm

Durante o período analisado (anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011), houve 10 dias com precipitação superior a 40 mm. Associados a esses dias, foram medidos picos de umidade do solo em todas as camadas monitoradas, nos seguintes dias: 31/10/2009 (119,75 mm de chuva entre os dias 26 e 31/10/2009); 12/03/2010 (133,25 mm de chuva entre os dias 01 e 12/03/2010); 01/11/2010 (54,75 mm de chuva entre os dias 25 e 27/10/2010); 17/12/2010 (43,0 mm entre os dias 07 e 10 de dezembro de 2011); e 19/03/2011 (168,25 mm entre os dias 06 e 17/03/2011).

No período de monitoramento não foi observada nenhuma alteração significativa no uso e ocupação do solo na bacia, além da retirada da vegetal ("capoeirinha"), em dezembro de 2010, de uma área na qual está localizado o ponto 2. Embora a resposta associada aos eventos chuvosos de março de 2011, conforme valores de umidade do solo nas

profundidades de 100, 200 e 300 mm, tenha sido menos significativa nesse ponto, do que em eventos anteriores de grande magnitude de chuva, são necessárias análises de novos eventos para confirmar potenciais efeitos da mencionada retirada de vegetação.

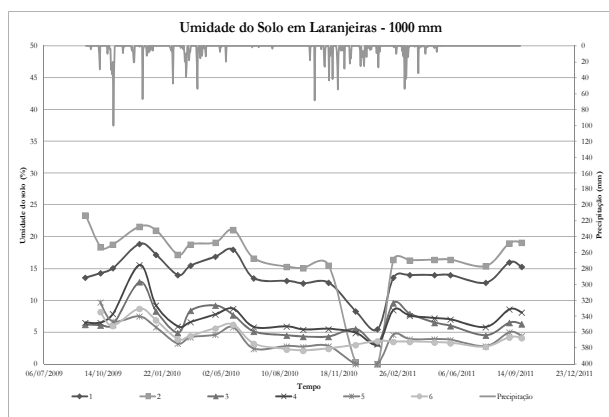


Figura 14 - Umidade do solo durante o período de estudo na profundidade de 1000 mm

Quando se analisa a umidade do solo na profundidade de 400 mm, nota-se que a precipitação provoca uma pequena mudança no perfil de umidade em determinados períodos.

Já para as profundidades de 600 mm e 1000 mm, nota-se uma relativa estabilidade, pois há pouca influência da evapotranspiração, mesmo na estação seca, e dos eventos de precipitação. Observa-se que os pontos 1 e 2 apresentam valores mais elevados que os demais e que a umidade apresenta pequenas variações entre o período úmido e o seco. A única exceção a esse tipo de comportamento foi verificada nos pontos 1, 2 e 5 nos meses de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, com duas medições consecutivas (17/12/2010 e 23/01/2011) com valores relativamente baixos (próximos de zero para os pontos 2 e 5) de difícil associação com a precipitação, visto que as alturas totais de chuva no mês de dezembro de 2010 e nos 23 dias de janeiro de 2011 foram de, respectivamente, 150,0 mm (43,0 mm entre os dias 7 e 10/12) e 36,7 mm (8,7 mm no dia 22/01).

Na Tabela 02, apresenta-se uma análise estatística da variação temporal dos valores da umidade do solo monitorados em Fazenda Laranjeiras com o uso das equações 4, 5 e 6. Os valores da umidade do solo obtidos em dezembro de 2010 e janeiro de 2011 foram retirados na análise realizada.

Tabela 02 – Variabilidade espacial da umidade do solo em Fazenda Laranjeiras

Prof.	Ponto	Δ	$\sigma(\delta)$	Prof.	Ponto	Δ	$\sigma(\delta)$
100	1	70%	29%	400	1	97%	29%
	2	19%	25%		2	95%	24%
	3	16%	19%		3	-42%	12%
	4	-13%	18%		4	5%	15%
	5	-43%	21%		5	-78%	14%
	6	-55%	21%		6	-86%	16%
200	1	85%	28%	600	1	82%	13%
	2	28%	19%		2	161%	17%
	3	27%	16%		3	-83%	10%
	4	14%	18%		4	-44%	12%
	5	-66%	21%		5	-31%	28%
	6	-95%	11%		6	-91%	28%
300	1	98%	30%	1000	1	59%	17%
	2	39%	17%		2	93%	15%
	3	15%	19%		3	-29%	10%
	4	8%	14%		4	-21%	11%
	5	-84%	15%		5	-52%	13%
	6	-85%	15%		6	-54%	12%

Ao se analisar a diferença relativa (δ), de acordo com a metodologia proposta por Vachaud *et al.* (1985), infere-se que os pontos 1 e 2 são os mais úmidos, pois possuem os maiores valores positivos. Já os pontos 5 e 6 são os mais secos, pois possuem os maiores valores negativos.

Os menores valores de desvio padrão nas camadas analisadas, entre 11% e 18%, foram observados no ponto 4. Como esse ponto apresenta em cada profundidade analisada os valores mais próximos de zero para a diferença relativa e menor desvio-padrão, pode-se inferir que o mesmo pode representar a umidade média da área analisada em Fazenda Laranjeiras de acordo com a metodologia proposta por Vachaud *et al.* (1985).

Na Tabela 03, apresentam-se os valores mínimos e máximos obtidos para o coeficiente de correlação de Spearman, entre duas datas consecutivas j e j' para cada profundidade.

Observou-se no cálculo do coeficiente de Spearman que a maioria dos valores obtidos estão

próximos de 1. De acordo com a metodologia de Vachaud *et al.* (1985), existe estabilidade temporal para os dados monitorados em Fazenda Laranjeiras.

Tabela 03 – Valores do coeficiente de Spearman

Prof.	Mín.	Máx.	Prof.	Mín.	Máx.
100	0,60	1,00	400	0,89	1,00
200	0,71	1,00	600	0,66	1,00
300	0,54	1,00	1000	0,71	1,00

Tabela 04 - Variação do volume de água armazenado

Ponto	ΔW		Ponto	ΔW	
	09/out	10/nov		09/out	10/nov
1	8,3	13,10	4	1,9	14,10
2	-3,5	18,90	5	-38,5	9,70
3	8	8,00	6	3,2	8,60

Na Tabela 04 apresenta-se a variação do volume de água armazenado nos pontos analisados durante os anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011. Esse valor foi determinado por meio da integração dos resultados da umidade do solo observada durante o período.

Na Tabela 04 observa-se que no ano hidrológico 2009/2010 a variação do volume de água armazenada no solo foi positiva nos pontos 1, 3, 4 e 6 e negativa nos pontos 2 e 5. Já no ano seguinte, a variação do volume armazenado de água foi positiva em todos os pontos.

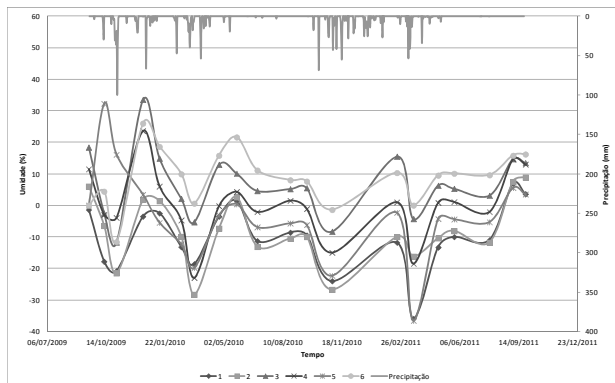


Figura 15 - Variação do volume de água armazenado nos pontos analisados

As alterações que ocorreram no ponto 2, devido às alterações no uso e ocupação do solo, podem ter acarretado modificações nas propriedades físicas do solo na área, e nesse caso dados de mais um ano hidrológicos são necessários para avali-

ar a variação do volume de água no ponto. Como o ponto 5 localiza-se bem próximo ao leito do córrego Teixeira, as variações do nível do lençol d'água podem estar interferindo na umidade do solo local.

Na Figura 15, apresenta-se a variação do volume da umidade do solo durante o período monitorado.

Observa-se na Figura 15 que o ponto 5 apresenta a maior variação de volume armazenado, com valores oscilando de -20% a 30%. Nota-se, ainda, que os pontos 1 e 2, por se localizarem em locais com declividades mais elevadas, apresentam valores de volume armazenado negativo ao longo do período monitorado. Nesses pontos, além dos fenômenos climatológicos, o escoamento lateral interfere no valor da umidade do solo no local.

Na Tabela 05 apresenta-se o balanço hídrico dos anos 2009/2010 e 2010/2011.

Tabela 05 – Balanço Hídrico

Ano	P (mm)	DE (mm)	P-DE (mm)	ETo (mm)
09/10	888,00	50,26	837,74	976,73
10/11	846,95	29,06	817,89	1027,06

As abstrações que ocorreram na bacia foram superiores a 800 mm nos anos hidrológicos analisados, o que significa que os valores da ETo calculados por meio da equação de Penman-Monteith superestimam os valores da evapotranspiração na bacia, demandando uma revisão dos parâmetros utilizados nessa equação.

CONCLUSÕES

O monitoramento da umidade do solo foi efetuado na bacia do córrego Teixeira, uma sub-bacia do rio Jequitinhonha com o objetivo de melhor compreender o comportamento da umidade do solo em uma bacia localizada no semiárido mineiro. Neste trabalho foram avaliadas a pertinência e a utilidade de se empregar a metodologia proposta por Vachaud *et al.* (1985) para analisar a estabilidade temporal de forma a identificar os pontos de amostragem que reproduzem os comportamentos médio e extremo dessa bacia.

Foi possível identificar que o ponto 4 representa a umidade média da área estudada, e que os pontos 1 e 2 são os mais úmidos e os pontos 5 e 6 os mais secos.

Os resultados obtidos mostram que existe estabilidade temporal para os dados monitorados, e que a metodologia empregada é válida. A metodologia será futuramente aplicada considerando todo o conjunto de dados existentes na bacia (20 tubos de acesso). A bacia do Teixeirão, por possuir uma grande área de drenagem, apresenta-se como uma ótima oportunidade para avaliar a estabilidade temporal da umidade do solo em uma bacia que possui uma escala de área maior.

Não foi possível inferir a influência da frequência de monitoramento nos resultados obtidos com o uso da metodologia de Vachaud *et al.* (1985), que utilizaram dados de medições quinzenais durante o verão e outono, e bimensais durante o inverno e primavera entre maio de 1981 a novembro de 1983. Medeiros *et al.* (2007) e Santos (2010) aplicaram a mesma metodologia utilizando, respectivamente, dados mensais de uma bacia úmida (de junho de 2002 a junho de 2003) e dados quinzenais de uma bacia semiárida (de fevereiro a outubro de 2009).

Para uma melhor avaliação da estabilidade temporal a frequência de medição da umidade do solo foi alterada para ser diária. E foi implantado, em uma sub-bacia do córrego Teixeirão, localizada em Fazenda Laranjeiras, sete novos tubos de acesso. Esses novos pontos permitirão avaliar e comparar o comportamento da umidade do solo em duas bacias que apresentam escalas de áreas diferentes na região do semiárido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desse projeto, *Estudos dos Processos Hidrológicos em Bacias Representativas do Cerrado e Semiárido Mineiro*. Os autores são gratos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento, através do Fundo Setorial de Recursos Hídricos e do Edital Universal MCT/CNPq-02/2006, do projeto *Avaliação da eficiência de técnicas de captação de água de chuva na região do médio Jequitinhonha*, que permitiu a instalação das estações; à CPRM – Serviço Geológico do Brasil, pela execução dos trabalhos de campo; e à Agência Nacional de Águas, pelo financiamento da operação de algumas estações.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, M. R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Irrigation and drainage paper no. 56, FAO Water Resources, Development and Management Service. Rome, Italy. 1998.
- AMORIM, M. C.; ROSSATO, L.; TOMASELLA, J. *Determinação da evapotranspiração potencial do Brasil aplicando o modelo de Thornthwaite a um sistema de informação geográfica*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 4, p. 83-90, 1999.
- CPRM. *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-Serviço Geológico do Brasil*. Programa Geologia do Brasil. Projeto Jequitinhonha. Carta Geológica da Folha Itaobim – SE.24-V-A-IV, Esc. 1:100.000. Belo Horizonte. CPRM. 2008.
- DINGMAN, S. *Physical Hydrology*. Prentice Hall, Upper Saddle River. 2002, 646 p.
- DNM. *Departamento Nacional de Meteorologia, Normais Climatológicas (1961-1990)*, Brasília, mai., 1992, 84p.
- FAMIGLIETTI, J. S.; RYU, D.; BERG, A. A.; RODELL, J.; JACKSON, E. T. J. *Field observations of soil moisture variability across scales*, *Water Resour. Res.*, 44, W01423. 2008.
- HERNANDEZ-BERNAL, N. A.. *Avaliação de Técnicas de Captação de Água de Chuva para Recuperação Ambiental na Região Semiárida do Vale do Jequitinhonha*. 2007. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- LIMA, J. E. F. W. *Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado (Distrito Federal)*. 2010.312f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2010.
- MEDEIROS, J. D. F. de; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T. *Variabilidade Espacial do Conteúdo de Água no Solo numa Pequena Bacia Rural: 3. Análise da estabilidade Temporal do Padrão Espacial do Conteúdo de Água no Solo*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 53-63, 2007.
- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MI). *Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro*. Brasília. 2005.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). *Agenda 21 brasileira – Bases para discussão*. Brasília, 2000. 196 p.

OLIVEIRA E SILVA, F. E.; PINTO, E. J. A.; LIMA, J. E. S.; NAGHETTINI, M.; PALMIER, L. R.; DAVIS, E. G. *Simulação hidrológica em bacias do médio Jequitinhonha com pequena disponibilidade de informações*. In: II Conferência internacional sobre água em regiões áridas e semiáridas, 2007, Gravata. Anais da II Conferência internacional sobre água em regiões áridas e semiáridas. 2007.

PINTO, E. J. A.; DAVIS, E. G.; LIMA, J. E. S.; CANDIDO, M. O.; SILVA, A. J.; PALMIER, L. R.; NAGHETTINI, M.; MONTE-MOR, R. C. A. *Bacia representativa do semiárido mineiro implantada no médio Jequitinhonha*. In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador. Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 2008.

PILGRIM, D.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological. Science Journal*, v. 33, n. 4, p., 379-400, 1988.

QIU, Y.; FU, B. J.; WANG, J.; CHEN, L. D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, v. 240, p. 243-263, 2001.

ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J.W.; HORNBUCKLE, B.K.; JONES, S.B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, v. 7, p. 358-389, 2008.

SANTOS, T. E. M. *Dinâmica espacial e temporal da umidade do solo em bacia experimental do semiárido*. 2010. 68 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia, Recife - PE. 2010.

VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P. e VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 49, p. 822-827, 1985.

VAN PELT, R. S.; WIERENGA, P. J. Temporal stability of spatially measured soil matric potential probability density function. *Soil Sci. Am. J.*, v. 65, p. 667-677, 2001.

VIANA, A. P. F. *Avaliação das Barragens Subterrâneas do Médio Vale do Jequitinhonha - MG*. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

WESTERN, A. W.; G. BLÖSCHL. On the spatial scaling of soil moisture, *J. Hydrol*, v. 217, p. 203- 224, 1999.

ZHAO, R. J.; ZHUANG, Y. L.; FANG, L. R.; LIU, X. R.; ZHANG, Q.S. *The Xinanjiang Model, Hydrological Forecasting Proceedings*, Oxford Symposium, IAHS. 1980. p. 351-356.

Temporal Stability of Spatial Distribution of Soil Moisture in an Intermittent River in the Semiarid Region of Minas Gerais

ABSTRACT

Understanding the hydrologic behavior of basins depends on the availability of data and maintaining monitoring networks is very costly, especially in the case of measurements of the variables of soil moisture, water pressure in soil, runoff on slopes, solid flow, etc, besides the normally monitored variables of precipitation, evaporation and flow. In semiarid regions the situation is aggravated by the need for continuous measurements to represent infrequent climatic events. This work presents an analysis of the spatial-temporal variability of data from soil moisture monitoring conducted in the representative basin of Teixeira stream, located in the Jequitinhonha River Basin in northeastern Minas Gerais. In this basin, in 2005 began the hydrological monitoring of precipitation, evaporation and flow. In 2009, access tubes were installed to monitor soil moisture. With the data obtained using the technique and the relative difference, it was possible to identify the points that, regardless of time, represent the true mean and extremes of humidity. The analysis can support a range of soil moisture data for use in the hydrologic modeling of this river basin.

Key-words: Soil moisture, semi-arid hydrology, hydrological monitoring.