

## VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE DO SOLO EM UMA BACIA INTERMITENTE NO SEMIÁRIDO DE MINAS GERAIS

*Roberto César de Almeida Monte-Mor<sup>1\*</sup> & Luiz Rafael Palmier<sup>2</sup>*

**Resumo** – O entendimento do comportamento hidrológico da região semiárida brasileira, em geral, e da região semiárida mineira, em particular, é de fundamental importância para mitigar os efeitos de escassez. A carência de dados hidrológicos em pequenas bacias brasileiras gera incertezas que podem comprometer o gerenciamento dos recursos hídricos e a avaliação da disponibilidade hídrica, limitando o seu aproveitamento. Nas bacias de rios intermitentes do semiárido mineiro há limitações para a adequada gestão de recursos hídricos em função da ausência de observações hidrometeorológicas de alta qualidade, dos recursos econômicos relativamente escassos e da ocorrência de variações climáticas. A umidade do solo apresenta-se como variável chave nos processos hidrológicos na superfície terrestre, cujo conhecimento é importante para entender e prever uma amplitude de processos hidrológicos. Neste trabalho foi realizada 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, o que permitiu determinar seus pontos representativos da umidade média, além de seus pontos mais úmidos e mais secos. A análise realizada permitiu obter um conjunto de dados de umidade do solo para ser utilizado na modelagem hidrológica dessa bacia hidrográfica.

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

## SPATIAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE IN A WATERSHED INTERMITTENT IN THE SEMIARID OF MINAS GERAIS

**Abstract** – The understanding of the hydrological behaviour of the Brazilian semiarid region, in general, and of the Minas Gerais semiarid region, in particular, is of fundamental importance to mitigate the effects of water scarcity. The lack of hydrological data of small Brazilian basins generates uncertainties that may affect the management of water resources and the water availability assessment, limiting its uses. In the intermittent basins of the Minas Gerais semiarid area there are few hydrometeorological information and the limitations for a proper water resources management are due to the lack of high quality observations, the relatively scarce economic resources and the infrequent occurrence of climatic events. Soil moisture is presented as a key variable in the hydrological processes in land surface, whose knowledge is important to understand and predict amplitude of hydrological processes. In this work, it was carried out an analysis of spatiotemporal data monitoring soil moisture held in the basin representative stream Teixeira located in Jequitinhonha river basin in northeastern Minas Gerais, which allowed the determination of their representative points considering minimum, average and maximum soil moisture. The analysis allowed to obtain a range of soil moisture data for use in the hydrologic modeling of this river basin.

**Keywords** – Soil moisture, semi-arid hydrology, hydrological monitoring.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, [rmontemor@unifei.edu.br](mailto:rmontemor@unifei.edu.br).

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, [palmier@ehr.ufmg.br](mailto:palmier@ehr.ufmg.br)

## INTRODUÇÃO

No Brasil, em termos gerais, o monitoramento hidrológico é adequado para as grandes bacias. Diante de sua grande extensão territorial, a medição de variáveis hidroclimatológicas em todas as bacias hidrográficas do país é economicamente difícil e fisicamente impraticável, existindo uma grande carência de dados hidrológicos nas pequenas bacias.

As bacias hidrográficas localizadas em áreas de difícil acesso em regiões semiáridas ou as de pequenas áreas de drenagem, geralmente, não contam com uma rede de coleta de informações hidrológicas consistente. 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. De acordo com Pilgrim *et al.* (1988), a falta de dados nessas regiões aumenta as dificuldades e incertezas de estimativas, sendo o principal obstáculo para a utilização de modelos hidrológicos. O maior aprofundamento do conhecimento dos processos hidrológicos dessa região torna-se essencial.

Não se considera que há áreas de clima árido no Brasil. No entanto, tem-se no país uma das maiores regiões semiáridas do mundo, compreendida por grande parte da região Nordeste, além de uma pequena parte da região Sudeste. A região semiárida brasileira não constitui um espaço homogêneo, tampouco desértico ou impróprio à vida. Pelo contrário, essa região apresenta alta diversidade ecológica, possuindo ricos recursos naturais. No semiárido brasileiro a principal característica dos cursos d'água é o caráter intermitente de seus rios.

No semiárido mineiro, especificamente na região do médio Jequitinhonha, não foram encontrados registros de instalação e operação sistemática de bacias representativas. Nessa região, são poucas as informações hidrometeorológicas, principalmente fluviométricas, de bacias de rios intermitentes, dificultando a estimativa de disponibilidades hídricas. Adicionalmente, observa-se que pouco tem se investido em pesquisas para melhorar o conhecimento dos processos hidrológicos nessa região.

O monitoramento contínuo do comportamento hidrológico em bacias representativas ou experimentais, em diferentes escalas, é uma alternativa para o entendimento dos fenômenos hidrológicos. 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.

A umidade do solo apresenta-se como 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. 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.

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 que está sendo enfrentado pela comunidade hidrológica internacional por meio do programa *Prediction in Ungauged Basins*, de iniciativa da *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS).

Em Monte-Mor *et al.* (2012) foi realizado uma análise da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo, com a utilização de dados mensais, em uma das áreas monitoradas na bacia do córrego Teixeira, localizada na região do médio Jequitinhonha, sendo uma bacia com cursos d'água intermitentes. Neste trabalho, é apresentada a mesma análise da variabilidade espacial e temporal com a utilização de dados diários.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A variação espacial da umidade do solo é importante porque afeta a agricultura, o clima, a ecologia e a hidrologia. A umidade exibe um alto grau de variabilidade espacial e temporal, sendo bastante complexa por causa de sua dependência dos múltiplos processos físicos. Existem diversos fatores que podem influenciar a sua distribuição, tais como: uso do solo, declividade, posição do declive e elevação relativa, propriedades do solo, umidade média do solo, precipitação, radiação solar, e outros fatores climatológicos.

O conhecimento dos processos que afetam a disponibilidade de água no solo em paisagens semiáridas é essencial devido à sua forte sensibilidade, às alterações ambientais e porque a capacidade de retenção de água no solo pode ser tomada como um bom indicador de qualidade do solo.

Nas áreas áridas e semiáridas, os processos que influenciam o movimento da água são significativamente afetados pelas mudanças temporais e espaciais da precipitação, vegetação e texturas de solo. E para essas áreas, a variabilidade temporal e espacial da umidade do solo de superfície torna-se de difícil monitoramento, quando são utilizadas as técnicas tradicionais de pesquisa em campo.

A grande variabilidade de solos requer a coleta de muitas amostras de uma área para extrair informação suficiente de umidade do solo, o que é dispendioso em tempo e dinheiro. Buscando solucionar esse problema, Vachaud *et al.* (1985) desenvolveram o conceito de estabilidade temporal como uma ferramenta eficiente na amostragem de uma região pouco instrumentada.

Para Brocca *et al.* (2009), embora muitos autores tenham estudado a variabilidade da umidade do solo utilizando a abordagem aplicada por Vachaud *et al.* (1985) nas mais diversas regiões da Terra a realização de uma comparação direta entre os resultados obtidos não é simples, devido às diferenças observadas tanto na área investigada utilizada no esquema de amostragem quanto no período de dados utilizados (dias, meses, anos).

Joshi *et al.* (2011) observaram que a textura do solo e a topografia são controles significativos que afetam a estabilidade espacial e temporal da umidade do solo. Além dessas variáveis, Heathman *et al.* (2009) sugerem que a atual escala de observação e o número de medições afetam a relação entre a umidade do solo superficial e a média do perfil do solo na análise temporal.

No Brasil, no que se refere à variabilidade da umidade do solo, foram realizados alguns recentes estudos, destacando-se aqueles desenvolvidos por Medeiros *et al.* (2007), Santos (2010) e Monte-Mor *et al.* (2012).

## MATERIAL E MÉTODOS

A bacia do córrego intermitente do Teixeira, cuja área é de aproximadamente 142 km<sup>2</sup>, está localizada na região do médio rio Jequitinhonha, no município de Itinga. 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.

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. A evapotranspiração potencial de Araçuaí, estimada pelo método de Thornthwaite, utilizando as temperaturas médias normais, é de 1321,6 mm.

Entre 2009 a 2012, no estudo desenvolvido por Monte-Mor (2012), a bacia foi instrumentada com estações climatológicas e pluviográficas. Adicionalmente, foram instalados pluviômetros para estimar as perdas por interceptação, poços piezométricos para avaliar o comportamento de águas

subterrâneas, tubos de acesso para medição da umidade do solo e tensiômetros para medição do potencial da água no solo. Com os dados obtidos foi possível analisar os processos hidrológicos na bacia, e calibrar e verificar a aplicabilidade de modelos chuva-vazão.

Na realização do monitoramento da umidade do solo, os pontos de instalação dos tubos de acesso, representativos da bacia foram escolhidos com base em visitas 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 e a partir de outubro de 2011 a frequência passou a ser diária ou a cada quatro dias.

Na Figura 01 e na Tabela 01 são apresentadas as localizações dos pontos de monitoramento do teor de umidade do solo na bacia do Teixeiraão. Informações adicionais sobre as características da bacia e do monitoramento realizado podem ser obtidas em Monte-Mor *et al.* (2012).

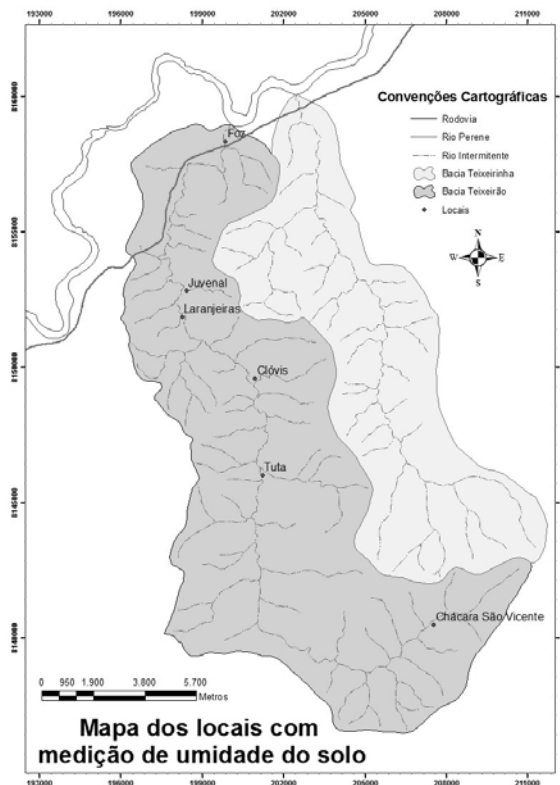


Figura 01 - Mapa dos locais com medição de umidade do solo

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

Para avaliar a estabilidade temporal dos dados de umidade do solo monitorados em campo, foi utilizada a metodologia apresentada por Vachaud *et al.* (1985). Essa metodologia foi utilizada por Monte-Mor *et al.* (2012) na bacia do córrego Teixeira com dados mensais de umidade do solo.

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 ( $\theta$ ), a estabilidade temporal sugere que o padrão de variabilidade espacial não muda no tempo quando o indivíduo  $\theta$  é classificado de acordo com sua magnitude, ou quando ponderado em relação ao valor médio para a área em estudo (Van Pelt & Wierenga, 2001).

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.

Neste trabalho, serão analisados somente 6 pontos monitorados na bacia do córrego Teixeira, localizados em Fazenda Laranjeiras, considerando medições mensais e diárias. 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, 2010/2011 e 2011/2012.

## RESULTADOS

Na Figura 02 apresenta-se a umidade do solo total em cada ponto monitorado na Fazenda Laranjeiras.

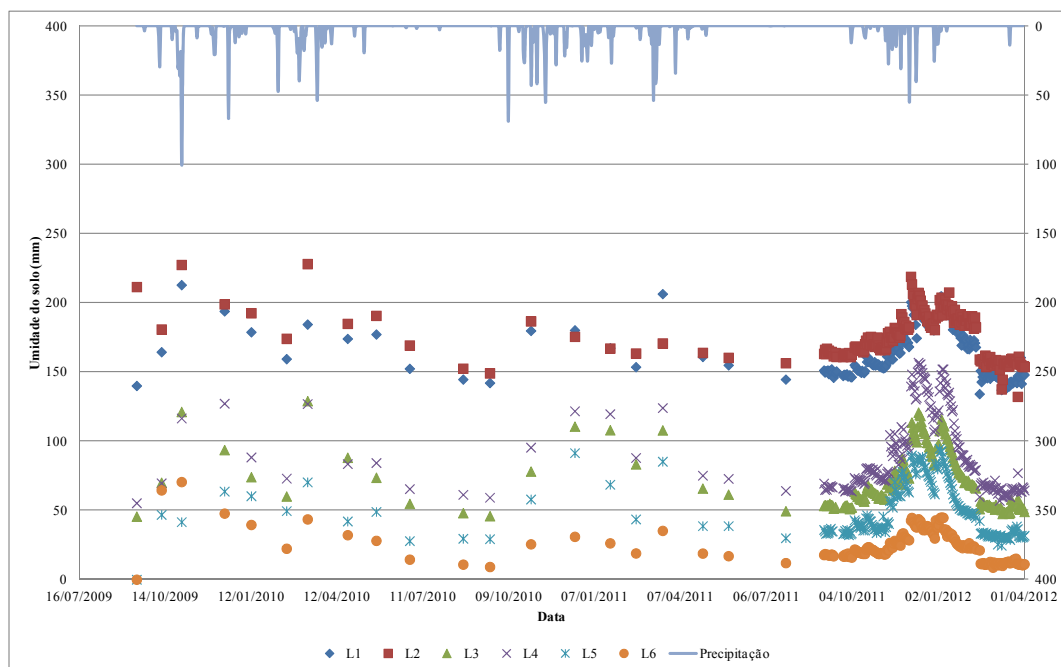


Figura 02 - Umidade do solo nos pontos monitorados na Fazenda Laranjeiras

Na Tabela 02 apresenta-se uma análise estatística da variação temporal dos valores da umidade do solo monitorados em Fazenda Laranjeiras. Os valores da umidade do solo obtidos em dezembro de 2010 e janeiro de 2011 foram retirados da análise realizada.

Ao se analisar a diferença relativa ( $\delta$ ), de acordo com a metodologia proposta por Vachaud *et al.* (1985), infere-se que os pontos L1 e L2 são os mais úmidos, pois possuem os maiores valores positivos. Já os pontos L5 e L6 são os mais secos, pois possuem os maiores valores negativos.

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

Prof.	Ponto	$\Delta$	$\sigma(\delta)$	Prof.	Ponto	$\delta$	$\sigma(\delta)$
100	L1	49%	28%	400	L1	97%	26%
	L2	20%	24%		L2	86%	24%
	L3	13%	11%		L3	-35%	12%
	L4	1%	15%		L4	16%	17%
	L5	-29%	23%		L5	-72%	16%
	L6	-59%	17%		L6	-82%	8%
200	L1	83%	31%	600	L1	81%	13%
	L2	15%	18%		L2	158%	24%
	L3	24%	11%		L3	-74%	8%
	L4	24%	19%		L4	-43%	7%
	L5	-49%	27%		L5	-23%	16%
	L6	-89%	9%		L6	-17%	1%
300	L1	98%	31%	1000	L1	65%	10%
	L2	42%	22%		L2	96%	17%
	L3	14%	10%		L3	-34%	9%
	L4	16%	18%		L4	-16%	9%
	L5	-77%	20%		L5	-54%	7%
	L6	-83%	11%		L6	-55%	9%

Os menores valores de desvio padrão nas camadas analisadas foram observados no ponto L4. 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, obtidos utilizando a equação 6, entre duas datas consecutivas  $j$  e  $j'$  para cada profundidade.

Tabela 03 - Valores do coeficiente de Spearman

Prof.	Mín.	Máx.	Prof.	Mín.	Máx.
100	0,992	1	400	0,998	1
200	0,998	1	600	0,998	1
300	0,998	1	1000	0,999	1

Observou-se no cálculo do coeficiente de Spearman que a maioria dos valores obtidos está próxima de 1. De acordo com a metodologia de Vachaud *et al.* (1985), existe estabilidade temporal para os dados monitorados em Fazenda Laranjeiras. Na Tabela 04 apresenta-se a variação do volume de água armazenado nos pontos analisados durante os anos hidrológicos de 2009/2010, 2010/2011 e no período de out/2011 a abr/2012.

Tabela 04 - Variação do volume de água armazenado na Fazenda Laranjeiras

Ponto	$\Delta W$ (mm)			Ponto	$\Delta W$ (mm)		
	09/10	10/11	11/12		09/10	10/11	11/12
L1	8,3	13,1	-6,2	L4	1,9	14,1	6,7
L2	-3,5	18,9	-46,7	L5	-38,5	9,7	-7,5
L3	8	8	-2,2	L6	3,2	8,6	-8,1

Nota-se na Tabela 04 que no ano hidrológico 2009/2010, a variação do volume de água armazenada no solo foi positiva nos pontos L1, L3, L4 e L6 e negativa nos pontos L2 e L5. Já no ano 2010/2011, a variação do volume armazenado de água foi positiva em todos os pontos. Para o período de 2011/2012, a variação é negativa, exceto no ponto L4. Para o último período não foram incorporados os dados do período de estiagem. Nesse caso, a variação do volume de água armazenado na bacia deverá ser ainda mais crítica nesses pontos monitorados.

As variações observadas no comportamento da umidade armazenada no solo no ponto L2 foram devidas às alterações que ocorreram no uso e ocupação do solo. Essas alterações podem ter acarretado modificações nas propriedades físicas do solo na área e, nesse caso, uma análise com uma quantidade maior de dados é necessária para avaliar a variação do volume de água no ponto. Como o ponto L5 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. Observou-se que a amplitude de variação dos dados foi maior quando foram utilizados dados mensais.

Analisando a Tabela 04 percebe-se que o ponto L2 apresenta a maior variação de volume armazenado, com valores oscilando de -46,7 a 18,9 mm. Nota-se, ainda, que os pontos L1 e L2, por estarem em locais com declividades mais elevadas, apresentam maiores valores de volume armazenado ao longo do período monitorado.

Os componentes obtidos do balanço hídrico – precipitação e deflúvio com base em valores observados e evapotranspiração real calculada – para a bacia do córrego Teixeira são apresentados na Tabela 05 para os anos hidrológicos de 2009/2010 e 2010/2011. Para o período de 2011/2012 o balanço não foi calculado porque os dados da estação fluviométrica no período não foram coletados.

Tabela 05 - Balanço Hídrico no córrego Teixeira

Ano	P (mm)	DE (mm)	P-DE (mm)	ETo Clóvis (mm)	ETo Laranjeiras (mm)
09/10	797,96	50,26	747,70	1017,21	1005,89
10/11	781,44	29,06	752,38	1039,48	1059,87

Os valores de evapotranspiração real (P - DE) estimados são de aproximadamente 750 mm nos anos hidrológicos analisados, entre 71% e 78% dos valores da ETo calculadas na Barragem do Clóvis e na Fazenda Laranjeiras.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta-se como a primeira experiência de monitoramento de processos hidrológicos em bacias com cursos d'água intermitentes localizadas no semiárido mineiro. O monitoramento da umidade do solo foi efetuado tendo como objetivo a melhor compreensão do comportamento da umidade do solo em uma bacia localizada no semiárido mineiro. Observou-se que a realização do monitoramento diário permitiu uma melhor compreensão da variabilidade temporal da umidade do solo na região, quando comparados com os resultados obtidos por Monte-Mor *et al.* (2012).

Neste trabalho foram avaliadas a pertinência 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. Os resultados obtidos mostram a existência da estabilidade espacial e temporal para a umidade do solo. Com os resultados obtidos foi possível identificar que o ponto L4 representa a umidade média da área estudada, e que os pontos L1 e L2 são os mais úmidos e os pontos L5 e L6 os mais secos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do projeto Estudos dos Processos Hidrológicos em Bacias Representativas do Cerrado e Semi-Árido Mineiro. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento, através do Fundo Setorial de Recursos Hídricos, 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; à Agência Nacional de Águas, pelo financiamento da operação de algumas estações; e, finalmente, à FAPEMIG pelo apoio constante concedido para a participação em simpósios e congressos.

## REFERÊNCIAS

- BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. (2009). Soil moisture temporal stability over experimental areas of Central Italy. *Geoderma* 148 (3–4), 364–374.
- FAMIGLIETTI, J. S.; RYU, D.; BERG, A. A.; RODELL, M.; JACKSON, T. J. (2008). Field observations of soil moisture variability across scales, *Water Resour. Res.*, 44, W01423.
- JOSHI, C., MOHANTY, B.P., JACOBS, J.M., INES, A.V.M. (2011). Spatiotemporal analyses of soil moisture from point to footprint scale in two different hydroclimatic regions. *Water Resour. Res.* 47, W01508.
- HEATHMAN, G.C., LAROSE, M., COSH, M.H., BINDLISH, R., (2009). Surface and profile soil moisture spatial analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains. *Catena* 78, 159–169.
- PILGRIM, D.H.; CHAPMAN, T.G. & DORAN, D.G. (1988). Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Science Journal*, 33(4), 379-400. 1988.
- MEDEIROS, J. D. F. de; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T. (2007). 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.
- MONTE-MOR. (2012). Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro. *Tese de doutorado*. Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, UFMG.
- MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R.; PINTO, E. J. A.; LIMA, J. E. S. (2012). Estabilidade Temporal da Distribuição Espacial da Umidade do Solo em uma Bacia Intermitente no Semiárido de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 101-113.
- SANTOS, T. E. M. (2010) 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.
- VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P. & VAUCLIN, M. (1985). Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:822-827.
- VAN PELT, R.S. & WIERENGA, P. J. (2001) Temporal Stability of Spatially Measured Soil Matric Potential Probability Density Function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, VOL. 65.