



**RAFAEL HENRIQUE VILAÇA E SILVA**

**COMPORTAMENTO ESPACIAL E TEMPORAL DA  
UMIDADE DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA  
REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS**

**LAVRAS - MG**

**2018**

**RAFAEL HENRIQUE VILAÇA E SILVA**

**COMPORTAMENTO ESPACIAL E TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO EM  
UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

**Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola - UFLA**  
**Orientador**

**LAVRAS – MG**

**2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Rafael Henrique Vilaça e.

Comportamento espacial e temporal da umidade do solo em  
uma bacia hidrográfica da região sul de Minas Gerais / Rafael  
Henrique Vilaça e Silva. - 2018.

97 p. : il.

Orientador(a): Marcelo Ribeiro Viola.

.  
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Variabilidade espacial. 2. Caracterização Físico-Hídrica. 3.  
Atributos do Solo. I. Viola, Marcelo Ribeiro. . II. Título.

**RAFAEL HENRIQUE VILAÇA E SILVA**

**COMPORTAMENTO ESPACIAL E TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO EM  
UMA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 09 de março de 2018

Dr. Marcelo Ribeiro Viola

Dr. Carlos Rogério de Mello

Dr. José Alves Junqueira Júnior

**Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola - UFLA**

**Orientador**

**LAVRAS – MG**

**2018**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela oportunidade, estrutura e suporte.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao orientador Dr. Marcelo Ribeiro Viola, pelos ensinamentos, convivência, amizade e constante orientação e suporte em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico administrativo Renato Antônio da Silva por acompanhar-me nas atividades de campo desde o primeiro dia de trabalho e pela amizade.

A todos os alunos de iniciação científica e estagiários que contribuíram com as atividades de campo e laboratório. O trabalho em equipe é essencial para o desenvolvimento de um bom trabalho.

Aos membros da banca pela disponibilidade e interesse em contribuir para o melhoramento deste trabalho.

Aos meus pais, João Bosco e Maria José, por acreditarem em mim, mesmo quando eu mesmo não acreditava. Por todas as orações, pois foram muitas! Por todo o suporte concedido e por torcerem por mim sempre.

A minha querida namorada Caroline, por estar do meu lado durante esse período de estudos. Por aliviar o meu stress e ser meu refugio de calma, amor e carinho.

Aos amigos estudantes da pós-graduação que são grandes guerreiros e que mesmo passando por suas próprias dificuldades encontram uma forma de ajudar o próximo.

Aos professores e funcionários do núcleo didático-científico de Engenharia de Água e Solo da UFLA, pela amizade e convívio durante estes anos.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO GERAL

A estruturação de modelos hidrológicos conceituais é altamente dependente de estudos sobre atributos físico-hídricos do solo na escala de bacias hidrográficas. O presente estudo foi desenvolvido em uma pequena bacia hidrográfica, com área de 14 ha, localizada no campus da Universidade Federal de Lavras. Nesta ocorrem Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos e o uso do solo é caracterizado por cultura anual (milho), cultura perene (café) e floresta estacional semidecidual montana (FESM). A dissertação encontra-se estruturada em dois capítulos. No primeiro, avaliou-se a continuidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm, e posterior mapeamento por krigagem ordinária. Especificamente, foram avaliados: densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), porosidade total (P), macroporosidade (Map), microporosidade (Mip), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), matéria orgânica (MO), condutividade hidráulica saturada (k) e porcentual das frações areia, silte e argila. No segundo capítulo foi realizado o estudo da estrutura de dependência espacial da umidade do solo durante o ano hidrológico de 2016/2017, nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm. Também foi avaliada a estabilidade temporal da umidade do solo a partir de três metodologias: diferença relativa, indicador de estabilidade temporal (TSIij) e o teste não paramétrico de Spearman. A análise variográfica mostrou que a maioria dos atributos estudados apresentou estrutura de dependência espacial. A umidade do solo apresentou forte estrutura de dependência espacial ao longo do período de monitoramento. A interpretação dos mapas mostrou relação entre os atributos físico-hídricos, classes de solo, uso do solo e relevo. A área de FESM apresentou os menores valores de  $D_s$  na bacia, e os maiores valores de MO, P, Map e k, sendo interpretada como uma área propícia para a ocorrência do processo de recarga. Entretanto, nas áreas destinadas às culturas anual e perene foram observados maiores valores de  $D_s$  e Mip, e os menores de MO, P, Map e k, possibilitando inferir sobre uma maior dificuldade para a movimentação de água no solo, quando comparado à área de FESM. No que concerne à variação temporal da umidade do solo, verificou-se que esta apresenta relação direta com o regime de chuvas. As áreas de menor umidade na bacia tenderam a se concentrar na região de ocorrência de Cambissolo Háptico e Gleissolo Háptico, e que têm predominantemente FESM como o uso do solo. Já as áreas de maiores valores de umidade se concentraram na região de Latossolos, nas quais o uso do solo é constituído por cultura anual. Foi verificada a estabilidade temporal da umidade do solo em profundidade, sendo esta maior nas camadas superficiais (10 cm e 20 cm), quando comparada às demais (30 cm e 40 cm). Foi possível realizar a identificação de pontos amostrais representativos do comportamento temporal da umidade do solo na bacia, estando estes localizados na área de FESM e em sua maioria em Argissolos. Constata-se que a FESM propicia alterações nos atributos físico-hídricos no solo, que favorecem a movimentação de água no solo, sendo importante para processos hidrológicos, sobretudo, para recarga subterrânea, muito embora esta seja a área que permaneceu com menor umidade ao longo do período, quando comparada aos demais usos presentes na bacia.

**Palavras-chave:** Variabilidade espacial. Bacias hidrográficas. Atributos do solo. Umidade do solo. Caracterização físico-hídrica.

## GENERAL ABSTRACT

The structure of conceptual hydrological models is highly dependent on studies of soil physical-hydric attributes at a watershed scale. The present study was developed in a small watershed of 14 ha of area, which is located at the campus of the Federal University of Lavras. In this watershed, there are Latosols, Argisols, Cambisols and Gleissol as pedological unit, and the land uses are annual (corn) and perennial (coffee) crops, and Tropical Mountain Semideciduous Forest (FESM). This dissertation is structured in two chapters. In the first one, it was evaluated the spatial continuity of the physical-water attributes of the soil in the depths of 10, 20, 30 and 40 cm, and later mapping by ordinary kriging. Specifically, it was evaluated: soil bulk density ( $D_s$ ), particle density ( $D_p$ ), total porosity (P), macroporosity ( $M_{ap}$ ), microporosity ( $M_{ip}$ ), soil moisture at the permanent wilting point ( $\theta_{PMP}$ ), organic matter (OM), saturated hydraulic conductivity (k) and percentage of sand, silt and clay fractions. In the second chapter, soil moisture spatial dependence structure at depths of 10, 20, 30 and 40 cm was studied during the hydrological year 2016/2017, Temporal stability was also evaluated from three methodologies, being mean relative difference, time stability indicator (TSI<sub>ij</sub>) and nonparametric Spearman test. Variographic analysis showed that the majority of the studied attributes presented spatial dependence structure. Yet, soil moisture presented a strong spatial dependence structure during the monitoring period. The interpretation of the maps showed the relationship between soil physical-hydric attributes, soil classes, land use and relief. The FESM area showed the lowest values of  $D_s$  in the watershed, and the highest values of MO, P,  $M_{ap}$  and k, being interpreted as a propitious area for the occurrence of soil recharge process. However, in the areas destined to the annual and perennial crops, the highest values of  $D_s$  and  $M_{ip}$ , and the shortest ones for MO, P,  $M_{ap}$  and k were observed. So it was possible to verify in these land uses a greater difficulty for water movement in the soil, when compared to the FESM area. Regarding the temporal variation of soil moisture, it was verified, that it is directly related to the rainfall regime. The areas of lower soil moisture in the watershed tended to be placed at the region of occurrence of Haplic Cambisol and Haplic Gleisol, which predominantly has FESM as the land use. However the areas of higher values of soil moisture were concentrated in the region of Latosols, in which the land use is annual crop. Soil moisture temporal stability in depth was verified. It was greater in the superficial layers (10 cm and 20 cm), than the others (30 cm and 40 cm). It was possible to identify representative points of the temporal behavior of the soil moisture in the watershed. They were all located in the FESM area and mostly in Argisols. It is observed that the FESM favors soil physical-hydric attributes, which favors a water movement in soil, being important for hydrological processes, especially for underground recharge, although this is an area with permanence of lower humidity throughout the period, when compared to the other land uses in the watershed.

**Keywords:** Spatial Variability. Watershed. Soil Attributes. Soil Moisture. Physico-hydric Characterization.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

- Figura 1** – Localização da área de estudos com evidência para os pontos de amostragem de solo..... 37
- Figura 2** – A) Modelo Digital de Elevação B) Declividade C) Unidades Pedológicas da bacia D) Mapa de uso do solo da bacia..... 39
- Figura 3** – Semivariogramas dos atributos físico-hídricos do solo para as profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm do solo..... 47
- Figura 4** – Mapas dos atributos físico-hídricos do solo para as profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm..... 49

### CAPÍTULO 3

- Figura 1** – Localização da área de estudo com destaque para os pontos de monitoramento de umidade do solo..... 63
- Figura 2** – Médias mensais de precipitação e temperatura segundo as Normais Climatológicas para Lavras no período de 1961-1990..... 64
- Figura 3** – A) Modelo Digital de Elevação B) Declividade C) Unidades Pedológicas D) Mapa de uso do solo da bacia..... 66
- Figura 4** – Equações de calibração para as sondas de capacitância nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm para a bacia hidrográfica em estudo ..... 67
- Figura 5** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 10 cm ..... 73
- Figura 6** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 20 cm ..... 74
- Figura 7** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 30 cm..... 75
- Figura 8** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 40 cm..... 76
- Figura 9**– Precipitação e evapotranspiração de referência para a bacia hidrográfica estudada no período de outubro de 2016 a setembro de 2017..... 77
- Figura 10** – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 10 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017..... 79

<b>Figura 11</b> – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 20 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.....	80
<b>Figura 12</b> – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 30 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.....	81
<b>Figura 13</b> – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 40 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.....	82
<b>Figura 14</b> – Médias por camada de solo das estatísticas de estabilidade temporal (desvio padrão das diferenças relativas ( $\sigma(\delta_i)$ ) e indicador de estabilidade temporal (TSI)) para o perfil de umidade do solo no ano hidrológico de 2016/2017 (A) e distribuição do coeficiente de correlação médio de Spearman ( $\bar{r}_s$ ) (B).....	86
<b>Figura 15</b> – Diferenças relativas médias, desvio padrão e TSI da umidade para as profundidades 10 cm (a), 20 cm (b), 30 cm (c) e 40 cm (d) e a localização dos respectivos pontos representativos selecionados na área (primeiro e segundo pontos mais estáveis).....	90

## LISTA DE SIMBOLOS

CX	Cambissolo Háplico
$D_p$	Densidade de Partículas
$D_s$	Densidade do Solo
EMR	Erro Médio Reduzido
EPM	Erro Percentual Médio
FESM	Floresta Estacional Semidecidual Montana
GD	Grau de Dependência Espacial
GX	Gleissolo Háplico
IQD	Inverso do Quadrado da Distância
k	Condutividade Hidraulica saturada
LA	Latossolo Amarelo
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo
Map	Macroporosidade
Mip	Microporosidade
MO	Matéria Orgânica
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
P	Porosidade Total
PA	Argissolo Amarelo
PV	Argissolo Vermelho
PVA	Argissolo Vermelho – Amarelo
SER	Desvio Padrão do Erro Reduzido
$\theta_{PMP}$	Umidade no Ponto de Murcha Permanente

## LISTA DE SIGLAS

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UPGRH GD1	Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Alto Rio Grande

## LISTA DE TABELAS

### CAPITULO 2

<b>Tabela 1</b> – Parâmetros dos semivariogramas dos atributos físico-hídricos do solo ajustados pelo modelo exponencial pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP).....	46
--	----

### CAPITULO 3

<b>Tabela 1</b> – Parâmetros de ajuste do modelo de semivariograma exponencial e respectivos graus de dependência espacial, Erro Médio Reduzido (EMR), Desvio Padrão dos Erros Reduzidos (SER) e Erro Percentual Médio (EPM).....	72
---	----

<b>Tabela 2</b> – Coeficiente de correlação de Spearman ( $r_s$ ) e estatísticas do teste de Spearman (T) nos diferentes meses de monitoramento para o ano hidrológico 2016/2017 para as profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm.....	88
--	----

<b>Tabela 3</b> – Validação dos dados apontados como representativos da umidade do solo nos diferentes meses de monitoramento para o ano hidrológico 2016/2017 para as profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm.....	92
--	----

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	13
INTRODUÇÃO GERAL .....	13
INTRODUÇÃO .....	13
REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo .....	15
Continuidade espacial e estabilidade temporal da umidade do solo .....	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23
CAPÍTULO 2 .....	31
CONTINUIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS.....	31
RESUMO .....	31
ABSTRACT.....	33
INTRODUÇÃO .....	34
MATERIAL E MÉTODOS .....	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
Análise da semivariância.....	44
Mapeamento dos atributos físico-hídricos .....	48
CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
CAPÍTULO 3 .....	58
CONTINUIDADE ESPACIAL E ESTABILIDADE TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS .....	58
RESUMO .....	58
ABSTRACT.....	60
INTRODUÇÃO .....	61
MATERIAL E MÉTODOS .....	62
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	70
Análise da semivariância.....	70
Mapeamento da umidade do solo.....	77
Estabilidade Temporal da Umidade do Solo.....	85
Posição padrão para o monitoramento da umidade no perfil do solo.....	88
CONCLUSÕES.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO GERAL

#### INTRODUÇÃO

No contexto da heterogênea distribuição espacial da água e escassez de recursos hídricos no país, sobretudo na crise hídrica recente, o estudo propõe o entendimento e espacialização de atributos físico-hídricos e da umidade do solo em uma pequena bacia hidrográfica da região sul de Minas Gerais. Conceituando-se a bacia hidrográfica como a unidade territorial na qual se processa o ciclo hidrológico de superfície, o entendimento da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos associados a diferentes usos do solo, unidades pedológicas e classes de relevo pode subsidiar o entendimento dos processos hidrológicos em distintos ambientes fisiográficos.

De acordo com Gomes et al. (2012), em um adequado manejo, o solo tem uma posição de destaque, pois é o agente responsável pelo processamento da água na bacia. Destaca-se ainda, segundo Ávila et al. (2011), o expressivo papel da umidade do solo sobre os processos hidrológicos, sobretudo na produção dos escoamentos. Nesse contexto, o estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos e também da estabilidade temporal da umidade do solo é essencial para a caracterização hidrológica dos distintos ambientes presentes na bacia, assim caracterizando suas respostas hidrológicas. Além disso, através do mapeamento da umidade do solo no decorrer do ano hidrológico é possível identificar o seu padrão de variabilidade espacial. As informações de umidade associadas aos usos do solo, classes de solo, relevo e características físico-hídricas podem contribuir para o entendimento dos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, sobretudo os processos de armazenamento, infiltração de água, escoamento e recarga subterrânea. Sendo este estudo, fundamental para a elaboração de medidas que visem o manejo adequado do solo e dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica e otimização do monitoramento hidrológico.

O teor de água no solo é um parâmetro extremamente variável, principalmente com o tempo, influenciado pelas chuvas, irrigações, drenagem, evaporação e demais práticas de manejo da cultura (SOUZA et al., 2016). Segundo Qiu et al. (2001), a evolução espacial e temporal da umidade do solo é controlada por vários fatores, tais como: uso do solo, declividade, topografia, propriedades do solo, precipitação, radiação solar e outros fatores climatológicos. De acordo com Ávila et al. (2011), a umidade do solo é importante nos

processos de infiltração, transporte de sedimentos, interação entre solo e atmosfera por meio da evapotranspiração, nos processos associados à erosão hídrica, e sendo assim importante para o manejo e conservação do solo. Lima e Silva (2012) ressaltam que o conhecimento do regime de variação da umidade no solo fornece informações essenciais para a análise e a solução de problemas de manejo de irrigação, escolha da época de plantio, determinação do consumo de água pelas plantas, estudo dos processos de transferência de água, calor e nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera, e planejamento dos sistemas de drenagem.

O estudo do padrão de estabilidade temporal de pontos de monitoramento da umidade do solo em uma bacia hidrográfica permite a identificação de pontos representativos da área, possibilitando a redução dos custos de monitoramento (GAO e SHAO, 2012). Hu et al. (2010) afirmaram que a maioria dos estudos relacionados à análise da estabilidade temporal da umidade do solo tem focado na camada superficial, ao passo que poucos estudos avaliam o perfil do solo, devido à dificuldade em monitorar a umidade do solo em profundidades e em vários pontos no espaço, sobretudo na escala de bacias hidrográficas.

Atualmente, estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo possibilitam análises que dão suporte na tomada de decisões e resoluções de problemáticas relacionadas com o uso do solo (LIMA et al., 2015). O estudo da dependência espacial possibilita que parâmetros necessários para estimar valores de atributos do solo em locais não amostrados sejam determinados (LIMA et al., 2014). Nesse contexto, o uso de técnicas geoestatísticas permite modelar e descrever a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo e da umidade solo, possibilitando a construção de mapas que possibilitam um melhor entendimento das relações entre estes atributos e associando-os a outros fatores como unidade pedológica e múltiplos usos do solo. Apesar de serem encontradas muitas pesquisas que utilizaram a geoestatística para o estudo da variabilidade espacial e mapeamento de atributos do solo (SANTOS et al., 2013), estes são escassos principalmente quando se trata da análise em diferentes profundidades do solo (JUNQUEIRA JUNIOR et al., 2017), e quando se relaciona estes a usos múltiplos do solo, classes de solo e de relevo.

A área de estudo consiste de uma pequena bacia hidrográfica localizada no campus da Universidade Federal de Lavras, região sul de Minas Gerais. A bacia em estudo faz parte do conjunto de tributários do Ribeirão Vermelho, que desagua no Rio Grande, MG. Observa-se predominância de relevo suave ondulado e ondulado na bacia, e a predominância de Argissolos e Latossolos, mas ressalta-se a ocorrência de Gleissolos e Cambissolos na área. Quanto aos usos do solo, observa-se a presença de culturas anual (milho) e perene (café), e

uma área de floresta estacional semidecidual montana (FESM). A bacia está inserida na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH GD1). Na UPGRH GD1, 67% das terras são destinadas a usos antrópicos, envolvendo cultivos agrícolas e pastagens (IGAM, 2014). Os solos da UPGRH GD1 são compostos principalmente pelos Cambissolos (74%), seguido dos Latossolos Vermelho-Amarelo (11%). O relevo predominante é ondulado, com declividade variando entre 8% e 20%, e salienta-se a ocorrência de solos argilosos associados a substrato rochoso de baixa permeabilidade (IGAM, 2014). Assim, o desenvolvimento de estudos sobre a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em bacias hidrográficas desta região é importante para um melhor entendimento do comportamento hidrológico típico dos distintos ambientes existentes. Há de se salientar que de acordo com Oliveira-Filho et al. (1994), na bacia do rio Grande, no sul de Minas Gerais e Triângulo Mineiro, as florestas foram drasticamente reduzidas, uma vez que sua ocorrência coincide com os solos mais visados pela agropecuária (MEYER et al., 2015). Sendo assim, estudos sobre a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo, da umidade do solo, e da estabilidade temporal da umidade do solo em profundidade em bacias hidrográficas desta região é importante para um melhor entendimento do comportamento hidrológico típico dos distintos ambientes. A dissertação foi estruturada em dois capítulos. No primeiro, objetivou-se avaliar o modelo exponencial de semivariograma ajustado pelo método dos mínimos quadrados ponderados (MQP) para a modelagem da continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm, e posterior mapeamento por krigagem ordinária. No segundo capítulo foi realizado o estudo da estrutura de dependência espacial da umidade do solo durante o ano hidrológico de 2016/2017, nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm. Também foi avaliada a estabilidade temporal da umidade do solo a partir de três metodologias: diferença média relativa, indicador de estabilidade temporal (TSI) e o teste não paramétrico de Spearman.

## **REFERENCIAL TEÓRICO**

### **Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo**

Para fins hidrológicos, o solo pode ser considerado o principal meio de transporte e armazenamento de água (LIMA; SILVA, 2012). Destaca-se, na movimentação da água no solo a condutividade hidráulica saturada ( $k$ ), que indica a capacidade de transmissão de água do meio poroso saturado (REICHARDT, 1990). Este atributo hidrológico é indispensável

para modelagens chuva-vazão, dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem, transporte de solutos no solo, recarga de aquíferos, escoamento superficial e transporte de sedimentos (ALVARENGA et al., 2011). O valor de  $k$  é função do tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Pelo fato da condutividade hidráulica saturada depender em grande parte da forma e continuidade do sistema poroso, esta varia fortemente ao longo do espaço (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). De acordo com Almeida et al. (2017) as práticas culturais adotadas alteram a estrutura do solo e, portanto, influenciam diretamente os valores de  $k$ .

A densidade do solo ( $D_s$ ) é uma propriedade indicadora da qualidade estrutural do solo por influenciar outras propriedades como infiltração e retenção de água, e também, o crescimento radicular. Conhecer seu valor é fundamental para a definição de práticas adequadas de manejo do solo (PÁDUA et al., 2015). Em solos sob vegetação nativa a densidade do solo geralmente apresenta alterações naturais, decorrentes das diferenças na estrutura do solo, principalmente da macro e microporosidade, que são função da textura, do teor de carbono orgânico do solo e de sua mineralogia (FERREIRA, 2010). A  $D_s$  possui relação direta com atributos do solo como a textura, porosidade, teor de matéria orgânica, permeabilidade e condutividade hidráulica (BASSO et al., 2011). O aumento da  $D_s$  ocasiona a diminuição da porosidade total, da macroporosidade e da condutividade hidráulica (FERREIRA et al., 2010 B).

O preparo do solo e o tráfego de máquinas em condições de umidade inadequadas provocam deformações plásticas neste. Podem ainda formar zonas de compactação ao longo do seu perfil, reduzindo sua qualidade física, em razão da redução da macroporosidade. Isso dificulta as trocas gasosas do solo com a atmosfera externa e provoca o confinamento do sistema radicular (ORTIGARA et al., 2014). Lima et al. (2013) consideram que um dos principais agentes causadores da degradação do solo é a compactação, que provoca restrições para o desenvolvimento radicular das plantas. A compactação do solo causa, principalmente, modificações nas condições de infiltração, as quais são essenciais para a garantia de recarga dos aquíferos (GASPAR et al., 2007). De acordo com Pinto et al. (2018), a falta de gerenciamento adequado em áreas de pastagem provoca crostas na superfície, o que reduz o volume dos macroporos. A menor macroporosidade dos solos sob pastagem em comparação a áreas sob florestas pode ser atribuída à compactação da camada superficial do solo devido ao pisoteio animal (CELIK, 2005) e à falta de um sistema adequado de gestão da conservação do solo.

A matéria orgânica do solo provém, em quase sua totalidade, de resíduos vegetais (GOMES et al, 2015). O carbono armazenado no solo encontra-se, sobretudo na forma de compostos orgânicos constituídos por resíduos frescos ou em diferentes estádios de decomposição, compostos humificados e materiais carbonizados associados ou não à fração mineral, bem como uma porção viva, composta por raízes e por micro, meso e macrofauna (ROSCOE; MACHADO, 2002; SIGNOR et al., 2014). O teor de matéria orgânica do solo é alterado pelo manejo adotado e, portanto, a matéria orgânica é um indicador da qualidade do solo. Em solos sob vegetação natural, o carbono orgânico encontra-se em equilíbrio dinâmico, com teores praticamente constantes ao longo do tempo. Com a implantação dos agroecossistemas ocorre alteração nas taxas de adição e perdas efetivas de matéria orgânica e, um novo equilíbrio é atingido de acordo com as características do sistema de manejo adotado (MACHADO et al., 2014). De acordo com Junqueira Júnior. et al. (2017), o maior conteúdo de matéria orgânica, juntamente com cobertura superficial do solo pela serapilheira torna o ambiente mais estável e conserva a umidade do solo com menores oscilações ao longo do ano. Segundo Gomes et al. (2015) um dos atributos afetados pela matéria orgânica é a densidade do solo. O autor afirma que quanto maior o número de poros (macroporos) o solo apresentar, menor será sua densidade. A matéria orgânica tem o poder de flocular o solo, abrir espaços e, evitar a compactação, sendo assim, ocorre a diminuição da massa de solo em relação ao volume (GOMES et al., 2015). De acordo com Bertoni e Lombardi Netto (1993), a matéria orgânica é eficiente para manter os agregados do solo, preservando sua porosidade. Sendo assim, os solos sob floresta apresentam grande porosidade e continuidade dos poros, principalmente, macroporosidade, a qual é proporcionada por raízes mortas e cavidades de animais. Os macroporos são importantes por facilitar a infiltração e a recarga da água, principalmente em solos argilosos, que poderiam ser pouco permeáveis. Portanto, a capacidade de infiltração, normalmente, é muito mais evidente em áreas sob florestas (CHENG; LIN; LU, 2002; SYLVAIN et al., 2015, JUNQUEIRA et al., 2017).

A determinação da densidade de partículas do solo ( $D_p$ ) possui grande relevância como indicativa da composição mineralógica, cálculo da velocidade de sedimentação de partículas em líquidos e determinação indireta da porosidade (FORSYTHE, 1975). De acordo com Santos et al. (2009), a  $D_p$  é um atributo estável, não sujeita às variações devido ao manejo e que mesmo em profundidade, não se espera grandes variações para este atributo do solo, mesmo considerando o maior aporte de matéria orgânica na camada superficial (0,0 - 20,0 cm) em relação à profundidade de 20,0 - 40,0 cm. Segundo Doran e Parkin (1994),

atributos como a textura do solo, mineralogia, densidade de partículas e cor, podem ser considerados permanentes, inerentes às propriedades de cada solo e que servem para classificá-los pedologicamente. Gonçalves (1997), em estudo sobre o mapeamento da densidade de partículas e da porosidade total, adotando uma malha amostral de 20 x 20m, verificou que estes atributos não apresentaram dependência espacial.

A distribuição das frações granulométricas (argila, areia e silte) é relacionada aos índices topográficos e gradiente de declividade (LEÃO et al., 2010; LEÃO et al., 2011). A variação espacial das características de textura do solo é dependente de fatores como o ambiente de deposição de sedimentos, da vegetação, do relevo que regula o tempo de exposição dos materiais à ação do intemperismo (YOUNG; HAMMER, 2000) e principalmente do material de origem (CUNHA et al., 2005). Conhecer a textura do solo é importante para a classificação taxonômica do solo e também para entender os processos pedogenéticos que atuam no terreno, visto que as geformas da paisagem afetam o controle do movimento de água e os atributos do solo (CAMPOS et al., 2007). A textura influencia na porosidade e na capacidade de retenção de água pelo solo. Mudanças na capacidade de retenção de água influenciam nas condições de umidade do solo (RINALDI et al., 2014). De acordo com Lima et al. (2014), a capacidade de armazenamento de água no solo tem intensa relação com as frações granulométricas.

Segundo Reichardt (1986) e Souza et al. (2001) os princípios básicos de experimentação e a variabilidade do solo ocorrem de forma aleatória. Entretanto, vários estudos têm demonstrado que a variabilidade das propriedades físicas do solo apresenta dependência espacial. Nesse contexto, as ferramentas geoestatísticas ganham destaque, pois permitem definir o grau de correlação espacial dos atributos do solo. O semivariograma é uma ferramenta da geoestatística que permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável (FARIA, 2013). Ajustado um modelo de semivariograma para uma variável de interesse e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se estimar valores da variável em qualquer posição no campo não amostrado para depois construir o seu padrão espacial (PANOSSO, 2006). O interpolador que utiliza o semivariograma em sua modelagem é chamado de Krigagem (FARIA, 2013).

A krigagem ordinária é um dos principais métodos de interpolação espacial e vem sendo usada para mapear os atributos hidrológicos do solo com boa exatidão, gerando mapas com estimativas não tendenciosas de locais não amostrados e com variância de estimação mínima, desde que haja modelagem consistente da continuidade espacial (ALVARENGA et

al., 2011). Junqueira Júnior. et al. (2008), ao estudarem a continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira, verificaram que os atributos analisados eram estruturados espacialmente.

Oliveira et al. (2013) estudaram a variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háptico sob diferentes usos na região sul do Amazonas. No estudo foram avaliados atributos como a textura do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo e estabilidade de agregados. Os autores verificaram que os atributos físicos do solo nos diferentes usos estudados apresentaram dependência espacial. Entretanto, ficou evidenciado que esses atributos sofreram alteração e que a variabilidade espacial pode ser alterada, em razão do manejo aplicado. Junqueira Júnior. e Beloni (2015) estudaram a continuidade espacial de atributos físicos do solo em bacia hidrográfica de cabeceira do sul de Minas Gerais cuja unidade pedológica predominante é Cambissolo. Foram avaliados a densidade do solo, matéria orgânica, porcentual de areia, silte, argila e argila dispersa em água. Foi verificado que todos os atributos estudados apresentaram-se estruturados espacialmente.

Campos et al. (2013 B) avaliaram a variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Vermelho sob ocupação de floresta. Na ocasião foram estudados atributos como a textura, densidade do solo e de partículas, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e estabilidade dos agregados em água. Neste estudo, os autores encontraram que todos os atributos físicos avaliados apresentaram estrutura de dependência espacial variando de moderada a fraca. Os autores verificaram distribuição aleatória (efeito pepita puro) para as variáveis diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e classes de agregado <1,00 mm.

Nestas situações, nas quais é verificada distribuição aleatória (efeito pepita puro), ou seja, distribuindo-se de forma independente no espaço, trabalha-se com a estatística clássica (SOUZA et al., 2004; CAMPOS et al., 2013). Neste tipo de situação pode-se promover o mapeamento da variável de interesse por outros interpoladores, tendo-se destaque, para o caso de variáveis ambientais, o inverso do quadrado da distância (GUEDES et al. (2012); VIOLA et al. (2010); SOUZA et al. (2010); MELLO et al. (2003)) . Souza et al. (2010) concluíram em seu trabalho sobre atributos químicos do solo que a krigagem ordinária e o inverso do quadrado da distância foram eficientes na inferência de valores para locais não amostrados. Os autores afirmaram que os dois métodos foram indicados para a espacialização de atributos químicos do solo.

## **Continuidade espacial e estabilidade temporal da umidade do solo**

Para fins hidrológicos, o solo pode ser considerado o principal meio de transporte e armazenamento da água. Nas camadas de solo que ficam mais próximas à superfície, os processos de movimentação da água se dão por meio da infiltração, evaporação, absorção pelas plantas, redistribuição e drenagem. Tais processos ocorrem de forma bastante dinâmica, o que justifica a importância do detalhamento espaço-temporal do monitoramento da umidade do solo (LIMA; SILVA, 2012). Especialmente em áreas florestais, o teor de água do solo é essencial para a compreensão das relações entre solo-planta-atmosfera e da recarga do aquífero por percolação. Também desempenha papel importante para os processos hidrológicos nas zonas críticas hidropedológicas (MELLO; CURI, 2012).

Os efeitos combinados de condições atmosféricas, características do solo, material de origem do solo, topografia, uso do solo, vegetação e tempo estão diretamente relacionados com a umidade do solo. Todos esses fatores têm potencial para afetar a umidade do solo devido a sua influência sobre atributos do solo, incluindo porosidade, tamanho e distribuição de poros, entre outros. Cabe destacar as características da vegetação, como tipo e idade, que afetam a estrutura do solo, alterando-o fisicamente e quimicamente, bem como a comunidade de microorganismos (BENJAMIN et al., 2008).

O monitoramento contínuo da umidade do solo pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de uso sustentável da água na irrigação e na agricultura de precisão. Dentro do campo da hidrologia, condições de umidade do solo são fundamentais para o entendimento das respostas hidrológicas, tais como a produção dos escoamentos. Outros processos como a evapotranspiração, o transporte de solutos e poluentes, capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica, dentre outras características do solo, também são dependentes da umidade do solo (ROMANO, 2014).

A partir da década de 1980 surgiram vários métodos de monitoramento da umidade do solo baseados em respostas às propriedades eletromagnéticas do solo como alternativa à medição direta do teor de água do solo. Esses métodos indiretos têm sido bastante empregados por apresentarem vantagens como resposta rápida, medições não destrutivas e precisão aceitável nas medições (SILVA et al., 2012). Entretanto, os autores recomendam que para medições mais acuradas, faz-se necessário realizar calibrações para as diferentes classes de solos, em decorrência das propriedades eletromagnéticas inerentes a sua estrutura e composição (FARES et al., 2006; PREVEDELLO et al., 2007; SILVA et al., 2012). Neste

contexto, as sondas com multisensores de capacitância têm sido utilizadas no monitoramento da umidade do perfil do solo em ecossistemas naturais e áreas de cultivo agrícola, como nos estudos realizados por Junqueira Júnior et al. (2017), Melo Neto et al. (2017), Di Matteo et al. (2018), Grant et al. (2015), Kiani et al. (2016). Estas sondas usam a técnica *frequency domain reflectometry* (FDR) e possuem vários sensores que permitem a medição da umidade em diferentes profundidades (SILVA et al., 2012).

De acordo com Junqueira Júnior e Beloni (2015), com o avanço da ciência tem-se encontrado limitações da estatística clássica no tratamento da variabilidade espacial de variáveis físicas e físico-hídricas do solo. Assim, a geoestatística, que considera que as propriedades naturais da superfície terrestre apresentam continuidade espacial, vem sendo relevante no estudo da dependência espacial da umidade do solo. O estudo da dependência espacial possibilita que parâmetros necessários para estimar valores de atributos do solo em locais não amostrados sejam determinados (LIMA et al., 2014), possibilitando o aprimoramento das pesquisas.

O conhecimento da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo é muito importante para diversas áreas de estudos como agronomia, hidrologia, estudos pedológicos e ambientais. De um ponto de vista físico, a umidade do solo influencia propriedades hidráulicas do solo, que produzem efeitos na infiltração, escoamento superficial e erosão do solo, processos que são críticos em várias áreas de interesse (ZUCCO et al., 2014).

Campos et al. (2013) afirmam que os mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo dão subsídios importantes para a implantação de práticas de manejo adequadas do solo e das culturas. Atualmente, estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo possibilitam análises que dão suporte na tomada de decisões e resoluções de problemáticas relacionadas ao uso do solo (LIMA et al., 2015). De acordo com Sanchez et al. (2012), o detalhamento dessas variações pode indicar a ocorrência de processos capazes de aumentar produtividade das culturas, e ainda permite a identificação de locais específicos de manejo do solo.

Nas últimas décadas, foram feitos grandes esforços para entender a dinâmica da umidade do solo em um contexto espacial, e para determinar fatores de controle e propriedades de escala (CORRADINI, 2014). Embora o comportamento da umidade possa apresentar considerável variabilidade em uma mesma unidade pedológica, o teor de água no solo é variável no espaço e no tempo devido à ação de diversos fatores, especialmente àqueles associados ao uso e manejo do solo (ÁVILA et al., 2010).

O padrão espacial da umidade do solo pode ser representado por uma componente de pequena escala associada com as interações solo-vegetação com o relevo e uma componente de grande escala associada com a precipitação e evapotranspiração (MELO NETO et al. 2017). Guswa (2012) mostra que a variabilidade horizontal da umidade do solo é afetada principalmente pela parcela de água que não é interceptada pelo dossel e pelo escoamento no tronco das árvores, enquanto a variabilidade vertical está associada principalmente às características físicas do solo e, especialmente, à distribuição do sistema radicular.

A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ocorrer tanto horizontal quanto verticalmente, em decorrência de seu material de origem, localização, grau de intemperismo ou manejo (GREGO; COELHO; VIEIRA, 2011). Em seus estudos, Carvalho, Silveira e Vieira (2002) verificaram que a profundidade é um fator importante no estudo da dependência espacial. Acrescentando, Beutler et al. (2002) constatou que os atributos hídricos do solo dependem de diversos fatores como do tipo do solo, histórico de uso e preparo do solo, pois solos manejados por diferentes preparos são alterados em profundidade.

Liang et al. (2014), em estudo sobre estrutura espacial da umidade superficial do solo em uma bacia de cabeceira ocupada por florestas, verificaram padrões distintos de umidade relacionados à topografia. As três unidades topográficas estudadas (ravinas, colina e cabeceira) apresentaram padrões espaciais diferentes para umidade superficial do solo. O padrão de umidade do solo foi relativamente estacionário nas ravinas e na colina, porém este variou na encosta da cabeceira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Karla Silva Santos Alvares et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em latossolo amarelo distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 259-274, 2017.

ALVARENGA, C. A. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1745-1757, 2011.

ÁVILA, L. F.; DE MELLO, C. R.; DA SILVA, A.M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 12, 2010.

ÁVILA, L. F. et al. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1801-1810, 2011.

BASSO, F. C.; ANDREOTTI, I. M.; CARVALHO, M. P.; LODO, B. N. Relações entre produtividade de sorgo forrageiro e atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo do Cerrado. **Pesquisa agropecuária Tropical**. 2011;41:1:135-144. doi:10.5216/pat.v41i1.7099

BENJAMIN, J.G., Mikha, M.A., Vigil, M.R., 2008. Organic carbon effects on soil physical and hydraulic properties in a semiarid climate. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 72, 1357–1362, 2008.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1993. 355 p.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolo sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, p. 149-157, 2007.

CAMPOS, M. C. C. et al. Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 119-128, 2013.

CAMPOS, Milton César Costa et al. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. *Comunicata Scientiae*, p. 168-178, 2013. (B)

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CELIK, I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. **Soil & Tillage Research** 83: 270-277. 2005

CHENG, J. D.; LIN, L. L.; LU, H. S. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 165, n. 15, p. 11-28, July 2002.

CORRADINI, C., 2014. Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. **J. Hydrol.** 516, 1–5, 2014.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR; CURI, N.; PEREIRA, G.T. LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequencia arenítico-basáltica da região de Jaboaticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29,p.81-90, 2005

DI MATTEO, Lucio et al. Reliability of water content estimation by profile probe and its effect on slope stability. **Landslides**, v. 15, n. 1, p. 173-180, 2018.

DORAN, J. W.; Parkin, T. B. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J. W.; Coeman, D. C.; Bezdicek, D. F.; Stewart, B. A. (ed.). Defining soil quality for sustainable environment. Madison: **Soil Science Society of America**, 1994. p.3-21. SSSA Special Publication, 35

FARES, A.; HAMDHANI, H.; POLYAKOV, V.; DOGAN, A.; VALENZUELA, H. Real-time soil water monitoring for optimum water management. **Journal of the American Water Resources Association**, v.42, p.1527-1535, 2006.

FARIA, Glaucia Amorim. **Uso de um Sistema de Informação Geográfica para análise geoestatística em solos**. Lavras : UFLA, 2013. 113 p. Dissertação (mestrado). 2013.

FERREIRA, MM. Caracterização física do solo. In: Jong van Lier Q, editor. Física do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**; 2010. p.1-27.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Ciências Agrárias**. 2010;31:4:913-932.(B)

FORSYTHE, W. Física de suelos. Costa Rica: IICA, 1975. 212 p.

GAO, L.; SHAO, M. A. The interpolation accuracy for seven soil properties at various sampling scales on the Loess Plateau, China. **Journal of Soils and Sediments**, New York, n. 12, n. 2, p. 128-142, Nov. 2012.

GAO, L., Lv, Y., Wang, D., Tahir, M., Peng, X., 2015A. Can shallow-layer measurements at a single location be used to predict deep soil water storage at the slope scale? **J. Hydrol.** 531, 534–542, 2015.

GAO, L., Shao, M., Peng, X., She, D., 2015B. Spatio-temporal variability and temporal stability of water contents distributed within soil profiles at a hillslope scale. **Catena** 29–36, 2015.

GASPAR, Márcia Tereza Pantoja; CAMPOS, José Eloi Guimarães; DE MOURA CADAMURO, André Luiz. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 3, p. 542-550, 2007.

GAZOLLA, Paulo Roberto et al. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, 2015.

GOMES, Marcos Antonio et al. Solos, manejo e aspectos hidrológicos na bacia hidrográfica do Araújos, Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v. 36, n. 1, 2012.

GOMES, Rudson Leonette Rodrigues et al. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, v. 9, n. 1, 2015.

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e resposta espectral da cultura de feijão irrigado, em imagens aéreas digitais.** 1997. 118 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

GONÇALVES, Adriano Dicesar Martins de Araújo; LIBARDI, Paulo Leonel. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, 2013.

GRANT, Olga M. et al. Resilience of a semi-deciduous shrub, *Cistus salvifolius*, to severe summer drought and heat stress. **Functional plant biology**, v. 42, n. 2, p. 219-228, 2015.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.169-177. 2005.

GREGO, C. R.; COELHO, R. M.; VIEIRA, S. R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 337-350, abr. 2011.

GUEDES, Isabel Carolina de Lima et al. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de Eucalyptus sp. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, 2012.

GUSWA, A. J. (2012). Canopy vs. Root: Production and destruction of variability in soil moisture and hydrologic fluxes. **Vadose Zone Journal**, 11(3), 1-13.

HU, W., Shao, M.A., Wang, Q.J., Fan, J., Horton, R., 2009. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. **Geoderma** 149, 355–366.

HU, W., SHAO, M., HAN, F., REICHERDT, K., & TAN, J. (2010). Watershed scale temporal stability of soil water content. **Geoderma**, 158(3-4), 181-198

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/planos-diretores/bacia-hidrografica-do-rio-grande/8190-upgrhgd1alto-rio-grande>>, acesso em 15/02/2018.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 914-922, 2008.

JUNQUEIRA JUNIOR., J. A. et al. Time-stability of soil water content (SWC) in an Atlantic Forest-Latosol site. **Geoderma**, v. 288, p. 64-78, 2017.

JUNQUEIRA JUNIOR, J. A.; BELONI, Anderson André Pereira. Continuidade Espacial de Atributos Físicos do Solo em Sub-Bacia Hidrográfica de Cabeceira. **Profiscientia**, n. 9, 2015.

KIANI, Mina et al. Effect of the interaction of water and nitrogen on sunflower under drip irrigation in an arid region. **Agricultural Water Management**, v. 171, p. 162-172, 2016.

LEÃO, M. G. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 121-131, 2010.

LEÃO, M. G. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D.; PEREIRA, G. T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 644-651, 2011.

LIANG, Wei-Li et al. Spatial structure of surface soil water content in a natural forested headwater catchment with a subtropical monsoon climate. **Journal of hydrology**, v. 516, p. 210-221, 2014.

LIMA, J. E. F. W; SILVA, E.M. da. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **Bras. Rec. Hídric**, v. 17, p. 23-32, 2012.

LIMA, R.P.; LEON, M.J.; SILVA, A.R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v.60, p.577-581, 2013.

LIMA, Julião Soares Souza et al . Distribuição espacial das frações granulométricas argila e areia total em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Rev. Árvore**, Viçosa , v. 38, n. 3, p. 513-521, June 2014 .

LIMA, Franciezer Vicente et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, 2015.

MACHADO, Luciana Ventura et al. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 289-299, jul./set. 2014

MELO NETO, José de Oliveira et al. Temporal stability of soil moisture under effect of three spacings in a eucalyptus stand. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 3, p. 393-399, 2017.

MELLO, CR de et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, 2003.

MELLO, C.R., Curi, N., 2012. Hydropedology. **Ciênc. Agrotecnol.** 36, 137–146, 2012.

MEYER, Pablo Burkowski et al. STRUCTURAL DYNAMICS IN A FRAGMENT OF SEASONAL SEMI-DECIDUOUS FOREST IN LAVRAS, MG, BRAZIL. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 259-265, 2015.

OLIVEIRA, Ivanildo Amorim et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, 2013.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. et al. Comparison of wood flora and soils of six areas of montane semideciduous forest in southeastern Minas Gerais, Brazil. **Edinburgh Journal of Botany**, Edinburgh, v. 51, n. 3, p. 355-389, 1994.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. Composição florística e estrutura comunitária de um remanescente de floresta semidecídua montana em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 167-182, 1994.

ORTIGARA, Cícero et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, 2014.

PÁDUA, Eduane José; RIBEIRO GUERRA, Adriano; LOPES ZINN, Yuri. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, 2015.

PANOSSO, A. R. **Variabilidade espacial da emissão de co<sub>2</sub>, temperatura e umidade em latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistemas de colheita manual com queima e mecanizada**. 2006. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

PINTO, Leandro Campos et al. A hydro-pedological approach to a mountainous Clayey Hemic Dystrudept in the Mantiqueira Range, southeastern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 1, p. 60-69, 2018.

PREVEDELLO, C.L.; MAGGIOTTO, S.R.; LOYOLA, J.M.T.; DIAS, N.L.; BEPPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1-8, 2007.

QIU, Y. et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 240, n. 3, p. 243-263, Jan. 2001.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R. & LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 10:1-6, 1986.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

RINALDI, Luanna Karoline; NUNES, Joselito; MONTECELLI, Tatiane Dalla Nora. Efeito de texturas do solo sobre populações de *Meloidogyne javanica* e *Meloidogyne incognita* em soja. **Cultivando o Saber**, v. 7, n. 1, p. 83-101, 2014.

ROMANO, Nunzio. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. **Journal of hydrology**, v. 516, p. 6-20, 2014.

ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002. 86p.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARACAT NETO, J.; SIQUEIRA, D.S. & SOUZA, Z.M. Mapeamento das formas do relevo para estimativa decustos de fertilização em cana-de-açúcar. **Eng. Agríc.**, 32:280-292, 2012.

SANTOS, L.N.S. dos; PASSOS, R.R.; CARDOSO, L.C.M.; SANTOS, L.; GARCIA, G.O.; CECÍLIO, R.A. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo sob diferentes coberturas vegetais em Alegre (ES). **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.6, n.2, p.140-149, 2009

SANTOS, Marcela de Castro Nunes et al. Spatial continuity of soil attributes in an Atlantic Forest remnant in the Mantiqueira Range, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 1, p. 68-77, 2013.

SIGNOR, Diana et al. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, 2014.

SILVA, Bruno Montoani et al. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, 2001.

SOUZA, Z.M., Marques Junior, J., Pereira G.T. 2004. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solo de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39: 491-499.

SOUZA, Gustavo et al. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 1, 2010.

SOUZA, Joabe Martins et al. VARIABILIDADE ESPACIAL DA CAPACIDADE DE CAMPO E PONTO DE MURCHA PERMANENTE EM ARGILOSO AMARELO COESO. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 5, p. 875, 2016.

SYLVAIN, J. M. et al. Comparison of the spatio-temporal variability of annual minimum daily extreme flow characteristics as a function of land use and dam management mode in Quebec, Canada. **Water**, Basel, v. 7, n. 3, p. 1232-1245, 2015.

VERECKEN, H., Kamaï, T., Harter, T., Kasteel, R., Hopmans, J., Vanderborght, J., 2007. Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: a stochastic unsaturated flow perspective. **Geophys. Res. Lett.** 34, L22402. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031813>.

VIOLA, Marcelo R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 9, 2010

YOUNG, F. J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. **Soil Science Society American Journal**. v. 64, p. 989-998, 2000

ZUCCO, G. et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. **Journal of hydrology**, v. 516, p. 193-199, 2014.

## CAPÍTULO 2

### CONTINUIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS.

#### **Spatial continuity of soil physical-hydric attributes in a small watershed in the Southern region of Minas Gerais.**

#### RESUMO

As propriedades físico-hídricas do solo estão diretamente relacionadas, dentre outras, com as práticas de manejo, uso do solo e com as unidades pedológicas que constituem o solo. Estas propriedades afetam diretamente o regime hidrológico, em função de sua influência sobre os fenômenos de escoamento, produção de sedimentos, infiltração, armazenamento de água no solo, entre outros. Para a escala de bacias hidrográficas, a identificação da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos é essencial para a assimilação de distintos ambientes hidropedológicos. Portanto, o conhecimento da estrutura de continuidade espacial dos atributos físicos dos solos é uma ferramenta importante para a correta associação entre o uso do solo e a hidrologia do manancial. Dessa forma, objetivou-se avaliar modelo exponencial de semivariograma ajustado pelo método dos mínimos quadrados ponderados (MQP) e produzir mapas de atributos físico-hídricos do solo. O local de estudo é constituído por uma pequena bacia hidrográfica de 14 ha afluyente ao Ribeirão Vermelho, localizada no campus da Universidade Federal de Lavras, MG. Nesta ocorrem Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos, e diferentes usos do solo, notadamente cultura anual (milho), cultura perene (café) e floresta estacional semidecidual montana (FESM). Avaliaram-se a densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), porosidade total ( $P$ ), macroporosidade ( $Map$ ), microporosidade ( $Mip$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), matéria orgânica ( $MO$ ), condutividade hidráulica saturada ( $k$ ) e percentual das frações areia, silte e argila. Foram realizadas amostragens de solo em 38 pontos nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm. A análise variográfica mostrou que a maioria dos atributos estudados apresentou elevada estrutura de dependência espacial. As exceções se deram para o silte e a matéria orgânica em todas as profundidades, para a  $D_s$  a 10 cm e 20 cm de profundidade e  $P$  a 20 cm. Nestas situações procedeu-se o mapeamento pelo interpolador inverso do quadrado da distância. Os mapas possibilitaram verificar a relação entre as classes de solo, uso do solo e atributos físico-hídricos. A área de FESM proporciona à bacia uma área de alta condutividade hidráulica devido a menores densidades do solo e maiores porosidades encontrados nesta área. O maior aporte de matéria orgânica proporcionado pela floresta também contribui para melhor estruturação nos solos, especialmente nas camadas superficiais. Sendo assim, as alterações dos atributos físico-hídricas do solo ocasionados em decorrência da FESM fazem desta uma área importante para a infiltração e drenagem de água trazendo benefícios para os processos

hidrológicos, notadamente a recarga subterrânea. As áreas destinadas ao cultivo agrícola (culturas anual e perene) apresentaram menor teor de matéria orgânica e maior densidade do solo. Nota-se também, que nessas áreas ocorrem os solos mais argilosos. Esses fatores juntos justificam os baixos valores de  $k$  ali encontrados. Assim, pode-se verificar que o mapeamento de atributos físico-hídricos do solo em uma bacia hidrográfica com múltiplos usos do solo e classes de solo é essencial para subsidiar o entendimento dos processos hidrológicos e orientar o adequado manejo de bacias hidrográficas.

**Palavras-chave:** Caracterização físico-hídrica. Geoestatística. Semivariograma. Variabilidade.

## ABSTRACT

The physical-hydric properties of a soil are directly related, among others, to the management practices, land use and soil units. These properties directly affect the hydrological regime, due to its influence on the phenomena of flow, sediment production, infiltration, soil water storage, among others. For a watershed scale, the identification of physical-hydric attributes spatial variability is essential for the assimilation of different hydrogeological environments. Therefore, the knowledge of physical attributes spatial continuity structure of soil is an important tool for the correct association between the land use and the hydrology of water resources. Thus, the objective of this study was to evaluate the exponential model of semivariogram adjusted by the least squares method (LSM) and to produce maps of soil physical-hydric attributes. The study site consists of a small watershed of 14 ha affluent to Ribeirão Vermelho, and it is located on the campus of the Federal University of Lavras, MG. In this area occurs Latosols, Argisols, Cambisols and Gleisols, and different land uses, notably annual crop (corn), perennial crop (coffee) and montane semideciduous seasonal forest (FESM). Soil density ( $D_s$ ), particle density ( $D_p$ ), total porosity ( $P$ ), macroporosity ( $Map$ ), microporosity ( $Mip$ ), moisture at the permanent wilting point ( $\theta_{PWP}$ ), organic matter (OM), saturated hydraulic conductivity ( $k$ ) and percentage of sand, silt and clay fractions were measured. Soil samples were collected at 38 different sites at the depths of 10 cm, 20 cm, 30 cm and 40 cm. The semivariographic analysis showed that most of the studied attributes presented great spatial dependence structure. Exceptions were made for silt and organic matter at all depths, for  $D_s$  at 10 cm and 20 cm depth and  $P$  at 20 cm. In these situations, maps were built by using the inverse square distance interpolator. The maps allowed verifying the relationship between soil classes, land use and physical-hydric attributes. The FESM area provides the watershed with an area of high hydraulic conductivity due to lower soil densities and larger porosities found in this area. The greater contribution of organic matter provided by the forest also contributes to better structuring in the soils especially in the superficial layers. Thus, changes in the soil physical-hydric attributes due to the FESM presence make of this an important area for water infiltration and drainage. So, it brings benefits to hydrological processes especially underground recharge. The areas destined to the agricultural crop (annual and perennial crops) had lower content of organic matter and greater density of the soil. It is also noted that in these areas the most clayey soils occur. These factors together justify the low values of  $k$  found there. Thus, it can be verified that

mapping of physical-hydric attributes of soil in a watershed with multiple land uses and soil classes is essential to support the understanding of the hydrological processes and guide the appropriate management of watersheds.

**Keywords:** Physical-hydric characterization, Geostatistics, Semivariogram, Variability

## INTRODUÇÃO

Com a expansão da fronteira agrícola, ocorre a remoção da vegetação nativa, e que muitas vezes é seguida pela utilização de mecanização intensiva e aplicação de práticas de manejo inadequadas para o cultivo. Em consequência, alteram-se os atributos do solo, causando sua degradação, reduzindo a produtividade, principalmente devido aos processos erosivos, juntamente com a redução do conteúdo de nutrientes e da matéria orgânica (GAZOLLA et al., 2015). Para fins hidrológicos, o solo pode ser considerado o principal meio de transporte e armazenamento de água (LIMA; SILVA, 2012).

De acordo com Grego e Vieira (2005) e Campos et al. (2013 B), no que se referem aos atributos físicos do solo, muitos estudos têm demonstrado grande diversidade de resultados. Em geral, os resultados têm apresentado variação na continuidade espacial, principalmente quando esta é associada a características intrínsecas do solo que podem também sofrer influências do sistema de manejo. A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ocorrer tanto horizontal quanto verticalmente, em decorrência de seu material de origem, localização, grau de intemperismo ou manejo (GREGO; COELHO; VIEIRA, 2011). A identificação do padrão de variabilidade espacial requer a utilização de técnicas de mapeamento, visando possibilitar análises para darem suporte na tomada de decisão e resolução de problemáticas relacionadas ao uso do solo (LIMA et al., 2015). Nesse contexto, as ferramentas geoestatísticas ganham destaque, pois permitem definir o grau de correlação espacial dos atributos do solo.

Lima et al. (2014) estudaram a variabilidade espacial das frações granulométricas argila e areia total de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de eucalipto em duas profundidades. Neste estudo, verificaram que as frações argila e areia total, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, apresentaram dependência espacial. Campos et al. (2013), estudando a distribuição espacial dos atributos físicos do solo em área de cultivo com cana-

de-açúcar, encontraram dentre os atributos físicos estudados (taxa de infiltração,  $D_s$ ,  $D_p$ ,  $P$ ,  $Map$ ,  $Mip$ , areia, silte, argila), efeito pepita puro para o silte e a  $Mip$ .

A Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH GD1), na qual se insere a bacia estudada, apresenta 67% de suas terras destinadas a usos antrópicos, envolvendo cultivos agrícolas e pastagens (IGAM, 2014). Os solos da UPGRH GD1, são compostos principalmente pelos Cambissolos (74%), seguido dos Latosossolos Vermelho-Amarelo (11%). A Bacia do Alto Rio Grande apresenta a predominância de áreas caracterizadas por relevo ondulado, com declividade variando entre 8% e 20%; e terrenos com baixa capacidade de infiltração, com solos argilosos associados a substrato rochoso de baixa permeabilidade (IGAM, 2014). Assim, o desenvolvimento de estudos sobre a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em bacias hidrográficas desta região é importante para um melhor entendimento do comportamento hidrológico típico dos distintos ambientes existentes. Há de se salientar que de acordo com Oliveira-Filho et al. (1994), na bacia do rio Grande, no sul de Minas Gerais e Triângulo Mineiro, as florestas semidecíduifólias foram drasticamente reduzidas, uma vez que sua ocorrência coincide com solos mais visados pela agropecuária (MEYER et al., 2015). O local de estudo é constituído por uma pequena bacia hidrográfica afluyente ao Ribeirão Vermelho, que por sua vez é um tributário direto do Rio Grande. A região é de grande importância para a economia que têm participação importante do setor agropecuário, tendo destaque a produção de café, leite e milho.

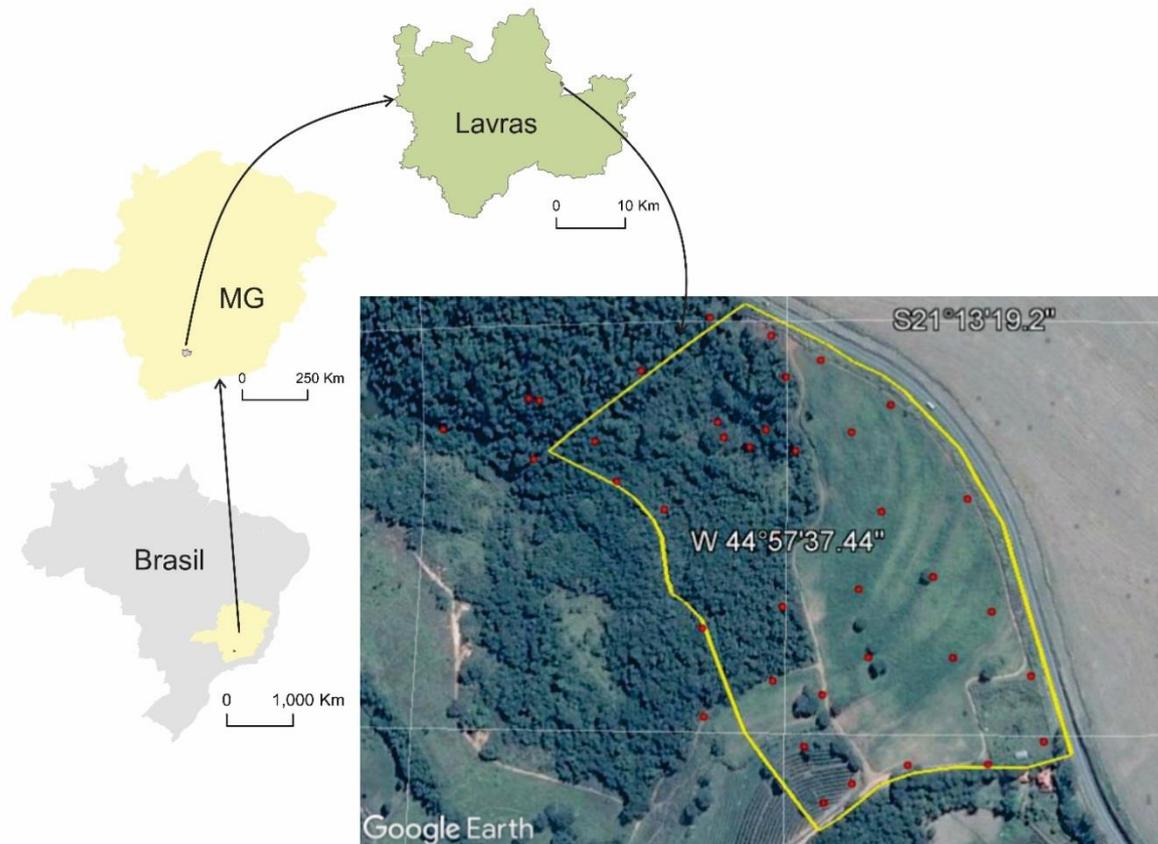
Apesar de serem encontradas muitas pesquisas que utilizaram a geoestatística para o estudo da variabilidade espacial e mapeamento de atributos do solo (SANTOS et al., 2013), estes são escassos principalmente quando se trata da análise em diferentes profundidades do solo (JUNQUEIRA JUNIOR et al., 2017), e quando se relaciona estes a usos múltiplos do solo, classes de solo e de relevo. Diante do exposto, o presente estudo propõe, especificamente, avaliar a continuidade espacial dos atributos físico-hídricos em diferentes profundidades em uma pequena bacia hidrográfica afluyente ao Ribeirão Vermelho, localizada no campus da Universidade Federal de Lavras. Realizar o mapeamento dos atributos. A partir dos mapas, objetivou-se também avaliar a relação entre os usos do solo e classes de solo com a ocorrência dos atributos físico-hídricos.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Caracterização da área de estudo**

A área de estudo (Figura 1) consiste de uma pequena bacia hidrográfica situada nas coordenadas de latitude  $21^{\circ}13'19''\text{S}$  e de longitude  $44^{\circ}57'35''\text{W}$ , no campus da Universidade Federal de Lavras, região sul de Minas Gerais. A área de drenagem é de 14 ha e a sua declividade média é 7,8%. A delimitação da bacia hidrográfica e da rede de drenagem foi realizada por levantamento *in loco*, com a utilização de equipamento GPS. Adotou-se como seção de controle um ponto a 50 metros a montante da confluência do curso d'água da bacia estudada com o curso d'água de maior ordem. A bacia em estudo faz parte do conjunto de tributários do Ribeirão Vermelho, que por sua vez, desagua diretamente no Rio Grande, 300 metros a jusante da ponte rodoferroviária de Ribeirão Vermelho, MG. O clima da região, onde se localiza a sub-bacia hidrográfica pela classificação de Köppen é predominantemente Cwb, com os verões úmidos e quentes e invernos secos e frios (Alvares et al., 2013).

**Figura 1** – Localização da área de estudos com evidência para os pontos de amostragem de solo.



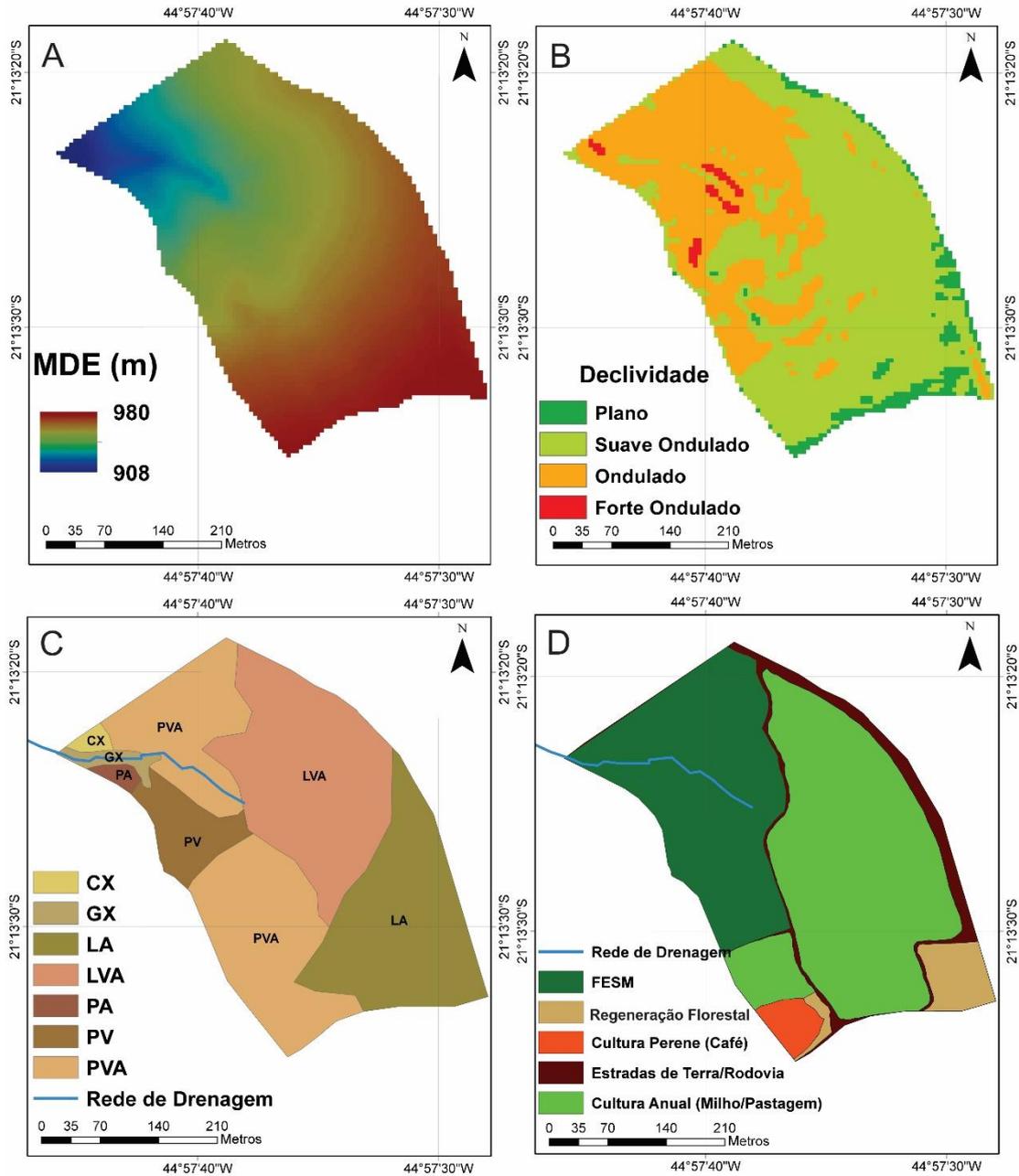
Fonte: Do Autor (2018)

A Figura 2A mostra o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica, com resolução de 5 metros. Verifica-se que a bacia tem uma variação altimétrica de aproximadamente 72 m. A Figura 2B traz as classes de declividade conforme Embrapa (1979). Observa-se predominância de relevo suave ondulado em 58% da área, seguido de relevo ondulado em 35% da área. Também se verifica a presença de relevo plano em 6% e a presença localizada de relevo fortemente ondulado em 1% da área da bacia. Na Figura 2C está apresentado o mapa de solos obtido por Curi, Silva e Menezes (2017), no qual verificam-se as seguintes unidades pedológicas e abrangências, respectivamente: Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) 35%, Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) 30%, Latossolo Amarelo (LA) 25%, Argissolo Vermelho (PV) 7%, Gleissolo Háplico (GX) 2%, Argissolo Amarelo (PA) 1% e Cambissolo Háplico 1% (CX). A Figura 2D apresenta o mapa de uso e ocupação dos solos da bacia hidrográfica, ocorrendo cultivos de café (2,5%), Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM) (35,7%), cultura anual (48,4%), regeneração florestal (5%),

além de estradas rurais, cursos d'água e outros (8,4%). No que tange ao uso predominante (cultura anual), durante o verão é realizado o plantio de milho, seguido do plantio de *Brachiária Decumbes* destinado à pastagem para gado. O segundo uso predominante refere-se a um remanescente de FESM (IBGE, 2012). De acordo com Machado et al. (2008), esta foi a tipologia mais rápida e extensamente devastada no estado desde o período colonial, e assim, caracteriza um ambiente prioritário para o desenvolvimento de estudos hidrológicos.

A partir da Figura 2 constata-se que na região de maior altitude da bacia, onde se concentram as áreas de menores declividades, estão localizados os Latossolos. Em direção a seção de controle da bacia, verifica-se a ocorrência de relevo ondulado e forte ondulado na presença de Argissolos, Cambissolos e Gleissolos.

**Figura 2** – A) Modelo Digital de Elevação B) Declividade C) Unidades Pedológicas da bacia D) Mapa de uso do solo da bacia.



Do Autor (2018)

### Amostragens e análises de laboratório

A amostragem de solo foi realizada em 4 camadas, sendo elas 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm. Na figura 1 pode ser visualizado o grid irregular estabelecido para a realização da amostragem do solo. A justificativa para adoção de um grid irregular é em razão da localização da instalação de pontos de monitoramento da umidade. Procurou-se realizar

amostragens de solos nas proximidades destes pontos de monitoramento da umidade do solo. Foram adicionados pontos extras de coleta de solo em outros pontos a fim de se obter uma maior representatividade da área de estudo, totalizando 38 pontos de amostragem de solo.

As metodologias de coleta, preparação, análise das amostras de solo e cálculos dos atributos físico-hídricos foram realizadas conforme EMBRAPA (1997). Foram considerados os seguintes atributos físicos hídricos do solo: densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), porosidade total ( $P$ ), macroporosidade ( $Map$ ), microporosidade ( $Mip$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), condutividade hidráulica saturada ( $k$ ), e teores de areia, silte e argila. Considerou-se também, a matéria orgânica ( $MO$ ) do solo.

A  $D_s$  foi determinada a partir de amostras com estrutura indeformada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), conforme Equação 1:

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

em que  $D_s$  é densidade ( $\text{Kg dm}^{-3}$ ),  $m_s$  é a massa do solo seco em estufa estufa a  $105^\circ\text{C}$  ( $\text{Kg}$ ) e  $V$  é o volume do solo ( $\text{dm}^3$ ).

A  $D_p$  foi determinada pelo método do balão volumétrico por meio da relação entre a massa de solo seco e o volume ocupado pelas partículas sólidas do solo seco (EMBRAPA, 1997):

$$D_p = \frac{m_p}{V_s} \quad (2)$$

em que  $D_p$  é a densidade de partículas ( $\text{kg dm}^{-3}$ ),  $m_p$  é a massa de solo seco em estufa ( $\text{g}$ ) e  $V_s$  é o volume de partículas sólidas do solo seco ( $\text{dm}^3$ ).

A  $P$  foi determinada por meio da relação entre  $D_p$  e a  $D_s$  (EMBRAPA, 1997):

$$P = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

em que  $P$  é a porosidade (%).

Para o cálculo da  $Map$  e  $Mip$ , amostras de solo indeformadas e saturadas foram colocadas sob a mesa de tensão a qual retira a água dos macroporos (poros com  $\theta > 0,05\text{mm}$ ). Para isso, considerou-se o nível de sucção correspondente a 60 cm de altura de coluna d'água até a obtenção da constância pesada. Após pesagem, antes e depois de ir à estufa a  $105^\circ\text{C}$ ,

obtem-se o volume de macro e microporos contidos na amostra de acordo com as seguintes equações:

$$Mip = \left( \frac{M_a - M_s}{V} \right) \cdot \frac{1}{D_s} \cdot 100 \quad (4)$$

em que  $Mip$  é a Microporosidade (%),  $M_a$  é o peso da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 cm de coluna de água (kg),  $M_s$  é o peso da amostra seca a 105°C (kg),  $V$  = volume do cilindro que contém a amostra (dm<sup>3</sup>) e  $D_s$  é densidade do solo (Kg dm<sup>-3</sup>).

$$Map = P - Mip \quad (5)$$

em que,  $Map$  é a macroporosidade (%),  $P$  é a porosidade total (%) e  $Mip$  é a microporosidade (%).

A  $\theta_{PMP}$  foi obtida com auxílio do extrator de Richards. Para tanto, as amostras de solo saturadas foram colocadas em membranas previamente saturadas e submetidas a uma sucção de 1,5 MPa, até atingir a drenagem máxima da água contida nos seus poros, correspondente à tensão aplicada.

$$\theta_{PMP} = \left( \frac{M_b - M_s}{M_s} \right) \cdot D_s \cdot 100 \quad (6)$$

em que,  $\theta_{PMP}$  é a umidade do solo a uma pressão de 1,5 MPa,  $M_b$  é a massa da amostra (kg) após ser submetida a pressão de 1,5 MPa e  $M_s$  é a massa de solo seco (kg).

A  $k$  foi determinada pelo permeâmetro de carga constante, em que mede-se o tempo gasto para coletar o volume de água que atravessa uma coluna de solo após o sistema atingir o equilíbrio. Pela aplicação da equação de Darcy, encontra-se a medida quantitativa da condutividade hidráulica saturada:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (7)$$

em que,  $k$  é a condutividade hidráulica ( $\text{m dia}^{-1}$ ),  $Q$  é o volume do percolado ( $\text{m}^3$ ),  $L$  é altura do bloco do solo ( $\text{m}$ ),  $H$  é altura do bloco do solo e da coluna ( $\text{m}$ ),  $A$  é a área do cilindro ( $\text{m}^2$ ) e  $t$  é o tempo (dia).

O teor de MO foi determinado por meio da oxidação da matéria orgânica utilizando-se o bicromato de sódio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  4N +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10N) como agente oxidante.

A análise de textura foi realizada por meio método da pipeta que é baseado na velocidade de sedimentação das partículas que compõem o solo. Faz-se então a separação da areia em peneiras de 0,053 mm e secagem em estufa da suspensão de argila coletada com pipeta. (EMBRAPA, 1997).

### **Análises Geoestatísticas**

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da utilização da geoestatística na análise da distribuição espacial dos dados coletados na bacia hidrográfica, foi realizada a análise exploratória dos dados (AED). Nesta, avaliaram-se gráficos de tendência, presença de dados discrepantes (“outliers”) por meio de gráficos “boxplot” e normalidade dos dados (MELLO et al., 2008; MELLO, 2004).

A partir da análise exploratória dos dados aplicou-se o modelo exponencial pelo método de ajuste dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). Para a avaliação da qualidade do ajuste do modelo quantificou-se o grau de dependência espacial (GD), e também o erro médio reduzido (EMR), o desvio padrão do erro reduzido (SER) e erro médio percentual (EMP) gerados no procedimento de validação cruzada. O GD foi obtido pela razão entre a variância estrutural ( $C$ ) e o patamar ( $C+C_0$ ), conforme Equação 8:

$$GD = \left( \frac{C}{C + C_0} \right) \times 100 \quad (8)$$

O GD pode ser classificado como fraco se este for menor que 25%, moderado se estiver entre 25% e 75%, e forte caso seja maior que 75%. (CAMBARDELLA et al., 1994)

De acordo com Mcbratney e Webster (1986), o EMR é definido como:

$$EMR = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Z_{xi} - \hat{Z}_{xi})}{\sigma(\hat{Z}_{xi})} \quad (9)$$

em que  $n$  é o número de dados,  $Z_{xi}$  o valor observado no ponto  $i$ ,  $\hat{Z}_{xi}$  o valor predito por krigagem no ponto  $i$  e  $\sigma(\hat{Z}_{xi})$  o desvio padrão da krigagem no ponto  $i$ , ambos sem se considerar a observação  $Z(x_i)$ .

Obteve-se o desvio padrão do erro reduzido através da seguinte expressão:

$$SER = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|Z_{xi} - \hat{Z}_{xi}|}{\sigma(\hat{Z}_{xi})} \quad (10)$$

A magnitude do erro da estimativa produzido pelo modelo foi quantificada por meio do erro percentual médio (EPM), o qual pode ser expresso como:

$$EPM(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{Z}_{xi} - Z_{xi}|}{Z_{xi}} \cdot 100 \quad (11)$$

Para realização da análise exploratória dos dados e modelagem dos semivariogramas, foi utilizado o software R (R Development Core Team, 2017), com o pacote geoR (Ribeiro Júnior e Diggle, 2016) e para a geração dos mapas de umidade do solo, aplicou-se o interpolador geoestatístico krigagem ordinária, trabalhando-se com uma extensão do ArcMap, do software ArcGIS9.2® (ESRI, 2004).

Para as situações em que não se observou dependência espacial, as variáveis foram mapeadas com base no Inverso do Quadrado da Distância (IQD).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise da semivariância

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do modelo de semivariograma exponencial ajustados pelo método MQP, bem como o grau de dependência espacial de cada variável e os resultados da validação cruzada (EMR, SER, EPM). A Figura 3 apresenta os semivariogramas ajustados para cada atributo.

A avaliação da estrutura de dependência espacial dos atributos do solo mostrou distintos comportamentos. Para os atributos Map,  $\theta_{PMP}$ , argila e areia foi obtido GD classificado como “forte” para as quatro profundidades avaliadas. Para  $D_p$ , P, Mip e k, foi obtido GD nas classes “forte” e “moderado”. O atributo  $D_s$ , por sua vez, apresentou GD fraco para as profundidades de 10 cm e 20 cm, e “moderado” para as demais. A MO apresentou GD “moderado” para todas as profundidades, com exceção da profundidade de 20 cm, para a qual GD foi “fraco”. O Silte apresentou efeito pepita puro em profundidade, porém a 20% de profundidade, foi verificada a dependência espacial com GD “moderado”.

Santos et al. (2013), estudando a variabilidade espacial de alguns atributos físicos e químicos do solo em diferentes profundidades em uma microbacia de Mata Atlântica na região da Mantiqueira, sul de Minas Gerais, verificou que a densidade do solo foi o atributo que mais apresentou diferenças espaciais em profundidade. Carvalho (2012), estudou a densidade do solo em área de cultivo de café em profundidades de até 60 cm, tendo encontrado efeito pepita puro para as profundidades de 20 cm e 30 cm. Em seu trabalho, Campos et al. (2013), analisando atributos físicos do solo verificou que o silte apresentou efeito pepita puro para as camadas 0,0 – 0,20m e 0,40 – 0,60 m de profundidade. Souza et al. (2016) encontraram que  $\theta_{PMP}$  apresentou forte grau de dependência espacial, podendo ser interpolados através dos método de krigagem com erros muito pequenos.

O comportamento distinto da continuidade espacial de cada atributo do solo, pode estar relacionado à ocorrência de classes distintas e aos múltiplos usos do solo. As classes de solo distintas conferem ao solo características diferentes, assim como, os diversos usos do solo encontrados na bacia, modificam diferentemente a estrutura e as condições dos atributos do solo. Sendo assim, a variabilidade espacial dos diferentes atributos do solo pode sofrer variações.

Com relação aos alcances dos semivariogramas, em geral, todos os atributos apresentaram alcances superiores à distancia média (80m) entre as amostras. Considera-se,

portanto que a geoestatística conseguiu estimar os valores dos atributos estudados nas regiões não amostradas. As exceções se dão para os atributos P a 10 e 20 cm de profundidade, MO a 30 cm e Map a 20 e 40 cm de profundidade, para os quais o alcance foi menor que a distância média entre amostras.

A partir da análise da validação cruzada, a magnitude dos erros pôde ser avaliada. Verificou-se a partir dos valores de EPM que os modelos subestimaram ligeiramente os resultados para todos os atributos e em todas as profundidades. No geral, as subestimativas foram inferiores a -10%. As maiores subestimativas foram para Map a 10 e 40 cm de profundidades que chegaram a -20% e -17,5% respectivamente. Ressalta-se que o atributo k apresentou valores demasiadamente altos para EPM, variando de -5713% até -21298%. Constata-se, portanto que para este atributo, os erros da krigagem oriundos do processo de krigagem são muito altos, embora os modelos tenham apresentado forte ou moderado grau de dependência espacial. Todos os modelos apresentaram EMR próximos de 0, revelando o bom ajuste do modelo para efeitos de krigagem. Bom desempenho também foi verificado pela estatística SER, tendo sido obtidos valores próximos de 1.

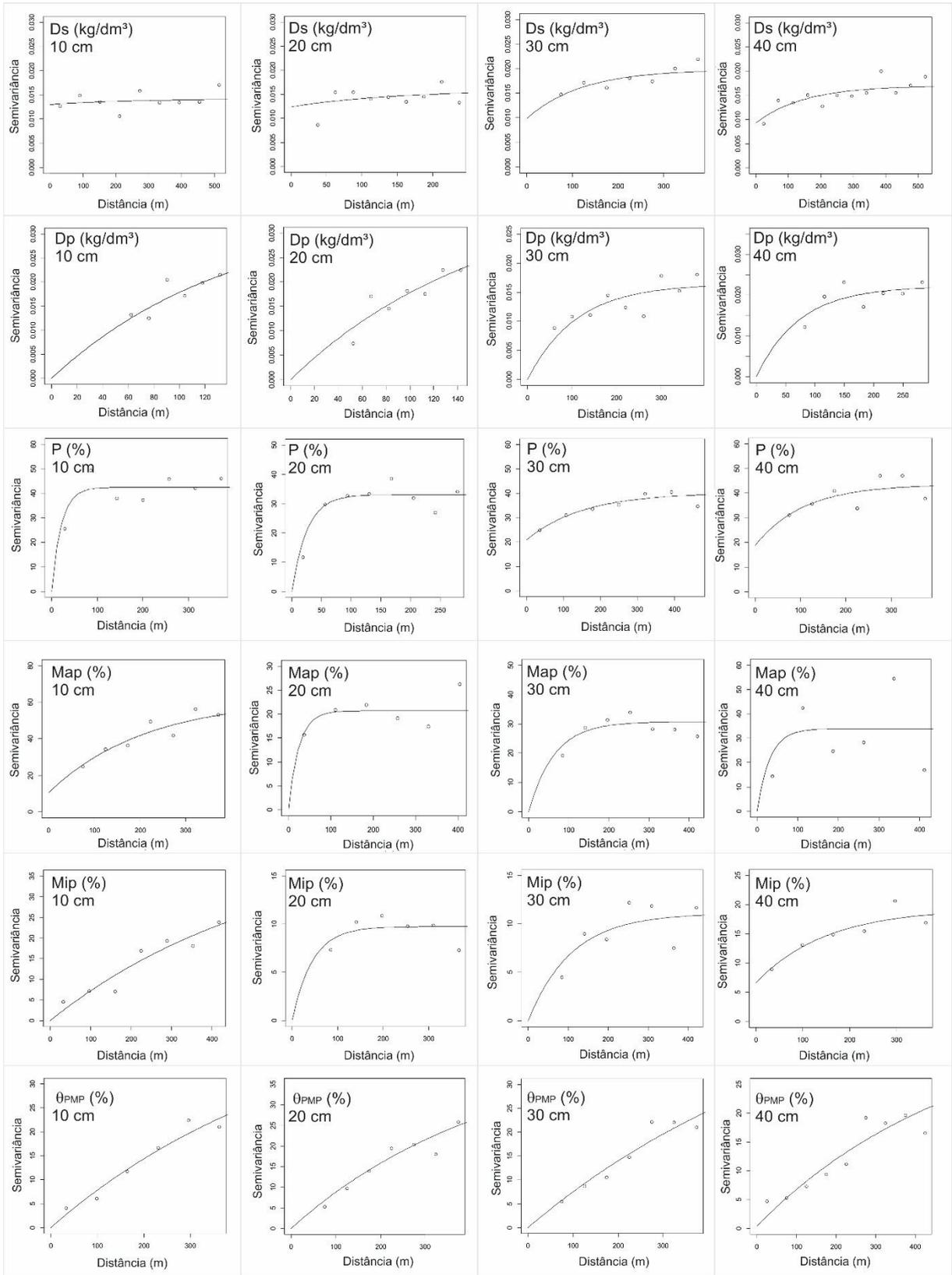
**Tabela 1** – Parâmetros dos semivariogramas dos atributos físico-hídricos do solo ajustados pelo modelo exponencial pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP).

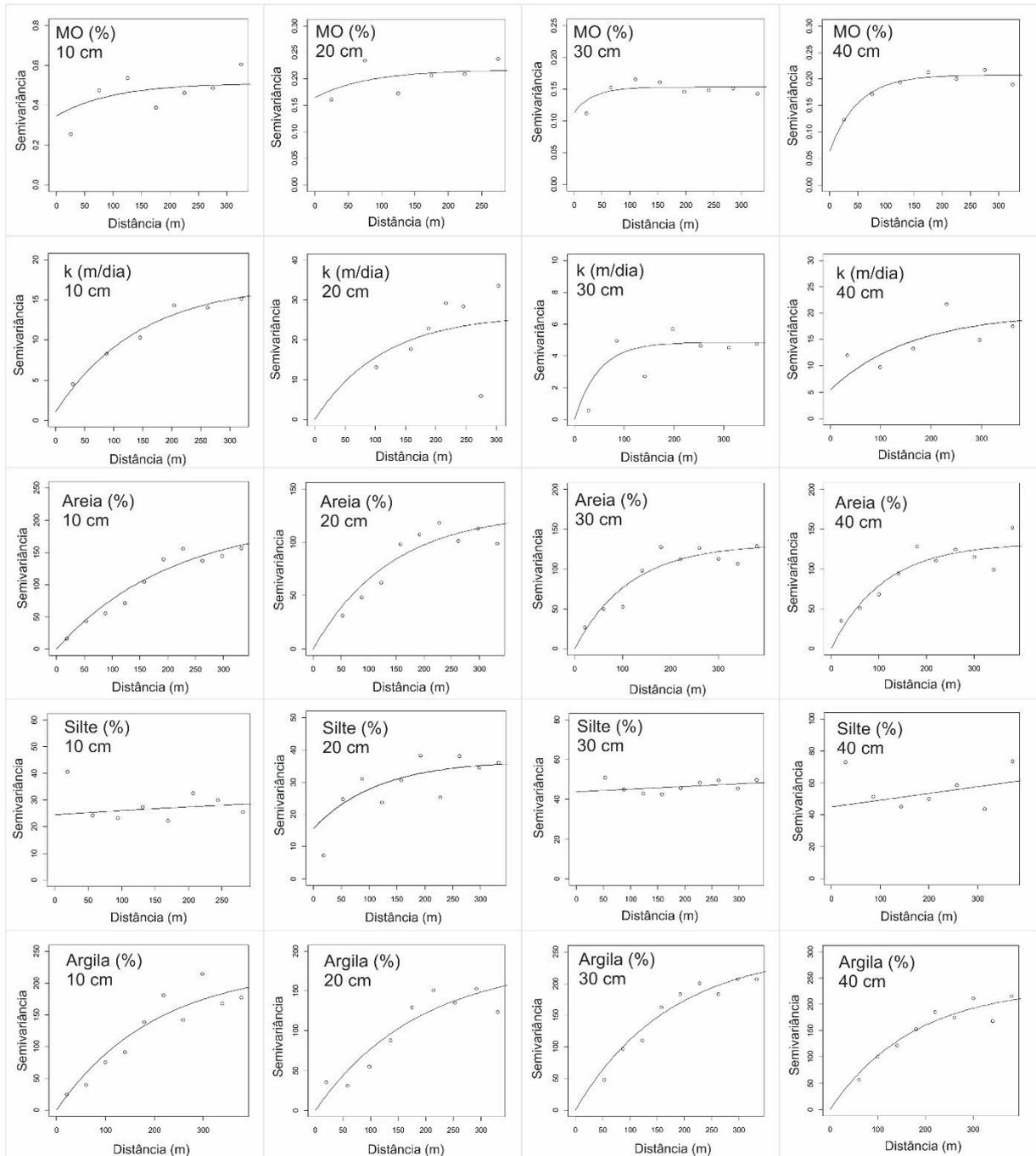
Atributo	Prof. (cm)	Parâmetros			GD %	EMR	SER	EPM
		E. Pepita	Contribuição	Alcance (m)				
D <sub>s</sub>	10	0,015	0,00	250,0	10,6	0,0005	1,0	-0,8
	20	0,01	0,00	150,0	22,5	0,0008	0,9	-0,6
	30	0,0056	0,010	150,0	65,0	0,0002	1,1	-0,5
	40	0,01	0,01	150,0	45,0	0,0015	1,1	-0,7
D <sub>p</sub>	10	0,00	0,04	140,8	100,0	-0,0005	1,7	-0,3
	20	0,00	0,04	163,2	100,0	-0,0113	1,5	-0,3
	30	0,01	0,01	120,0	50,5	0,0004	1,2	-0,3
	40	0,00	0,02	73,7	100,0	-0,0018	1,3	-0,3
P	10	0,00	42,48	21,0	100,0	-0,0056	1,0	-2,5
	20	0,00	33,06	25,2	100,0	-0,0037	1,0	-1,8
	30	20,92	19,35	153,2	48,0	0,0001	1,0	-1,6
	40	18,77	24,82	107,5	56,9	-0,0006	1,1	-1,8
Map	10	10,49	51,42	213,0	83,1	-0,025	1,2	-20,0
	20	0,00	20,66	24,5	100,0	0,000	1,1	-12,8
	30	0,00	30,71	63,3	100,0	-0,020	1,4	-15,5
	40	0,00	33,90	31,0	100,0	-0,003	1,0	-17,5
Mip	10	0,00	43,81	556,2	100,0	0,063	1,1	0,4
	20	0,00	9,75	44,4	100,0	-0,008	1,1	-1,0
	30	0,00	11,10	108,3	100,0	-0,024	1,1	-0,9
	40	6,60	12,72	149,2	65,8	-0,011	1,0	-1,7
θ <sub>PMP</sub>	10	0,00	48,08	563,9	100,0	0,017	0,9	-2,1
	20	0,00	44,60	455,7	100,0	0,019	1,2	-2,9
	30	0,00	55,86	692,6	100,0	-0,025	1,2	-4,6
	40	0,41	36,16	516,6	98,9	-0,007	1,2	-6,7
MO	10	0,35	0,17	100,0	32,3	0,000	1,1	-12,6
	20	0,16	0,05	80,0	24,3	-0,001	1,0	-9,4
	30	0,11	0,04	35,0	26,0	0,000	1,0	-11,1
	40	0,06	0,14	50,4	69,7	-0,005	1,0	-24,6
k	10	1,08	15,96	143,9	93,7	-0,0163	0,9	-5713,2
	20	0,00	26,45	112,4	100,0	-0,0685	1,6	-8724,9
	30	0,00	4,85	48,3	100,0	-0,0589	0,9	-9242,3
	40	5,51	14,53	163,5	72,5	-0,0100	1,2	-21298,4
Areia	10	0,00	287,23	342,1	100,0	-0,005	1,0	-2,2
	20	0,00	128,19	139,8	100,0	-0,012	0,8	-2,7
	30	0,00	131,41	114,8	100,0	-0,005	0,7	-2,5
	40	0,00	132,50	110,2	100,0	-0,004	0,9	-4,3
Silte	10	*	*	*	*	*	*	*
	20	15,61	21,15	116,0	57,5	0,007	1,1	-7,3
	30	*	*	*	*	*	*	*
	40	*	*	*	*	*	*	*
Argila	10	0,00	235,65	255,1	100,0	0,003	1,0	-4,9
	20	0,00	185,89	186,5	100,0	-0,018	1,0	-6,3
	30	0,00	252,98	173,3	100,0	0,008	1,0	-9,7
	40	0,00	234,41	173,7	100,0	-0,020	1,1	-9,3

\*Efeito Pepita puro

Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 3** – Semivariogramas dos atributos físico-hídricos do solo para as profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm do solo.



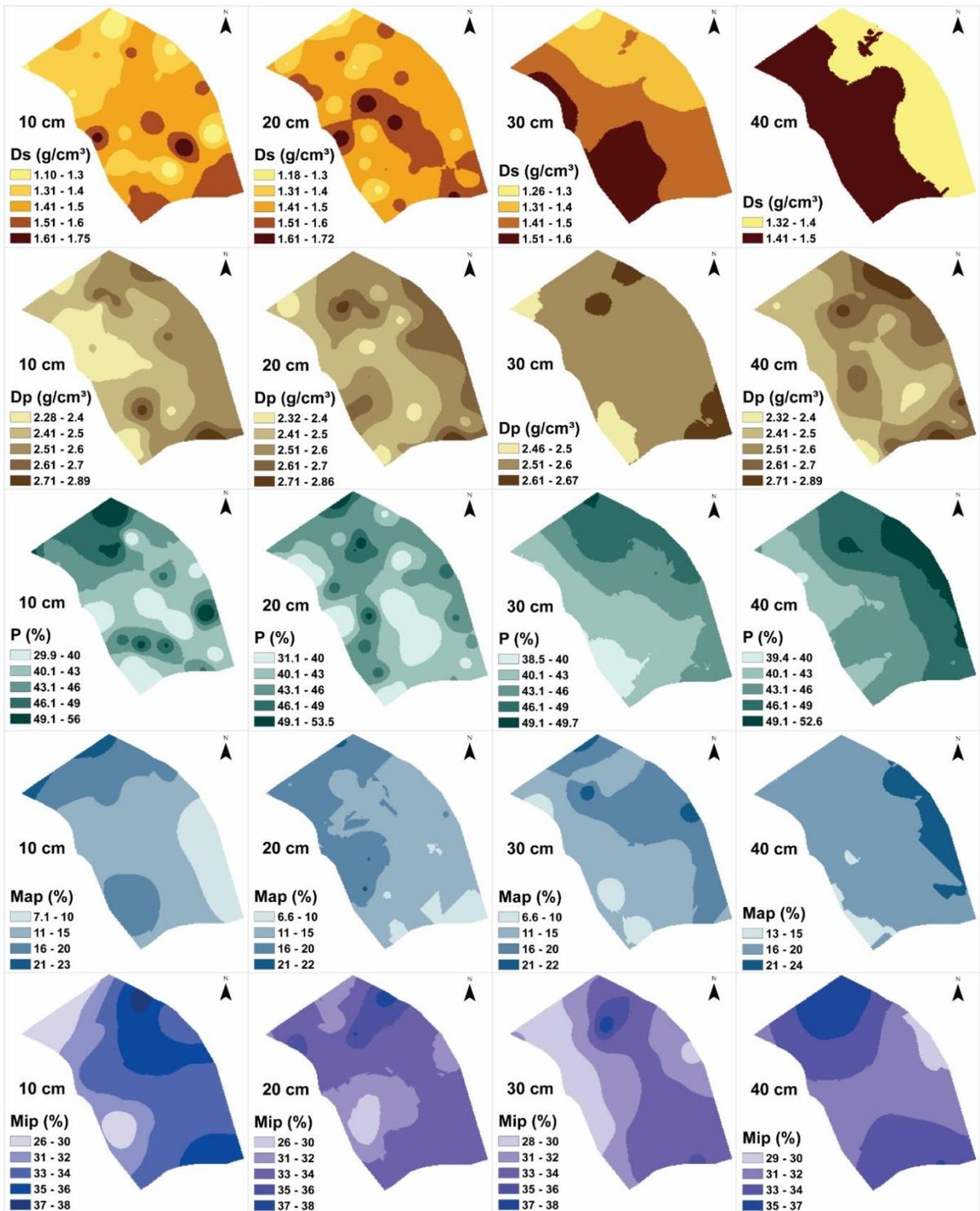


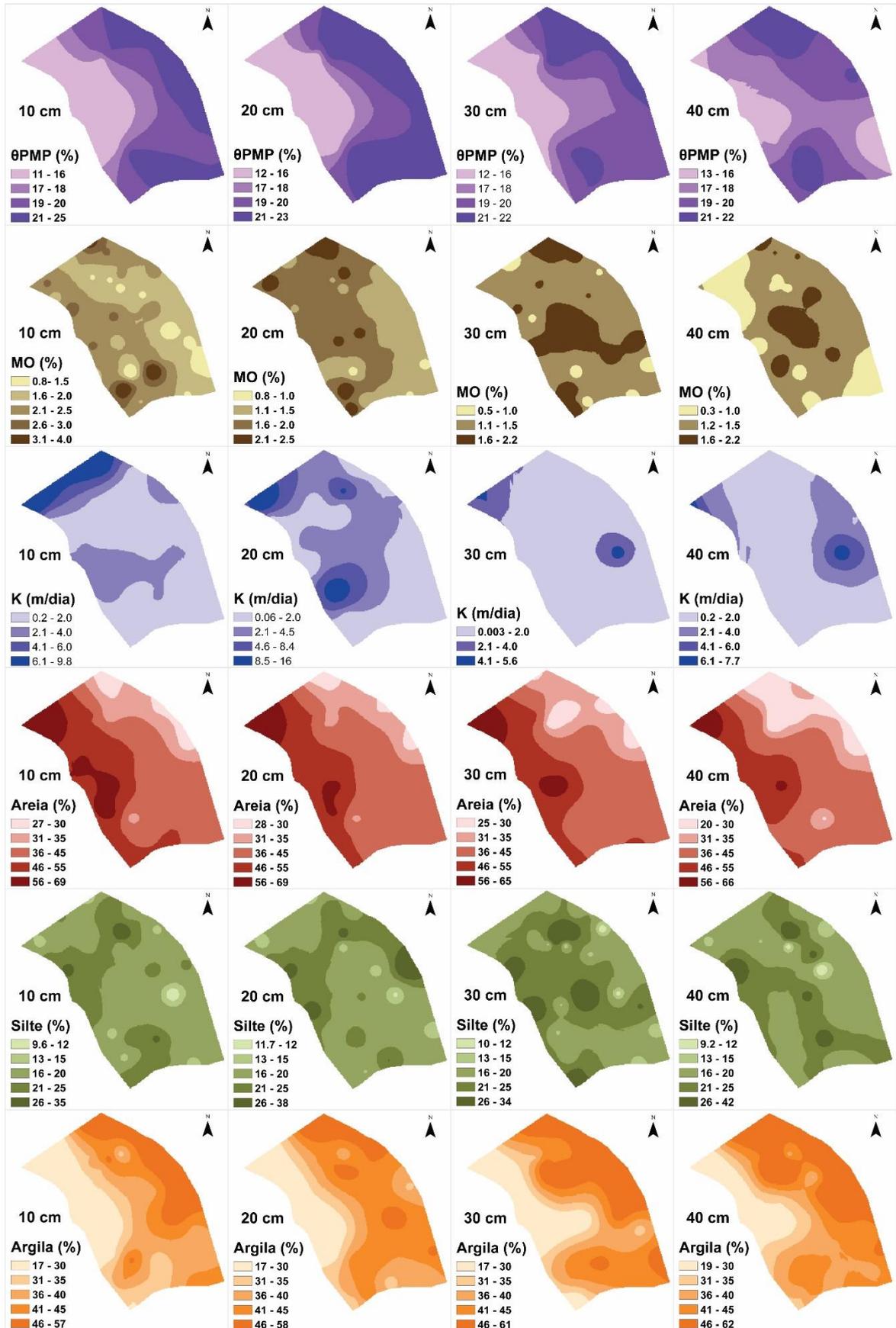
Fonte: Do Autor (2018)

### Mapeamento dos atributos físico-hídricos

A Figura 4 apresenta os mapas produzidos para os atributos físico-hídricos  $D_s$ ,  $D_p$ ,  $P$ ,  $Map$ ,  $Mip$ ,  $\theta_{PMP}$ , e teores de areia, silte e argila do solo e MO para as profundidades de 10 cm, 20 cm 30 cm e 40 cm.

**Figura 4** – Mapas dos atributos físico-hídricos do solo para as profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm.





Fonte: Do Autor (2018)

Analisando os mapas, verificou-se que a MO diminui com a profundidade em toda a área da bacia. A 10 cm de profundidade, a matéria orgânica variou de 0,8% a 4,0%. Atingiu seu percentual máximo de 2,5% a 20 cm de profundidade, e de 2,2% nas profundidades de 30 cm e 40 cm. Este fato está em conformidade com o explicado por Gazolla et al. (2015), que descreve que independentemente do sistema de manejo avaliado, ocorre uma redução nos teores de carbono orgânico total em profundidade. Esse efeito é decorrente da menor exposição dessas camadas a ação dos organismos decompositores da matéria orgânica do solo associado ao menor aporte. Embora seja verificada grande variabilidade espacial nos mapas, de maneira geral, percebe-se a existência de relação entre o uso do solo e o teor de matéria orgânica, sobretudo nas profundidades de 10 cm e 20 cm. Nessas profundidades as regiões de maior teor de matéria orgânica foram observadas na área de FESM. De acordo com Bertoni e Lombardi Netto (1993), a MO no solo é responsável por manter os agregados do solo preservando sua porosidade. Sendo assim, e de acordo com Cheng, Lin e Lu (2002) e Sylvain et al. (2015), solos sob floresta geralmente apresentam alta porosidade, especialmente, macroporosidade.

Observou-se que uso do solo tem influência na porosidade. Enquanto, os maiores valores de P foram encontradas na área de floresta, os menores ocorreram nas áreas de cultura anual e café. Verificou-se ainda que há maior variação de P nas duas profundidades mais superficiais quando comparadas às profundidades de 30 e 40 cm. Principalmente nas duas camadas mais próximas à superfície (10 cm e 20 cm), os maiores valores de Map (16 a 23%) foram observados na área de FESM. Como descrito anteriormente, esta é a região em que as análises indicaram maior teor de MO, que é um atributo que promove a melhor estruturação do solo e propicia maior Map. Nas maiores profundidades, observa-se a expansão da classe de porosidade (16 a 20%) na totalidade da área, não sendo notada a influência do uso do solo na Map. Observando os mapas de Mip, principalmente a 10 cm de profundidade, verifica-se os menores valores nas regiões noroeste e sudoeste da bacia, onde ocorrem FESM e café. Nas demais profundidades e independentemente do uso do solo, observou-se a expansão das classes maiores de valores de MIP ( $MIP > 33\%$ ) em toda a área. Ressalta-se que, quanto maior a proporção de micro em relação aos macroporos de um solo, menor é a infiltração de água, pois de acordo Cheng, Lin e Lu (2002), e Sylvain et al. (2015), os macroporos são responsáveis pela redistribuição da água, enquanto que os microporos são responsáveis pelo seu armazenamento.

De acordo com Carvalho et al. (2011) a  $P$  tem relação inversamente proporcional com a  $D_s$ . Sendo assim quanto maior  $P$ , menor é a  $D_s$  do solo. Segundo Ferreira (2010) e Pádua et al. (2015), em solos não cultivados, a  $D_s$  geralmente apresenta variações naturais decorrentes das diferenças na estrutura do solo, como a macro e microporosidade, que por sua vez são função da textura, do teor de matéria orgânica e da mineralogia do solo. Neste contexto, e em se tratando de  $D_s$ , os mapas mostraram que, principalmente nas profundidades de 10 cm e 20 cm, este atributo sofre influencia do uso do solo. Os maiores valores de  $D_s$  se concentraram nas áreas destinadas a cultura anual sob plantio convencional e cultivo de café. Em algumas regiões, os valores chegaram a atingir  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ . Ali ocorrem Latossolos e Argissolos e os valores encontrados estão um pouco acima do que é descrito para solos com alto teor de argila. Segundo Timm e Reichardt (2004), Libardi (2005) e Carvalho et al. (2011), solos arenosos apresentam  $D_s$  superior a dos solos argilosos, enquanto os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de  $1,3$  a  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto em solos argilosos esta variação pode ir de  $0,9$  a  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  (CARVALHO et al., 2011). Já de acordo com Fernandes, Ripoli e Millan (1983), em Latossolo Vermelho,  $D_s$  superior a  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  pode prejudicar a absorção de nutrientes pelas plantas. Em contrapartida os menores valores de  $D_s$  se concentraram na região noroeste da bacia, onde se encontra a FESM. Esta região abrange Cambissolos, Gleissolos e Argissolos. Nas análises de textura foi verificado que esta região tem alto teor de areia. Os menores valores variaram de  $1,1 \text{ g cm}^{-3}$  a  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ . Assim, embora ali ocorra as maiores frações de areia, a ocorrência dos menores valores de  $D_s$  podem ser justificados pelos maiores valores de  $P$ , Map e MO, que atuam no sentido de reduzir a  $D_s$ .

Na área de FESM também ocorreu a menor  $D_p$  na bacia, sendo de  $2,3 \text{ g cm}^{-3}$ . De acordo com INGARAMO (2003), a  $D_p$  pode ser influenciada por fatores como o teor de matéria orgânica e características do material de origem do solo. Dentre os principais minerais, a densidade varia de  $2,2$  a  $3 \text{ g cm}^{-3}$ , com um valor médio de  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ . Por outro lado, para matéria orgânica, varia entre  $1,3$  e  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ . Como a  $D_p$  tem grande relação com a composição mineralógica do solo (FORSYTHE, 1975), os resultados anteriores de MO justificam a ocorrência de menor  $D_p$  na área de FESM.

A distribuição espacial das frações areia, silte e argila estão relacionadas à ocorrência de cada unidade pedológica na bacia. Na região de predominância de Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, onde os usos do solo predominantes são culturas anual e perene, foram encontrados os maiores percentuais de

argila da bacia, que variaram de 36% a 62%. Essa mesma região apresentou os menores percentuais de areia, variando de 20% a 45%. Em contrapartida, a região com predominância de Cambissolo Háplico, Gleissolo Háplico, Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho, que ocorrem na região de FESM, foi a região que apresentou maior teor de areia e o menor teor de argila. Assim como o descrito por Lima et al. (2014) e Kitamura et al. (2007), a textura do solo interfere na capacidade de armazenamento, sendo que os solos argilosos apresentam faixa mais ampla de umidade, enquanto nos arenosos esta é mais estreita. Neste contexto, verifica-se a importância da ocorrência da FESM para a região de Cambissolos e Gleissolos que apresentaram alto teor de areia e conseqüentemente menor capacidade de armazenamento de água. As modificações das propriedades físico hídricas do solo, devido a presença da FESM são importantes, pois, de acordo com Junqueira Júnior et al. (2017), o maior teor de MO encontrado neste ambiente, e a cobertura superficial do solo pela serapilheira criam um ambiente mais estável e que propicia menores oscilações dos valores de umidade ao longo do ano.

Quanto à condutividade hidráulica, verificou-se que a região de maior  $k$  se concentrou no extremo norte-noroeste da bacia. Essa região é ocupada por FESM e tem como unidades pedológicas predominantes o Cambissolo e o Gleissolo. Essas unidades pedológicas apresentam textura mais arenosa e, sendo esta a região que apresentou menor  $D_s$  e maiores MO, P, e Map, fica explicada a ocorrência de maiores valores de  $k$  nesta região. Esses fatores favorecem maior estruturação do solo e conseqüentemente favorecem a movimentação de água no meio poroso. Em contrapartida, as áreas destinadas às culturas anual e perene, que estão localizadas em região de Latossolos e Argissolos, apresentaram menores valores de  $k$  ( $\leq 2,0 \text{ m dia}^{-1}$ ). O fato pode ser explicado pela ocorrência da maior  $D_s$ , menor P e Map, além de maiores valores de Mip.

Com relação a  $\theta_{PMP}$ , observou-se que este atributo não apresenta grande variação em profundidade. Porém, observou-se que os menores valores ocorreram na região noroeste da bacia, onde se encontra a FESM e também ocorrem os Cambissolos e Gleissolos. Em contrapartida, a ocorrência dos maiores valores de  $\theta_{PMP}$  (11 a 16%) se deu na região onde ocorre o cultivo das culturas perene e anual (regiões do sul, sudeste e nordeste da bacia) e onde se observa a predominância de Latossolos e Argissolos.

Diante desses resultados, evidencia-se a importância da relação entre o uso do solo e a variabilidade de ocorrência dos atributos físico-hídricos do solo em uma bacia hidrográfica, e seus impactos nos processos hidrológicos que ocorrem na bacia. Assim como exposto, a

presença da FESM na bacia, proporciona uma área de grande potencial para a infiltração. As características dos atributos  $D_s$ , P, Map associados a MO proporcionada pela presença da FESM confere ao solo uma estrutura que favorece a movimentação da água no perfil. Somando a isso, têm-se ainda as próprias características dos Cambissolos e Gleissolos, que são unidades pedológicas encontradas nesta região. Estas, por apresentarem maior teor de areia em suas constituições também favorecem a infiltração de água. Todos estes fatores juntos justificam a ocorrência da região de maior k nesta área. Os resultados ainda possibilitaram verificar que nas áreas destinadas a outros usos como cultivo anual e perene, o solo, em decorrência de ações antrópicas está sujeito a modificações em seus atributos físico-hídricos. As análises mostraram que nestas áreas o menor teor de MO, associados com a maior  $D_s$  decorrentes das atividades relacionadas ao cultivo, resultam em um solo com menor P e Map. O solo apresentou maior  $Mip$ , que favorece o armazenamento de água, diferentemente da maior Map encontrada na área de FESM e que favorece a movimentação da água e consequente recarga do aquífero.

## CONCLUSÕES

Os elevados valores de GD dos atributos permitiram produzir mapas dos atributos físico-hídricos do solo através da krigagem ordinária, salvo aqueles atributos (silte e MO,  $D_s$  (10 cm e 20 cm), P (10 e 20 cm)) em que a dependência espacial não foi verificada, ou que obteve-se fraco GD. Nestas situação a aplicação do interpolador Inverso do Quadrado da Distância, possibilitou o mapeamento dos atributos e uma melhor compreensão de sua ocorrência na bacia.

Os resultados do mapeamento dos atributos físico hídricos mostraram a importância da presença da FESM para os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica, quando se verificou que esta proporciona ao solo uma estrutura que favorece a infiltração de água. Por outro lado, foi também verificado, que nas áreas destinadas aos cultivos anual e perene, os altos valores  $D_s$  e  $Mip$ , e baixos valores de P, Map e k, conferem a estes usos do solo condições desfavoráveis à infiltração de água no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1993. 355 p.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; NOVAK, J.M.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. et al. Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 119-128, 2013.

CAMPOS, Milton César Costa et al. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. **Comunicata Scientiae**, p. 168-178, 2013. (B)

CARVALHO, Laércio A. et al. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 15, n. 9, 2011.

CARVALHO, Luis Carlos Cirilo. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café**. 2012. 60 p. Dissertação (mestrado). 2012.

CHENG, J. D.; LIN, L. L.; LU, H. S. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 165, n. 15, p. 11-28, July 2002.

CURI, N.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; MENEZES, M. D. de. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras: Editora UFLA, 1ª edição, 148p, 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p

ESRI - Environmental Systems Research Institute. ArcGIS 9: **Getting started with ArcGIS**. Redlands: 2004. 265p.

FERNANDES, J.; Ripoli, T. C.; Millan, M. A. A compactação do solo e a brotação das soqueiras. **Álcool & Açúcar**, v.3, p.12-17, 1983.

FERREIRA, MM. Caracterização física do solo. In: Jong van Lier Q, editor. Física do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**; 2010. p.1-27.

FORSYTHE, W. **Física de suelos**. Costa Rica: IICA, 1975. 212 p.

GAZOLLA, Paulo Roberto et al. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, 2015.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.169-177. 2005.

GREGO, C. R.; COELHO, R. M.; VIEIRA, S. R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 337-350, abr. 2011.

INGARAMO, O. E. Indicadores físicos de la degradación del suelo. La Coruña, Universidade da Coruña, 2003. 298p. Tese de Doutorado.

JUNQUEIRA JUNIOR., J. A. et al. Time-stability of soil water content (SWC) in an Atlantic Forest-Latosol site. **Geoderma**, v. 288, p. 64-78, 2017.

KITAMURA, Aline Emy; PASSOS E CARVALHO, Morel de; ROCHA LIMA, Cesar Gustavo da. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, 2007.

Libardi, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: USP, 2005. 335p.

LIMA, J. E. F. W & SILVA, E.M. da. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **Bras. Rec. Hídric**, v. 17, p. 23-32, 2012.

LIMA, Julião Soares Souza et al . Distribuição espacial das frações granulométricas argila e areia total em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Rev. Árvore**, Viçosa , v. 38, n. 3, p. 513-521, June 2014 .

LIMA, Franciezer Vicente et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, 2015.

MACHADO, E. L. M. et al. Efeitos do substrato, bordas e proximidade espacial na estrutura da comunidade arbórea de um fragmento florestal em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 287-302, 2008.

MCBRATNEY, A. G.; WEBSTER, A. G. Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, London, v. 37, n. 4, p. 617-639, 1986.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 110p. Tese Doutorado

MELLO, C. R.; Viola, M. R.; Mello, J. M.; Silva, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.2, p.532-539, 2008.

PÁDUA, E. J.; RIBEIRO GUERRA, A.; LOPES ZINN, Y.. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, 2015.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO JÚNIOR, Paulo J. and Diggle, Peter J. (2016). geoR: Analysis of Geostatistical Data. R package version 1.7-5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

SANTOS, Marcela de Castro Nunes et al. Spatial continuity of soil attributes in an Atlantic Forest remnant in the Mantiqueira Range, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 1, p. 68-77, 2013.

SOUZA, Joabe Martins et al. VARIABILIDADE ESPACIAL DA CAPACIDADE DE CAMPO E PONTO DE MURCHA PERMANENTE EM ARGILOSO AMARELO COESO. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 5, p. 875, 2016.

SYLVAIN, J. M. et al. Comparison of the spatio-temporal variability of annual minimum daily extreme flow characteristics as a function of land use and dam management mode in Quebec, Canada. **Water**, Basel, v. 7, n. 3, p. 1232-1245, 2015.

TIMM, L. C.; Reichardt, K.; Oliveira, J. C. M.; Cassaro, F. A. M.; Tominaga, T. T.; Bacchi, O. O. S.; Dourado Neto, D.; Nielsen, D. R. State-space approach to evaluate the relation between soil physical and chemical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.49-58, 2004.

### CAPÍTULO 3

## **CONTINUIDADE ESPACIAL E ESTABILIDADE TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS**

**Spatial continuity and temporal stability of soil moisture in a small watershed of the Southern region of Minas Gerais.**

### **RESUMO**

O entendimento do comportamento das variabilidades espacial e temporal da umidade do solo é fundamental para o estudo dos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Do ponto de vista do manejo de bacias hidrográficas, o entendimento destes comportamentos pode subsidiar práticas que visem à conservação do solo e dos recursos hídricos. Dentre os fatores intervenientes relacionados com a umidade do solo destacam-se fatores físicos, climáticos e sobretudo as condições de uso e ocupação do solo. No que concerne ao mapeamento da umidade do solo, a geoestatística tem sido amplamente utilizada, possibilitando a averiguação do espaçamento de amostragem adequado, reduzindo os custos de operação e trabalhos de campo. Já no contexto da análise temporal, técnicas estatísticas possibilitam o estudo da estabilidade e representatividade dos pontos amostrais. Neste contexto objetivou-se avaliar o comportamento espacial e temporal da umidade do solo em uma pequena bacia hidrográfica localizada na região Sul de Minas Gerais, ao longo de um ano hidrológico completo. Nesta bacia ocorre Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), culturas anual e perene, estradas e vegetação primária, sob Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos. O modelo de semivariograma exponencial foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados ponderados e foi qualificado pelo grau de dependência espacial e validação cruzada. Para 96% dos eventos foi obtido forte grau de dependência espacial. Verificou-se gradiente crescente da umidade do solo da superfície em direção às maiores profundidades. Identificou-se uma região de menor umidade no nordeste da bacia, na qual prevalecem Cambissolo Háplico e Gleissolo Háplico, alta declividade e FESM. Neste local além da elevada demanda evapotranspirométrica, ocorrem características físico-hídricas do solo que favorecem a drenagem, tais como maiores condutividade hidráulica e teor de matéria orgânica, e menores densidade do solo e teor de argila. Isto evidencia que neste local há elevada mobilidade da água no solo, explicando os reduzidos valores de umidade do solo na camada monitorada ao longo do ano. Já os maiores valores de umidade do solo se concentraram na região sudeste da bacia, de maior altitude, menor declividade, onde ocorrem Latossolos e cultura anual. Neste local há maiores densidade do solo e teor de argila, e menores condutividade hidráulica e teor de matéria orgânica, propiciando menor mobilidade à

lâmina infiltrada, e assim, conferindo maior umidade na camada estudada ao longo do tempo. Através da análise da estabilidade temporal, verificou-se que há estabilidade temporal em profundidade e que esta é maior na superfície do solo. Foram identificados os pontos mais representativos da umidade do solo para cada profundidade, estando todos no uso do solo caracterizado por FESM. Sendo assim, os resultados indicam a importância do monitoramento contínuo da umidade do solo e da conservação de ambientes naturais para o entendimento de processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica ao longo do ano hidrológico, sobretudo identificação de áreas de maior e menor umidade na bacia, que relacionadas ao conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo podem contribuir para adoção de práticas de manejo e conservação do solo, além da identificação de pontos representativos da umidade média da bacia.

**Palavras-chave:** Hidrologia. Geoestatística. Uso do Solo

## ABSTRACT

The understanding of the behavior of soil moisture spatial and temporal variability is fundamental for the study of hydrological processes that occur in a watershed. To the watershed management, the understanding of these behaviors may support practices that aim the conservation of soil and water resources. Among the intervening factors related to soil moisture, physical, climatic and, above all, land use and occupation conditions stand out. As far as the soil moisture mapping is concerned, geostatistics has been widely used, making it possible to verify the adequate sampling spacing, reducing operating costs and field work. In the context of the temporal analysis, statistical techniques allow the study of the stability and representativeness of sampling points. The objective of this study was to evaluate the spatial and temporal behavior of soil moisture in a small watershed located in the southern region of Minas Gerais, during a complete hydrological year. In this watershed occurs Tropical Mountain Semideciduous Forest (FESM), annual and perennial crops, roads and primary vegetation, under Latosols, Argisols, Cambisols and Gleisols. The exponential semivariogram model was adjusted by the weighted least squares method, and it was qualified by the degree of spatial dependence and cross validation. For 96% of the events a strong degree of spatial dependence was obtained. There was an increasing gradient of soil moisture from the surface towards greater depths. It was identified a region of lower soil moisture content in the northeast of the watershed, in which Cambisol Haplic and Gleisol Haplic, high slope and FESM prevail. At this site, in addition to a high evapotranspirometric demand, there are soil physical-hydric characteristics of that favor water drainage, such as higher hydraulic conductivity and organic matter content, and lower soil density and clay content. This shows that in this site there is high water mobility in the soil, which explains the reduced values of soil moisture in the monitored soil layer throughout the year. On the other hand, the highest values of soil moisture were concentrated in the southeastern region of the watershed, with higher altitude and lower slope, where Latosols and annual crop occur. At this site there is higher soil density and clay content, and lower hydraulic conductivity and organic matter. As a result, it provides less mobility to the infiltrated lamina, thus causing higher moisture in the studied layer over time. Through the analysis of temporal stability, it was verified that there is temporal stability in depth, and that this is greater in the soil surface than in higher depths. The most representative points of soil moisture were identified for each depth, all of which were in the land use characterized by FESM. Thus, the results indicated the importance of continuous monitoring of soil moisture and natural environments conservation for the understanding of hydrological processes that occur in a watershed throughout the hydrological year. Especially, the identification of areas of higher and lower soil moisture content in the watershed, which related to the knowledge of soil physical-hydric attributes, can contribute to choosing soil management and conservation adequate practices, as well as the identification of representative points of the average moisture of a watershed.

**Keywords:** Hydrology, Geostatistics, Land Use

## INTRODUÇÃO

A umidade do solo é um componente hidrológico essencial para a compreensão de processos naturais como infiltração, recarga de águas subterrâneas, escoamento, erosão do solo e transporte de sedimentos (GAO et al., 2015 A,B). Segundo Ávila et al. (2010), a aplicação de estudos da umidade do solo na hidrologia é fundamental, especialmente para a calibração de modelos de simulação hidrológica.

Os efeitos combinados de condições atmosféricas, características do solo, material de origem do solo, topografia, uso do solo, vegetação e tempo estão diretamente relacionados com a umidade do solo. E também o uso do solo, que é um fator antrópico, e que exerce importante influência nos sistemas de raízes e fisiologia das plantas e também nas propriedades do solo, como densidade e porosidade (HU et al., 2009). Então, devido a exposta heterogeneidade dos fatores intervenientes, a umidade do solo é consideravelmente variável no tempo e espaço e sua caracterização ainda é um desafio para a ciência hidrológica (VERECKEN et al., 2007; ZUCCO et al., 2014)).

Nas últimas décadas, foram feitos grandes esforços para entender a dinâmica da umidade do solo em um contexto espacial, e para determinar fatores de controle e propriedades de escala (CORRADINI, 2014). Embora o comportamento da umidade possa apresentar considerável variabilidade em uma mesma unidade pedológica, o teor de água no solo é variável no espaço e no tempo devido à ação de diversos fatores, especialmente àqueles associados ao uso e manejo do solo (ÁVILA et al., 2010).

Ávila et al. (2011), avaliaram o padrão espacial e temporal da umidade volumétrica na camada superficial do solo em uma bacia hidrográfica experimental no Sul de Minas Gerais. Os autores verificaram a ocorrência de diferenças no padrão espacial da umidade do solo dependendo das estações do ano. Por sua vez, Junqueira Júnior et al. (2017), avaliaram a estabilidade temporal da umidade do solo em diferentes profundidades em um remanescente de floresta estacional semidecidual montana no Sul de Minas Gerais. Nesta ocasião, foi constatada menor variabilidade das estatísticas de estabilidade nas maiores profundidades amostradas. Os autores ainda observaram a ocorrência de maior estabilidade temporal nas áreas mais baixas do relevo e que esta se reduziu em direção às regiões mais elevadas. Foi concluído que as características topográficas afetaram a estabilidade e a identificação de pontos estáveis na área de estudo.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a continuidade espacial e a estabilidade temporal da umidade do solo em diferentes profundidades, em uma bacia hidrográfica localizada no campus da Universidade Federal de Lavras, Sul de Minas Gerais, durante um ano hidrológico completo. Por meio do mapeamento da umidade do solo na bacia ao longo do ano hidrológico, objetivou-se o entendimento da função exercida pelos diferentes solos e usos do solo presentes na bacia. Buscou-se, ainda, identificar pontos singulares e representativos da umidade do solo para a condição de monitoramento otimizado e reduzido por meio da análise da estabilidade temporal da umidade do solo na bacia.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

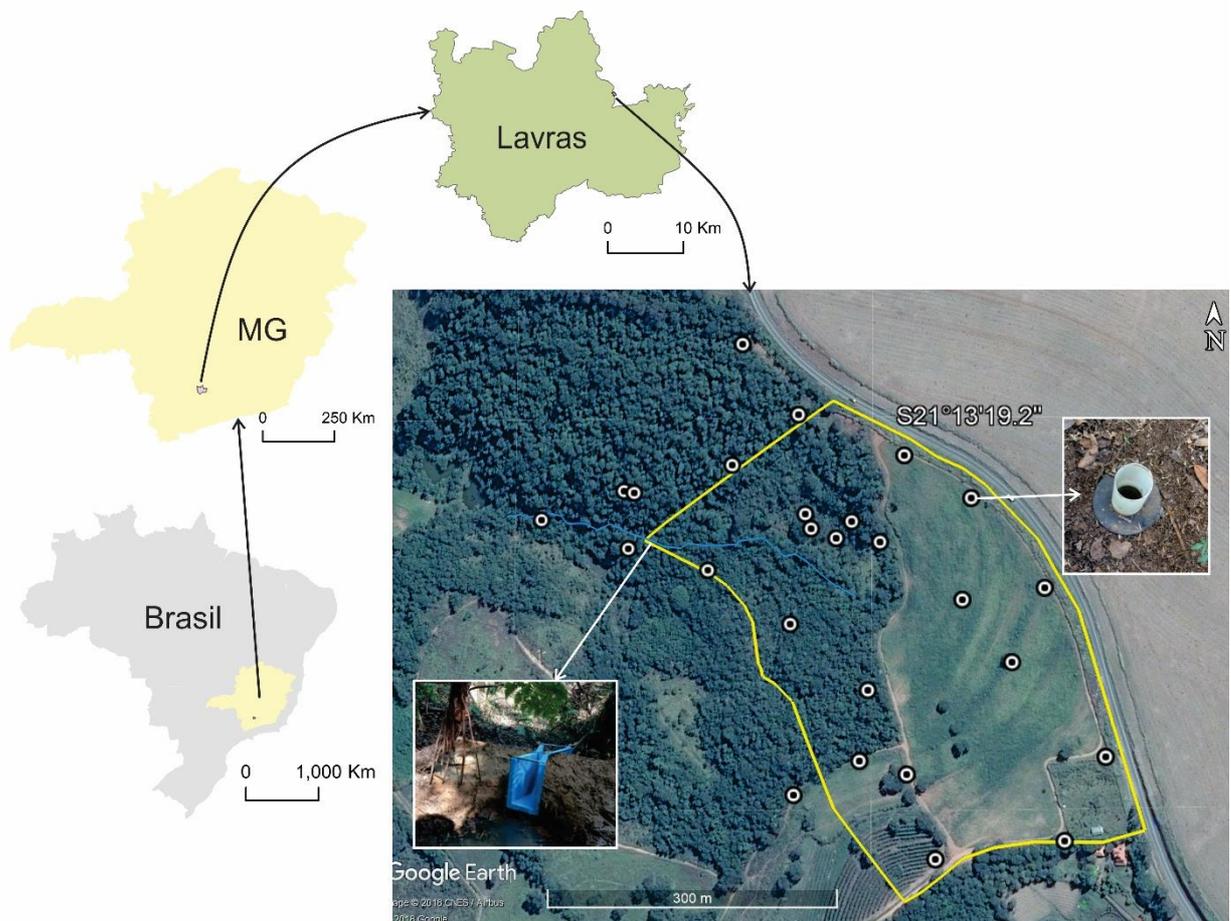
### **Caracterização da área de estudo**

A área de estudo (Figura 1) consiste de uma pequena bacia hidrográfica situada nas coordenadas de latitude  $21^{\circ}13'19''\text{S}$  e de longitude  $44^{\circ}57'35''\text{W}$ , no campus da Universidade Federal de Lavras, região sul de Minas Gerais. A área de drenagem é de 14 ha e a sua declividade média é 7,8%. A delimitação da bacia hidrográfica e da rede de drenagem foi realizada por levantamento *in loco*, com a utilização de equipamento GPS. Adotou-se como seção de controle um ponto a cerca de 50 metros a montante da confluência do curso d'água da bacia estudada com o curso d'água de maior ordem. A bacia em estudo faz parte do conjunto de tributários do Ribeirão Vermelho, que por sua vez, desagua diretamente no Rio Grande, 300 metros a jusante da ponte rodoferroviária de Ribeirão Vermelho, MG.

Também na Figura 1 estão apresentados os pontos de monitoramento da umidade do solo, que se deram nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm. O período de estudo contemplou o ano hidrológico compreendido entre outubro de 2016 e setembro de 2017. O monitoramento foi realizado com periodicidade quinzenal. O monitoramento foi realizado utilizando-se sondas de umidade do solo do tipo capacitivas, marca Delta-T devices Ltd. Ao todo foram instalados 26 tubos de acesso para medição sistemática da umidade do solo. A justificativa para adoção de um grid de monitoramento irregular, conforme pode ser observado na Figura 1, foi em razão da dificuldade de acesso no interior da bacia. Em razão disto aproveitaram-se as estradas presentes e também foram estabelecidos dois transectos na área de FESM, entre a seção de controle e as porções norte e sul da bacia. Já na área de

cultura anual, devido ao tráfego de máquinas agrícolas foi necessário posicionar os pontos de monitoramentos em locais limítrofes.

**Figura 1** – Localização da área de estudo com destaque para os pontos de monitoramento de umidade do solo.

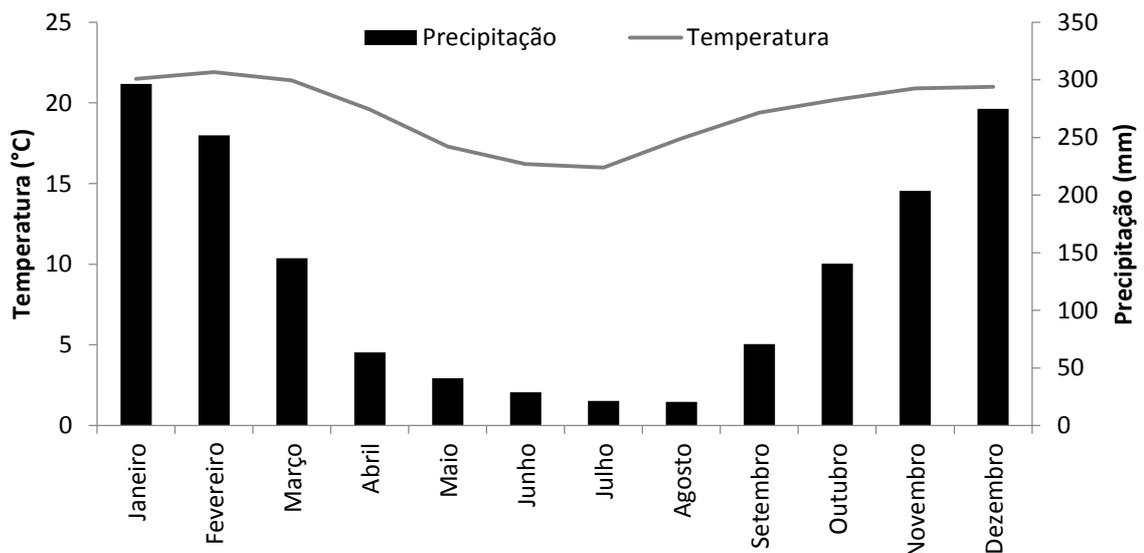


Fonte: Do Autor (2018)

O clima da região, pela classificação de Köppen é predominantemente Cwb, com os verões úmidos e quentes e invernos secos e frios (Alvares et al. (2013)). A Figura 2 apresenta as médias mensais de precipitação e temperatura segundo as Normais Climatológicas para Lavras no período de 1961-1990. Os dados meteorológicos de precipitação e evapotranspiração de referência para o período de outubro de 2016 a Setembro de 2017 foram obtidos junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes são provenientes da estação meteorológica convencional de Lavras, MG, localizada a 2 km da bacia hidrográfica

estudada. Como pode ser observado nesta figura o período de chuvas na região de Lavras se estende de outubro a março, que concentra 84,2% da precipitação anual. A maior parte da chuva anual se concentra no verão, sendo que entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro ocorre 52,8% da precipitação anual. Em abril a estiagem começa a ganhar força, atingindo o período seco crítico no inverno.

**Figura 2** – Médias mensais de precipitação e temperatura segundo as Normais Climatológicas para Lavras no período de 1961-1990.



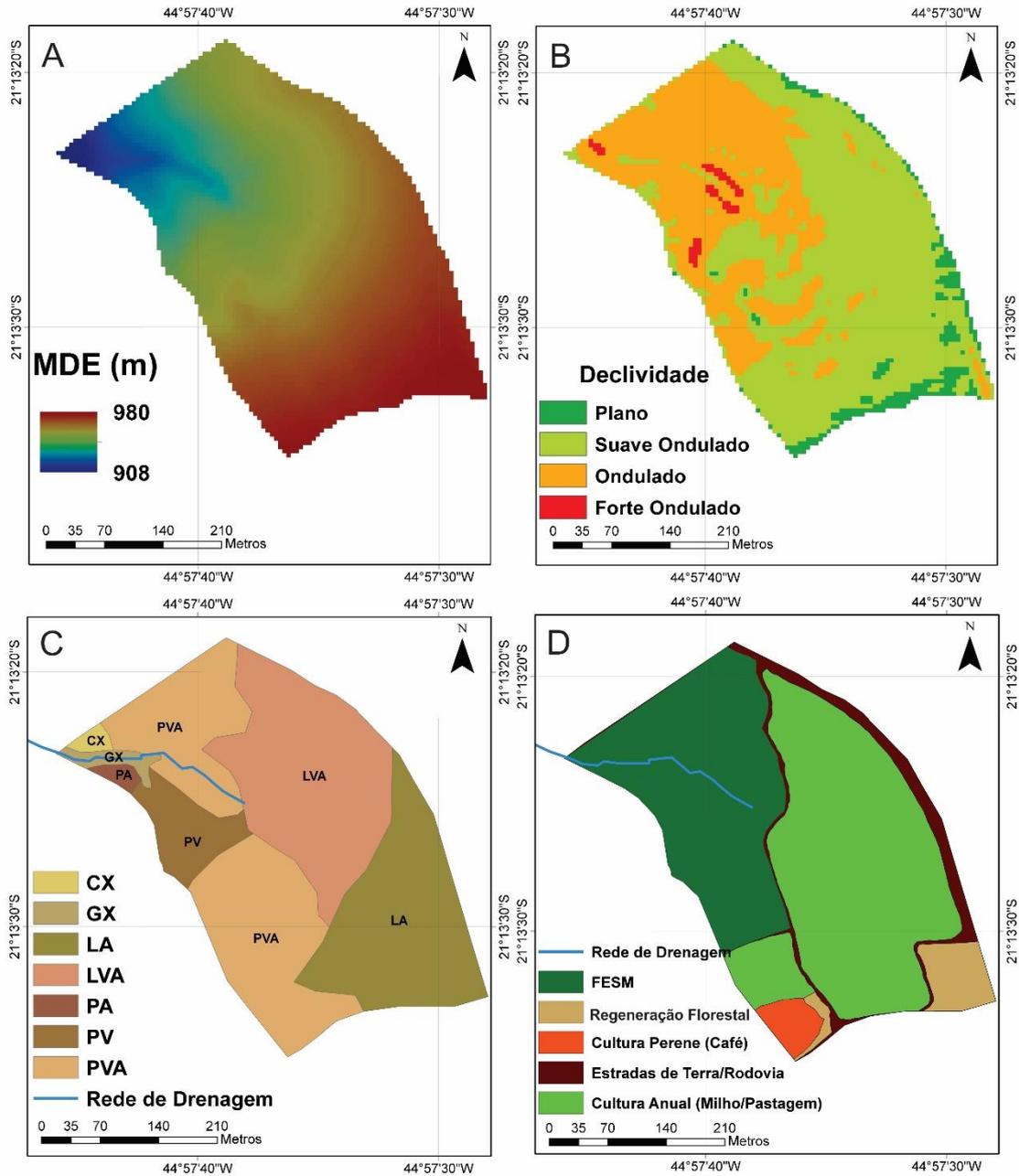
Fonte: Do Autor (2018)

A Figura 3A mostra o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica, com resolução de 5 metros. Verifica-se que a bacia tem uma variação altimétrica de aproximadamente 72 m. A Figura 3B traz as classes de declividade conforme Embrapa (1979). Observa-se predominância de relevo suave ondulado em 58% da área, seguido de relevo ondulado em 35% da área. Também se verifica a presença de relevo plano em 6% e a presença localizada de relevo fortemente ondulado em 1% da área da bacia. Na Figura 3C está apresentado o mapa de solos obtido por Curi, Silva e Menezes (2017), no qual verificam-se as seguintes unidades pedológicas e abrangências, respectivamente: Argissolo Vermelho (PVA) 35%, Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) 30%, Latossolo Amarelo (LA) 25%, Argissolo Vermelho (PV) 7%, Gleissolo Háptico (GX) 2%, Argissolo Amarelo (PA) 1% e Cambissolo Háptico 1% (GX). A Figura 3D apresenta o mapa de uso e ocupação dos solos da bacia hidrográfica, ocorrendo cultivos de café (2,5%), FESM (35,7%), cultura anual (48,4%), regeneração florestal (5%), além de estradas rurais, cursos d'água e outros (8,4%). No que

tange ao uso predominante (cultura anual), durante o verão é realizado o plantio de milho, seguido do plantio de *Brachiária Decumbes* destinado à pastagem para gado. O segundo uso predominante refere-se a um remanescente de FESM (IBGE, 2012). De acordo com Machado et al. (2008), esta foi a tipologia mais rápida e extensamente devastada no estado desde o período colonial, e assim, caracteriza um ambiente prioritário para o desenvolvimento de estudos hidrológicos.

A partir da Figura 3, constata-se que na região de maior altitude da bacia, onde se concentram as áreas de menores declividades, estão localizados os Latossolos. Em direção à seção de controle da bacia, verifica-se a ocorrência de relevo ondulado e forte ondulado na presença de Argissolos, Cambissolos e Gleissolos.

**Figura 3** – A) Modelo Digital de Elevação B) Declividade C) Unidades Pedológicas D) Mapa de uso do solo da bacia.

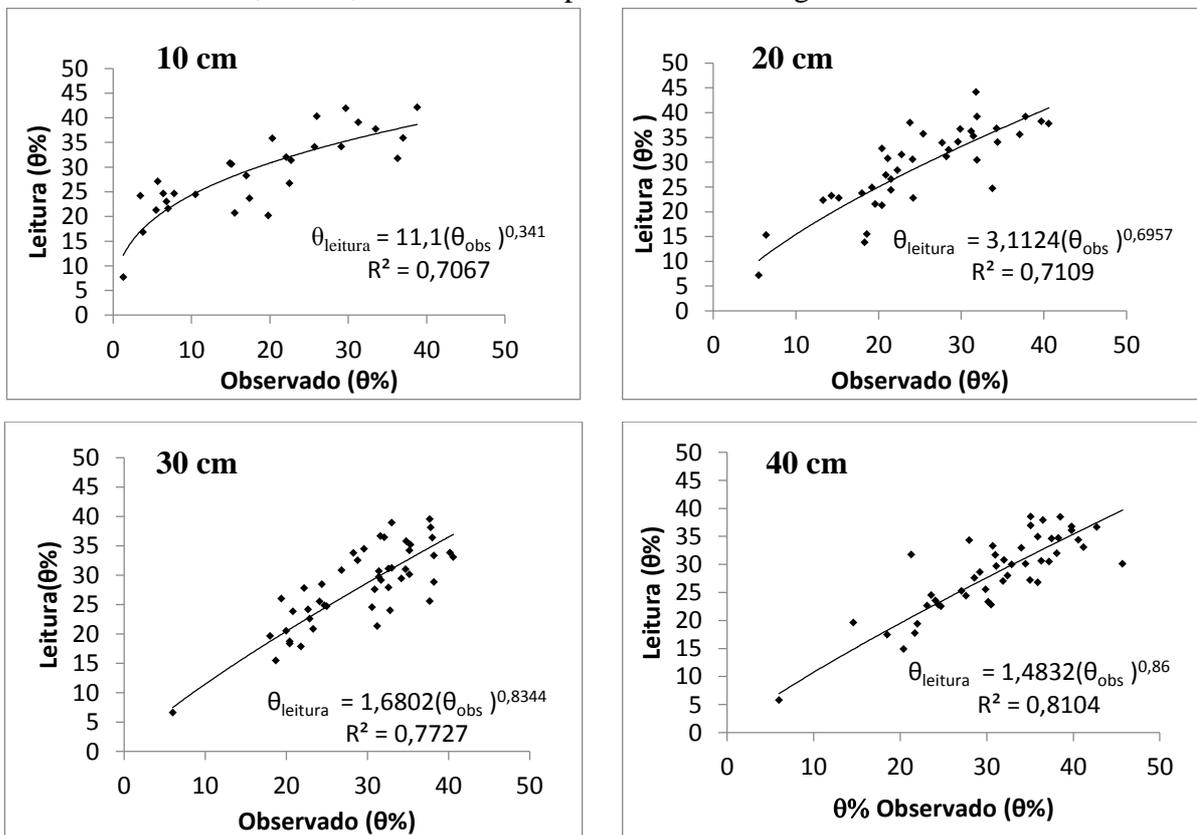


Do Autor (2018)

A calibração das sondas de umidade do solo foi realizada de acordo com as recomendações de Evett, Tolk e Howell (2006), que trabalharam com equipamento semelhante e propuseram a calibração de cada sensor das sondas separadamente, ou seja, uma calibração para o sensor de cada profundidade. Para tanto foram coletadas amostras deformadas de solo de cada ponto e em cada profundidade de leitura do sensor utilizando-se um trado holandês. Foram coletadas amostras de solo em várias condições de umidade do

solo, ou seja, coletaram-se amostras em períodos de déficit hídrico, nos quais a umidade apresentava valores reduzidos, e também em períodos úmidos, quando o solo se encontrava em condição elevada de umidade, conforme recomendado por ÁVILA et al. (2011). A determinação da umidade gravimétrica se deu pelo método da estufa (EMBRAPA, 1997). Posteriormente coletaram-se amostras indeformadas com um amostrador do tipo Uhland para a determinação da densidade do solo, com o intuito de converter os valores de umidade gravimétrica para umidade com base em volume. Em seguida foram ajustadas equações de calibração, que relacionam o valor de umidade volumétrica medida pela sonda, com os valores observados. A Figura 4 mostra as equações geradas para cada profundidade.

**Figura 4** - Equações de calibração para as sondas de capacitância nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm para a bacia hidrográfica em estudo.



Fonte: Do Autor (2018)

### Análises Geoestatísticas

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da utilização da geoestatística na análise da distribuição espacial dos dados coletados na bacia hidrográfica, foi realizada a análise exploratória dos dados (AED). Nesta, avaliaram-se gráficos de tendência, presença de dados

discrepantes (“outliers”) por meio de gráficos “boxplot” e normalidade dos dados (MELLO et al., 2008; MELLO, 2004).

A partir da análise exploratória dos dados aplicou-se o modelo exponencial pelo método de ajuste dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). Para a avaliação da qualidade do ajuste do modelo quantificou-se o grau de dependência espacial (GD), e também o erro médio reduzido (ER), o desvio padrão do erro reduzido (SER) e erro médio (EM) gerados no procedimento de validação cruzada. O GD foi obtido pela razão entre a variância estrutural (C) e o patamar (C+Co), conforme Equação 1:

$$GD = \left( \frac{C}{C + C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

O GD pode ser classificado como fraco se este for menor que 25%, moderado se estiver entre 25% e 75%, e forte caso seja maior que 75% (CAMPARDELLA et al., 1994).

De acordo com Mcbratney & Webster (1986), o EMR é definido como:

$$EMR = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Z_{xi} - \hat{Z}_{xi})}{\sigma(\hat{Z}_{xi})} \quad (2)$$

em que n é o número de dados,  $Z_{xi}$  o valor observado no ponto i,  $\hat{Z}_{xi}$  o valor predito por krigagem no ponto i e  $\sigma(\hat{Z}_{xi})$  o desvio padrão da krigagem no ponto i, ambos sem se considerar a observação  $Z(x_i)$ .

Obteve-se o desvio padrão do erro reduzido através da seguinte expressão:

$$SER = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|Z_{xi} - \hat{Z}_{xi}|}{\sigma(\hat{Z}_{xi})} \quad (3)$$

A magnitude do erro da estimativa produzido pelo modelo foi quantificada por meio do erro médio (EPM), o qual pode ser expresso como:

$$EPM(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{Z}_{xi} - Z_{xi}|}{Z_{xi}} \cdot 100 \quad (4)$$

Para realização da análise exploratória dos dados e modelagem dos semivariogramas, foi utilizado o software R (R Development Core Team, 2017), com o pacote geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2016). Para a geração dos mapas de umidade do solo, aplicou-se o

interpolador geoestatístico krigagem ordinária, trabalhando-se com uma extensão do ArcMap, do software ArcGIS9.2 ® (ESRI, 2004).

### **Análises de Estabilidade Temporal**

As análises de estabilidade temporal da umidade do solo seguiram as recomendações de Junqueira Júnior et al. (2017). Sendo assim, utilizou-se de três técnicas da estatística não paramétrica para a verificação da ocorrência de estabilidade temporal da umidade do solo: diferença relativa, indicador de estabilidade temporal (TSI<sub>ij</sub>) e o teste não paramétrico de Spearman.

De acordo com Gao et al. (2015), a técnica das diferenças relativas possibilita a verificação da estabilidade temporal da variabilidade espacial dos processos. Possibilita ainda a identificação de pontos representativos da área em cada profundidade para a realização do monitoramento preciso e com menor esforço amostral. Acrescentando, de acordo com Minet et al. (2013) a técnica do Indicador de Estabilidade Temporal (TSI<sub>ij</sub>) além de avaliar a ocorrência de estabilidade temporal, também permite a identificação da melhor posição no espaço para o monitoramento da variável.

Neste contexto, as diferenças relativas médias e seus respectivos desvios padrão e TSI de cada ponto foram plotados em gráficos com o intuito de identificar os pontos mais representativos da umidade nas quatro profundidades estudadas durante o período de monitoramento assim como também realizado por Junqueira Junior (2017). Sendo assim, foi considerado como o ponto mais representativo em cada profundidade aquele que apresentou, concomitantemente, valores da diferença relativa média próximos à zero e ainda apresentou os menores valores de desvio padrão e TSI (MINET et al., 2013).

Na sequência, foi aplicado o teste não paramétrico de correlação de pontos de Spearman ( $r_s$ ) com o objetivo de identificar a existência de tendências temporais em pontos particulares da série dos dados de umidade. Segundo Vachaud et al. (1985), valores de  $r_s$  próximo a 1 indicam estabilidade do processo. De acordo com o proposto por Barbetta (2010), considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ), se  $r_s > 0,39$ , para  $n=26$ , existe estabilidade temporal. Já para a estatística (T) do teste de Spearman, considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ), pela Tabela de Z, têm-se que  $Z_{0,975}=1,96$ . Sendo assim, se  $|T| > Z_{1-(\alpha/2)}$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$  de que as observações não apresentam tendência temporal.

Pelo fato de a área de estudo apresentar características heterogêneas que podem influenciar o padrão temporal de umidade do solo, optou-se por escolher um segundo ponto de maior estabilidade em cada profundidade. De acordo com Junqueira Junior (2017) a identificação de um segundo ponto representativo é interessante para avaliar a possibilidade de uma região da área de estudo apresentar maior tendência temporal de estabilidade da umidade do solo, ou se o procedimento aponta pontos aleatórios na área.

A validação dos dados de umidade dos pontos escolhidos como sendo os mais representativos da área foi realizada da seguinte forma:

$$Validação = \frac{\theta_a - \theta_b}{\theta_a} \quad (5)$$

Em que  $\theta_a$  é o valor médio da umidade observado ponto para o mês de referência e  $\theta_b$  é umidade média dos pixels do mapa de krigagem produzido para o mês de referência.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise da semivariância

Na Tabela 1 estão dispostos os parâmetros do modelo de semivariograma exponencial ajustado aos dados de umidade do solo e os resultados do grau de dependência espacial e da validação cruzada. Observa-se que 96% e 4% dos eventos apresentaram grau de dependência espacial forte e moderado, respectivamente.

De forma geral, o grau de dependência espacial médio foi de 95%, quando considerando os dados de umidade do solo de todas as profundidades. Isto indica que pode-se alcançar resultados de boa qualidade na aplicação do interpolador geoestatístico. Avaliando cada profundidade separadamente, verificou-se o forte grau de dependência espacial para todas as profundidades analisadas. Sendo assim, infere-se que o espaçamento de amostragem adotado foi suficiente para a identificação da dependência espacial da variável estudada.

O alcance teórico médio encontrado para o modelo exponencial ao longo do período estudado foi de aproximadamente 177 m. A profundidade de 20 cm apresentou o maior alcance (306 m). As profundidades de 10 cm, 30 cm e 40 cm apresentaram alcances próximos entre si, sendo de 138m, 135m e 130m, respectivamente.

Ainda na Tabela 1 encontram-se o EMR (Erro Médio Reduzido), o SER (Desvio Padrão dos Erros Reduzidos) e o EPM (Erro Percentual Médio). Observou-se que os modelos

apresentaram valores de EMR próximos de 0 e SER próximos a 1 em todos os eventos avaliados, sendo esta a condição ideal de acordo com Mello (2004). O EPM médio encontrado é -3%, implicando que, em média, os modelos subestimaram ligeiramente os valores observados para a umidade do solo. Ressalta-se que a maior subestimativa foi para o mês de setembro de 2017, à 30 cm de profundidade, sendo de -8,6%. Houveram apenas dois eventos com superestimativa, sendo dezembro de 2016 (0,1%) e janeiro de 2017 (0,2%). Diante do exposto, verificou-se que os modelos representaram adequadamente os dados reais mensurados.

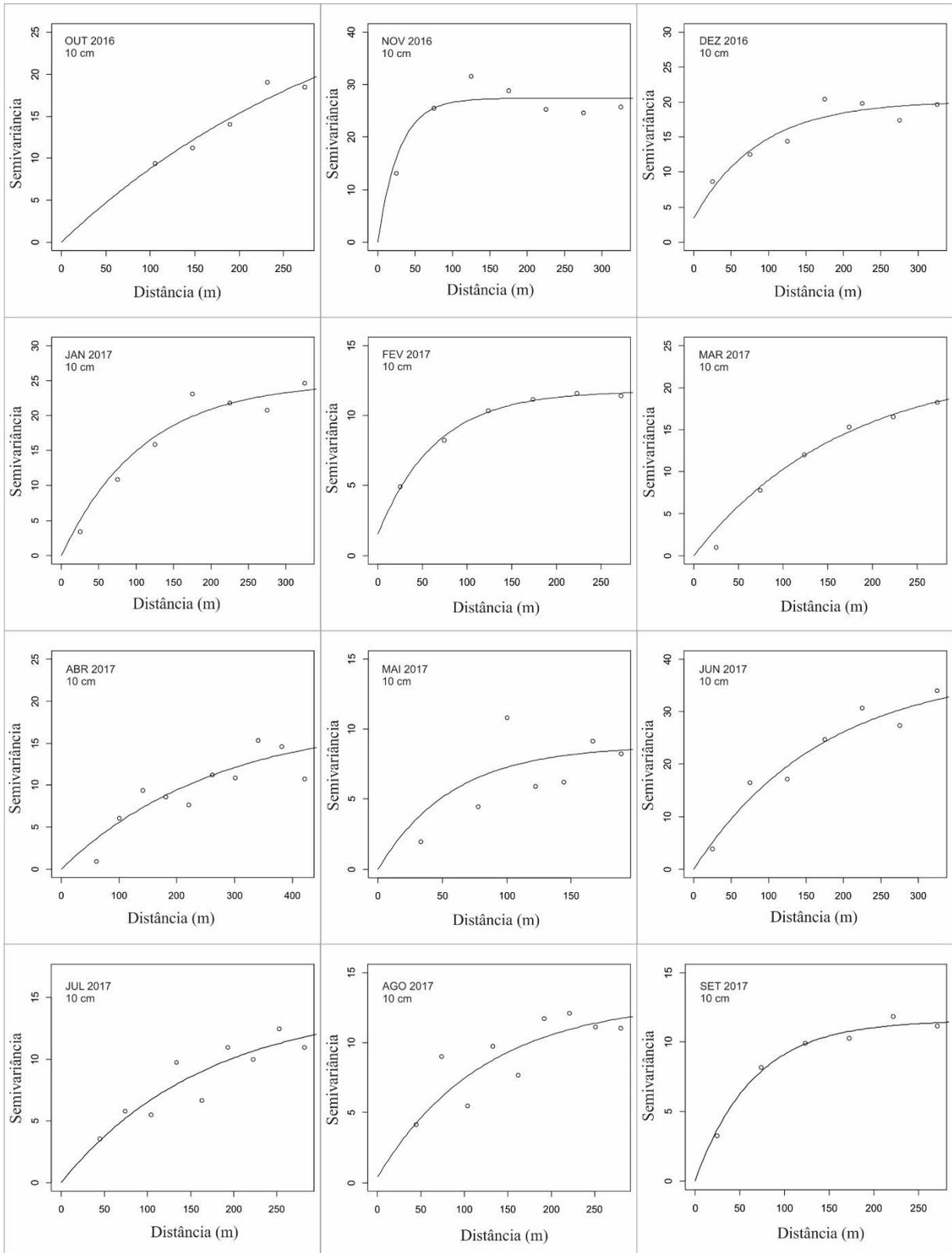
As Figuras 5, 6, 7 e 8 trazem o modelo exponencial ajustado aos semivariogramas experimentais de cada evento analisado. De modo geral, verificou-se que os semivariogramas experimentais apresentaram grande similaridade na região de influência da dependência espacial, revelando que a umidade do solo apresenta características desejáveis para a modelagem da estrutura de continuidade espacial. Sendo assim, pode-se afirmar que o modelo exponencial ajustado pelo método dos mínimos quadrados ponderados pode descrever adequadamente a estrutura da continuidade espacial da umidade do solo na bacia hidrográfica em estudo.

**Tabela 1** – Parâmetros de ajuste do modelo de semivariograma exponencial e respectivos graus de dependência espacial, Erro Médio Reduzido (EMR), Desvio Padrão dos Erros Reduzidos (SER) e Erro Percentual Médio (EPM).

Prof	Data	Parâmetros - Modelo Exponencial			GD %	EMR	SER	EPM
		Efeito Pepita	Contribuição	Alcance				
10 cm	out/16	0,0	35,0	346,7	100	-0,038	1,5	-2,9
	nov/16	2,8	17,7	29,5	87	0,036	0,9	-1,7
	dez/16	3,5	16,7	87,2	83	0,054	0,7	0,1
	jan/17	0,0	24,9	108,5	100	0,065	0,9	0,2
	fev/17	1,5	10,3	64,5	87	0,006	1,1	-1,9
	mar/17	0,0	22,7	166,0	100	0,004	1,0	-1,3
	abr/17	0,0	18,0	269,4	100	0,014	1,2	-0,8
	mai/17	0,0	8,8	57,4	100	-0,003	1,2	-1,7
	jun/17	0,0	38,1	172,6	100	0,071	1,1	-0,5
	jul/17	0,0	14,5	166,9	100	0,010	1,3	-1,5
	ago/17	0,4	12,6	122,1	97	-0,001	1,3	-2,1
	set/17	0,0	11,6	64,2	100	-0,010	1,2	-3,1
20 cm	out/16	0,0	52,4	113,5	100	0,004	1,0	-5,5
	nov/16	11,4	24,9	208,6	69	0,019	1,0	-2,2
	dez/16	6,4	32,1	156,9	83	0,025	1,1	-1,8
	jan/17	5,9	110,2	838,0	95	0,025	1,1	-1,6
	fev/17	5,0	40,3	278,6	89	0,030	1,0	-1,6
	mar/17	0,0	46,9	274,8	100	0,032	1,2	-1,1
	abr/17	5,3	49,4	446,8	90	0,022	1,1	-1,8
	mai/17	8,2	46,8	375,3	85	0,018	1,1	-2,3
	jun/17	7,8	33,1	164,7	81	0,013	1,1	-3,2
	jul/17	7,4	33,0	325,3	82	0,005	1,2	-3,8
	ago/17	4,1	22,9	138,6	85	0,006	1,1	-4,3
	set/17	7,3	30,8	350,5	81	0,000	1,1	-4,3
30 cm	out/16	0,0	22,1	122,4	100	0,000	1,1	-2,7
	nov/16	0,0	39,4	135,6	100	-0,047	0,9	-4,2
	dez/16	0,0	27,7	88,0	100	-0,037	1,0	-3,1
	jan/17	0,1	30,9	138,6	100	-0,042	0,9	-3,2
	fev/17	0,0	45,6	185,5	100	-0,039	0,8	-4,1
	mar/17	0,0	37,8	151,4	100	-0,038	0,8	-3,2
	abr/17	0,0	30,1	146,4	100	-0,029	0,9	-2,8
	mai/17	0,0	38,3	143,7	100	-0,034	0,8	-3,6
	jun/17	0,0	42,0	99,772	100	-0,034	0,9	-6,2
	jul/17	2,0	45,5	210,0	96	-0,043	0,8	-5,8
	ago/17	0,0	31,3	104,3	100	-0,054	0,8	-7,8
	set/17	0,0	29,9	90,0	100	-0,053	0,9	-8,6
40 cm	out/16	0,0	20,3	72,4	100	-0,009	0,9	-2,3
	nov/16	0,0	31,6	131,3	100	-0,039	1,1	-2,8
	dez/16	0,0	32,2	138,4	100	-0,040	1,1	-2,8
	jan/17	0,0	38,7	188,4	100	-0,039	1,2	-2,8
	fev/17	0,0	32,2	110,5	100	-0,016	1,2	-2,9
	mar/17	0,0	28,6	148,5	100	-0,028	1,0	-2,1
	abr/17	8,5	14,6	132,2	63	-0,008	1,0	-2,5
	mai/17	0,0	30,6	114,5	100	-0,021	1,1	-2,5
	jun/17	0,0	36,3	128,0	100	-0,029	1,0	-3,3
	jul/17	0,0	36,9	135,3	100	-0,025	1,0	-4,1
	ago/17	0,0	35,1	121,3	100	-0,046	0,9	-5,7
	set/17	0,0	38,9	148,7	100	-0,045	1,0	-5,9

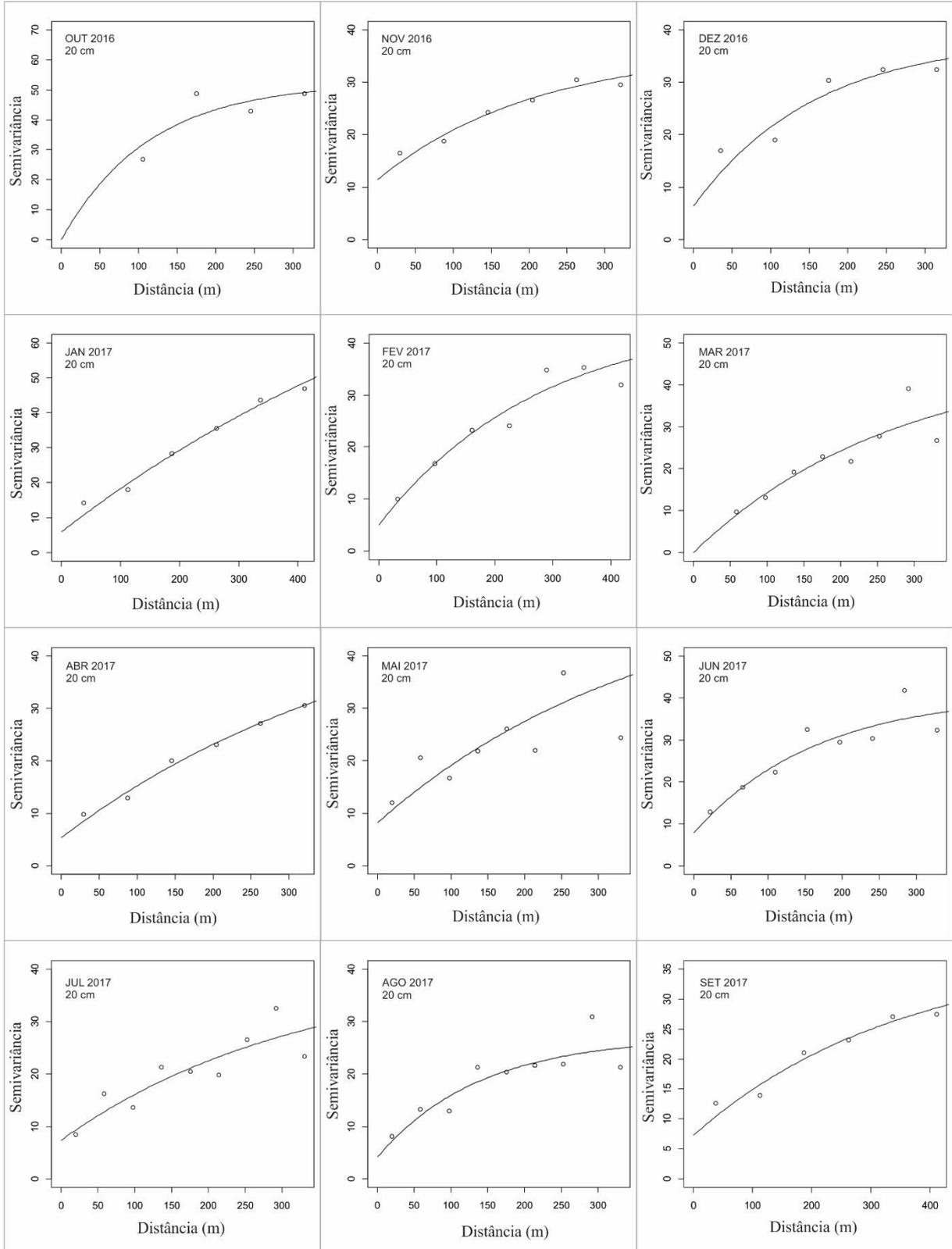
Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 5** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 10 cm.



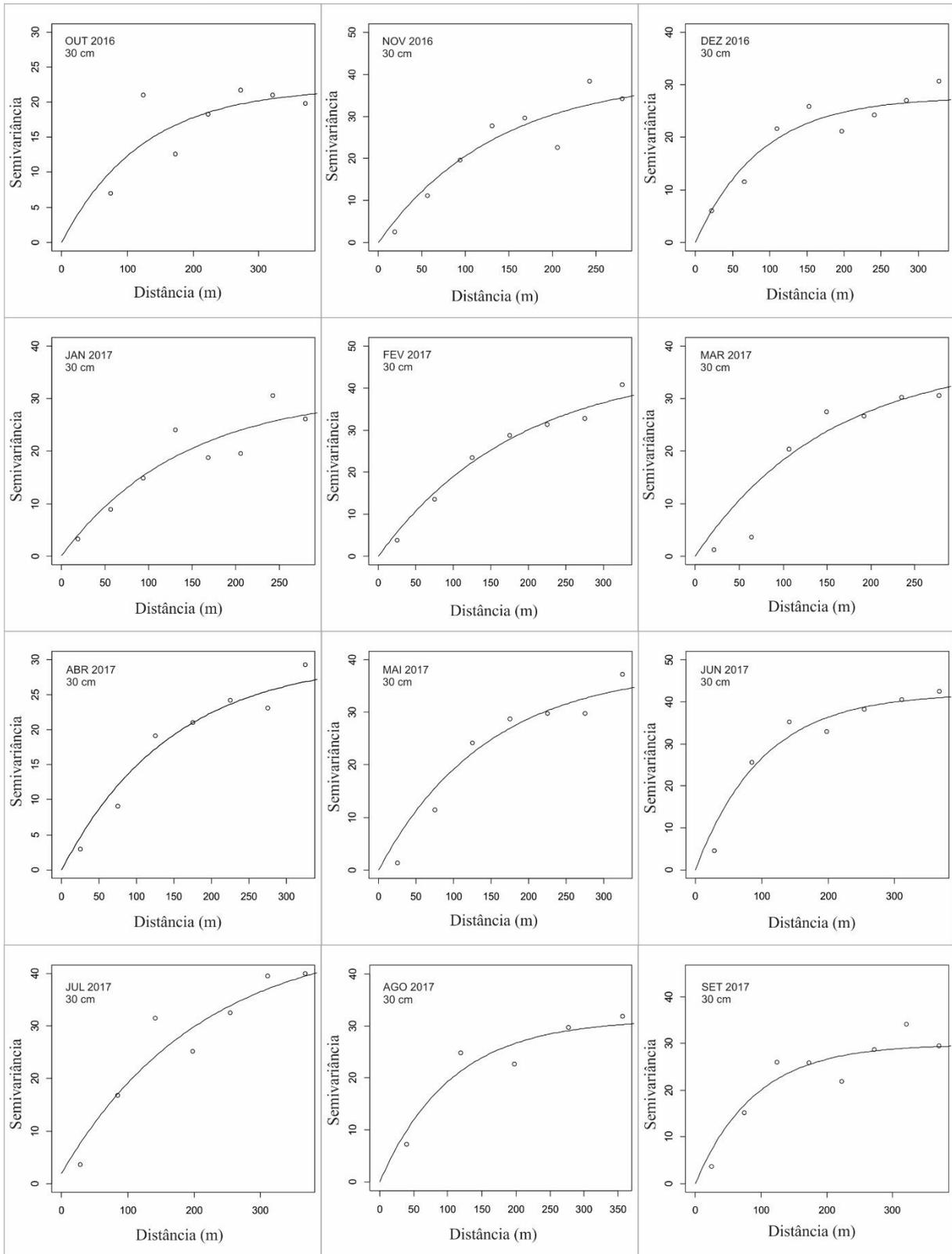
Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 6** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 20 cm.



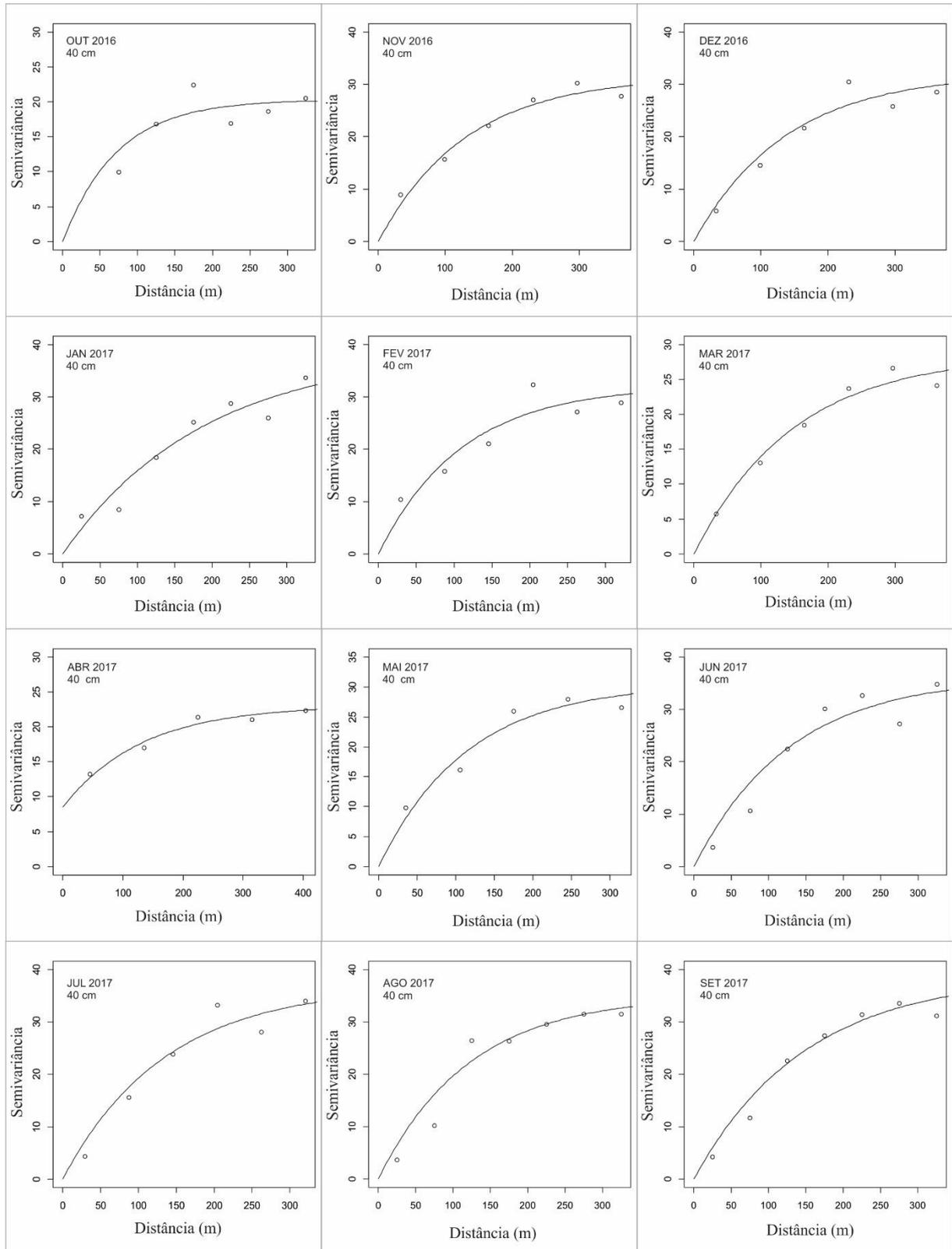
Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 7** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 30 cm.



Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 8** – Modelo de semivariograma exponencial ajustado às semivariâncias experimentais para a umidade do solo (%) na profundidade de 40 cm.

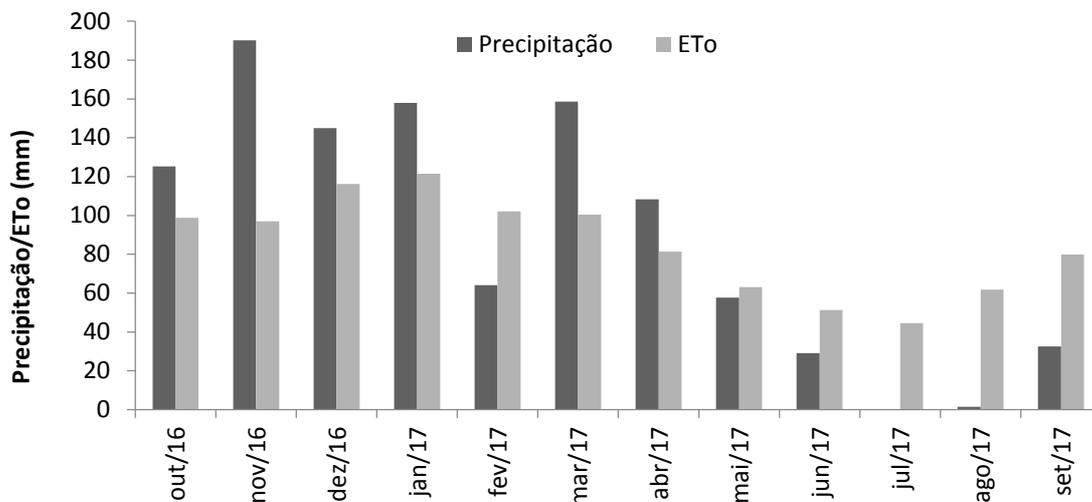


Fonte: Do Autor (2018)

## Mapeamento da umidade do solo

A Figura 9 mostra as lâminas mensais de precipitação e evapotranspiração de referência para o ano hidrológico de 2016/17. Nas Figuras 10, 11, 12 e 13 estão apresentados os mapas mensais de umidade do solo para as profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm, respectivamente, para o mesmo período.

**Figura 9**– Precipitação e evapotranspiração de referência para a bacia hidrográfica estudada no período de outubro de 2016 a setembro de 2017.



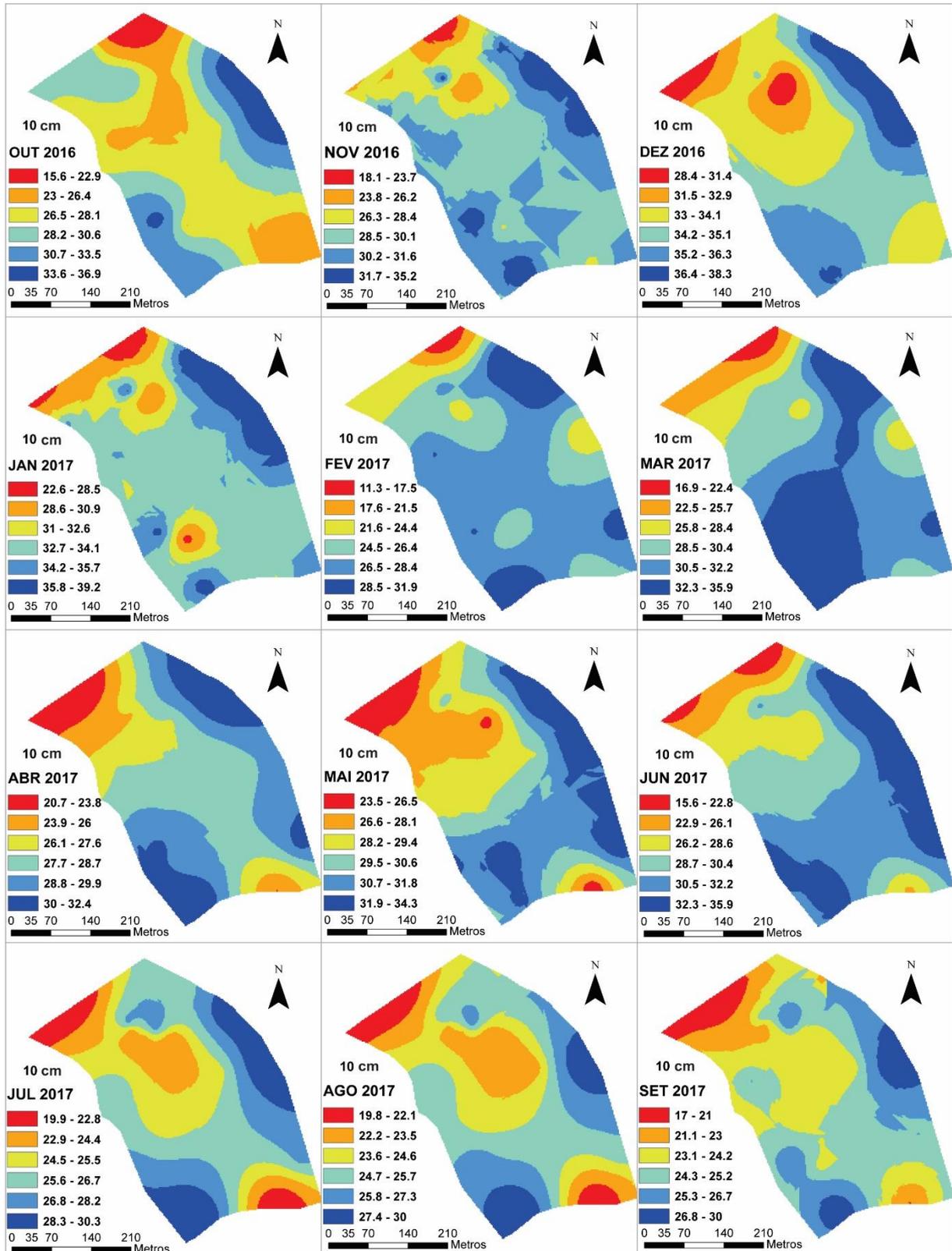
Fonte: Do Autor (2018)

Pode-se observar que o comportamento da umidade do solo está intimamente relacionado com a sazonalidade do regime de chuvas, conforme também constatado por Ávila et al. (2010). Quando analisado do ponto de vista do balanço hídrico, observa-se que nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro a precipitação (P) superou a evapotranspiração potencial (ETo), e observaram-se valores crescentes de umidade ( $\theta$ ). Por outro lado, no mês de fevereiro houve  $ETo > P$ , tendo sido observado substancial redução de  $\theta$ . Em março e abril, novamente com  $P > ETo$ , observou-se aumento de  $\theta$ , seguida de progressiva redução a partir de maio. Levando-se em consideração o papel da chuva no balanço hídrico, isto indica que o monitoramento contínuo desta variável deve ser mantido, buscando verificar seu comportamento em anos hidrológicos próximos do normal, ou mesmo em anos severamente úmidos e secos.

Santos et al. (2011) realizaram um estudo sobre a variabilidade temporal da umidade superficial em parcelas com diferentes usos do solo: caatinga hipoxerófila, palma forrageira,

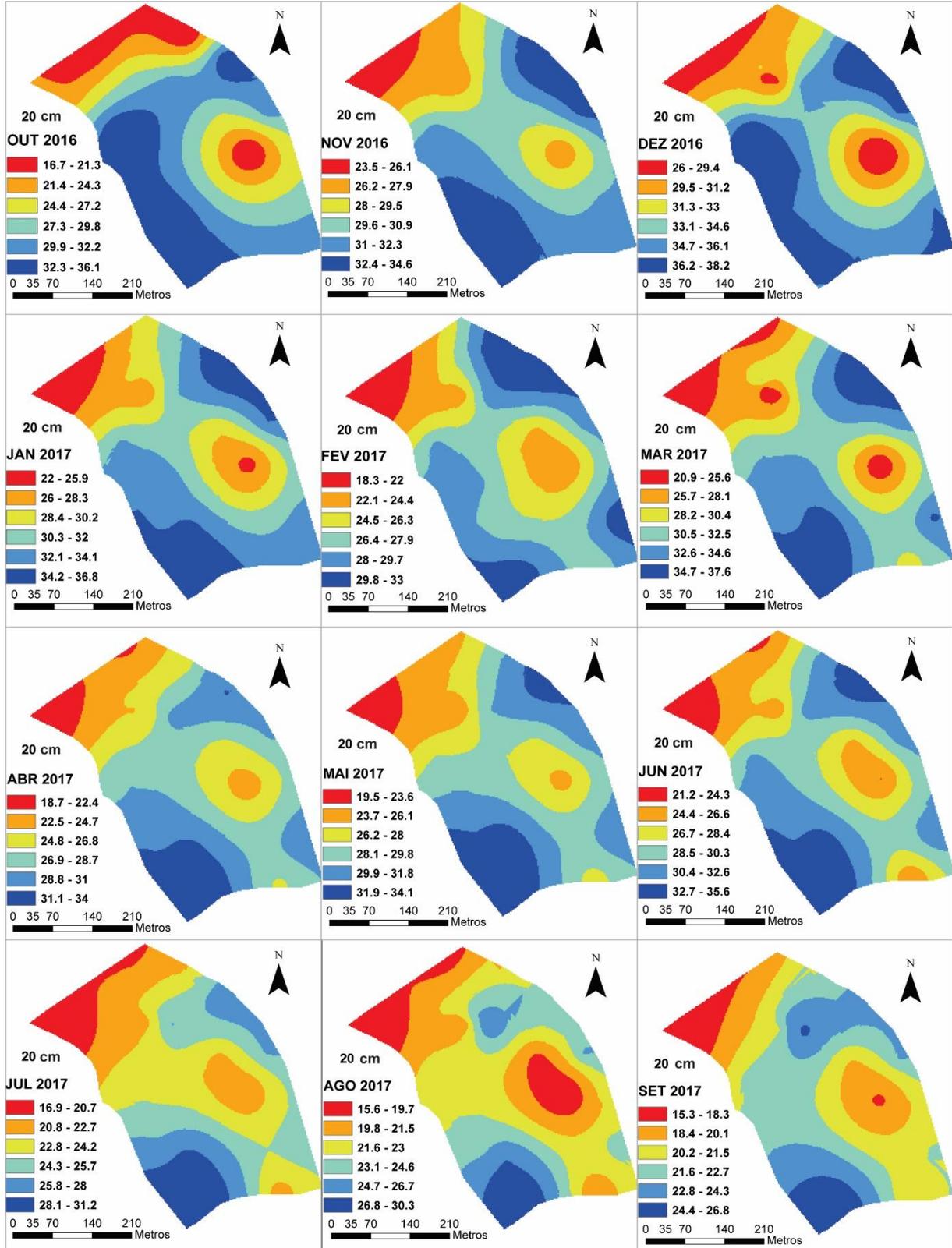
solo descoberto e barramento de pedra com 8 cm de altura mais cobertura morta de palha de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum). Os autores constataram que após nove dias sem chuva, a parcela com cobertura nativa de caatinga apresentou maior redução da umidade em comparação aos outros usos. Foi concluído que a maior evapotranspiração da cobertura nativa de caatinga foi responsável pela maior perda de armazenamento de água. Os autores também observaram que a parcela com solo descoberto foi a que apresentou menor umidade ao longo do tempo.

**Figura 10** – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 10 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.



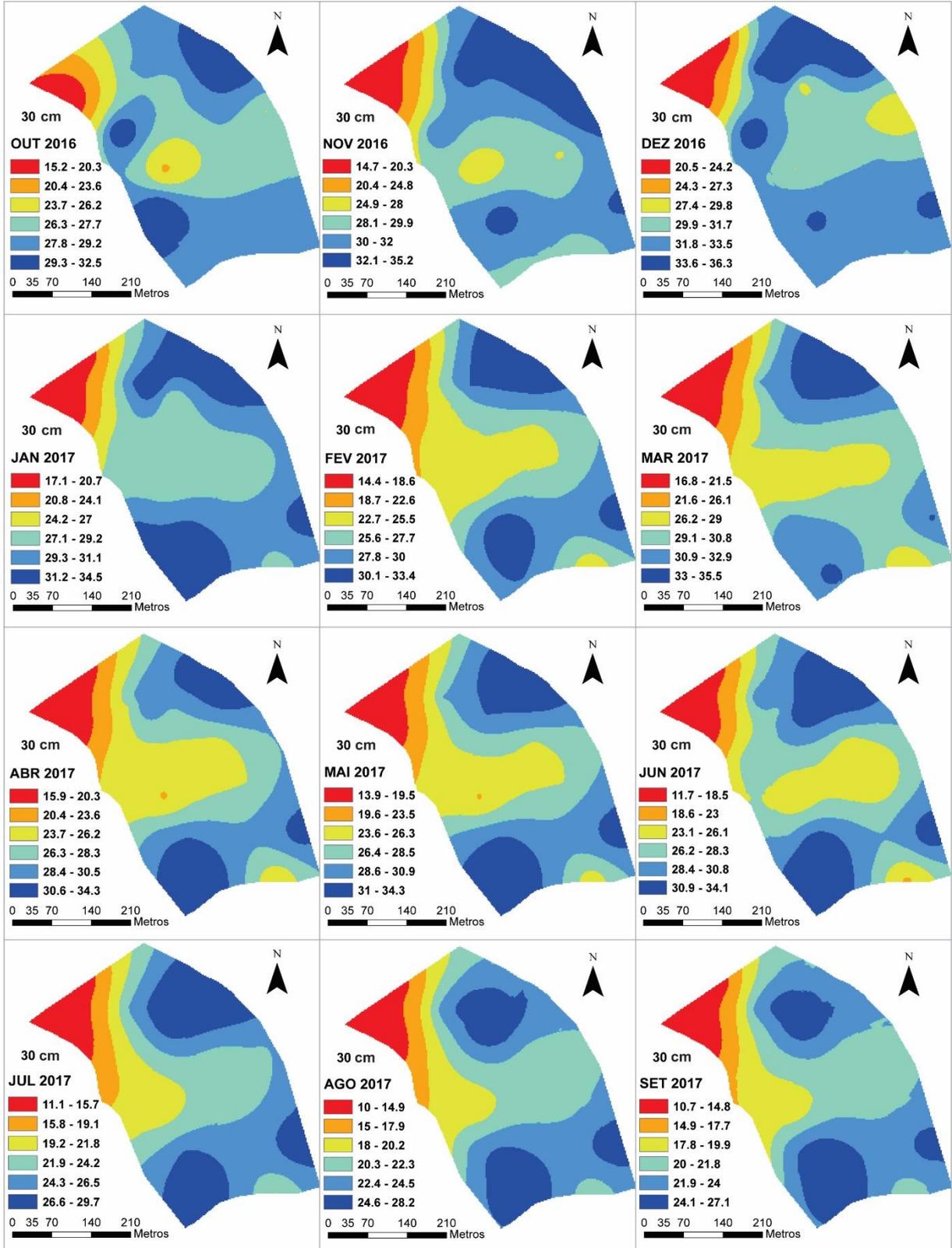
Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 11** – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 20 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.



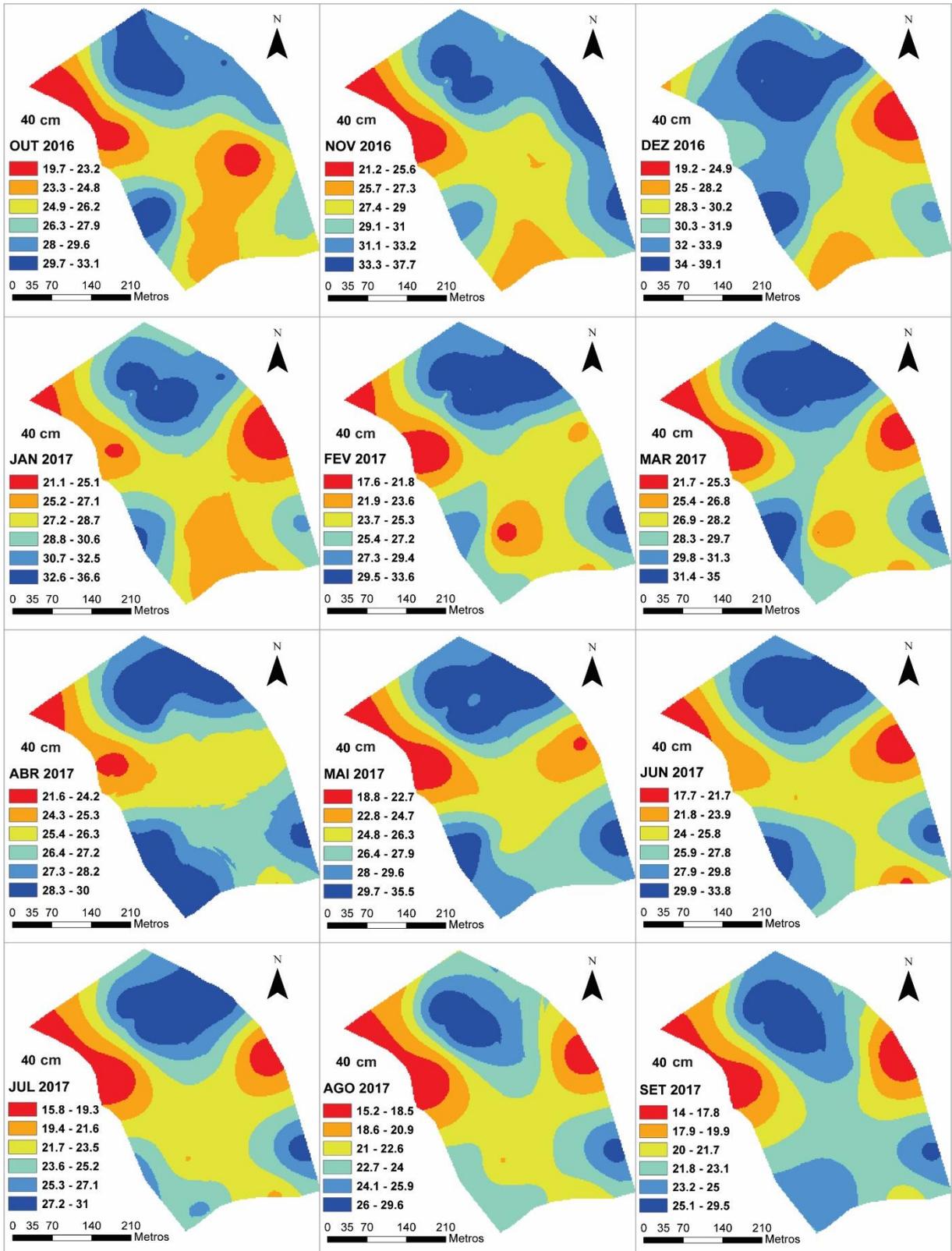
Fonte: Do Autor (2018).

**Figura 12** – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 30 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.



Fonte: Do Autor (2018)

**Figura 13** – Mapas mensais de umidade do solo (%) a 40 cm de profundidade no ano hidrológico de 2016/2017.



Fonte: Do Autor (2018).

Verificaram-se os menores valores de umidade no extremo noroeste da bacia, nas proximidades da seção de controle, onde ocorrem as menores altitudes. Nesse local prevalecem Cambissolo Háplico e Gleissolo Háplico, relevo ondulado e fortemente ondulado sob FESM. As análises dos atributos físico-hídricos dos solos mostraram que nesta região os solos apresentam menores densidade aparente e teor de argila e maiores teor de areia, matéria orgânica e condutividade hidráulica saturada. Tais característica conferem ao solo maior facilidade de drenagem para a lâmina infiltrada. Bertoni e Lombardi Netto (1993) afirmam que a matéria orgânica é eficiente para manter os agregados do solo, preservando sua porosidade. Sendo assim, a capacidade de infiltração, normalmente, é favorecida em áreas sob florestas (CHENG; LIN; LU, 2002; SYLVAIN et al., 2015). Outro aspecto é que em decorrência da presença de dossel fechado, há maiores perdas por interceptação. Souza et al (2016), relataram que em seu trabalho uma floresta mista Mista Ombrófila Alto-Montana do Parque Estadual de Campos do Jordão interceptou 14% da precipitação incidente em uma área aberta. Arcova, Cicco e Rocha (2003), em seu trabalho analisaram níveis de interceptação em uma bacia experimental na Mata Atlântica (São Paulo) em comparação com uma área de clareira a 200m da parcela de floresta. Os autores encontraram que, no período de seca, na floresta houve interceptação de 26% da precipitação incidente na clareira e no período chuvoso o percentual reduziu para 16%. Almeida (2012), concluiu em seu trabalho que a soma do total interceptado pela pastagem e do total evaporado pelo solo foi equivalente a 11% do total precipitado na área de estudo. Estes resultados foram semelhantes aos resultados encontrados por Ataroff e Sanchez (2000) e Ataroff e Naranjo (2009).

Também há de se considerar a elevada demanda evapotranspirativa da floresta nos resultados. Conforme Sharma, Barron e Williamson (1987), solos sob floresta mostram-se, em geral, menos umedecidos em função do maior potencial de transpiração das árvores de grande porte. Sylvain et al. (2015) descrevem que a taxa média de infiltração tende a ser maior nas florestas, devido ao efeito combinado de maior permeabilidade e menor umidade antecedente. Como resultados da combinação de todos esses fatores, têm-se ocorrência dos menores valores de umidade na região da FESM. Entretanto ressalta-se que as elevadas infiltração e drenagem da água no solo são altamente relevantes para a recarga dos aquíferos subterrâneos que abastecem as nascentes. De acordo com Hümann et al. (2011) e Beven e Germann (2013) florestas nativas preservadas tendem a promover melhoria significativa nas propriedades hidrológicas do solo, sobretudo a sua estruturação, desenvolvimento de fluxos preferenciais e recarga de aquíferos. Assim, ambientes florestais exercem papel fundamental

para a regulação da vazão dos cursos d'água, na conservação do solo e amenização dos processos erosivos.

A maior umidade ao longo de todo o período monitorado ocorreu no extremo sul, sudeste, leste e nordeste da bacia, nas maiores altitudes e que configuram a área de recarga da bacia. Nessa região prevalecem Latossolos e Argissolos como unidades pedológicas constituintes. Na caracterização físico-hídrica foi verificado que ali ocorrem maiores teor de argila, densidade aparente e menores condutividade hidráulica saturada e teor de matéria orgânica. Tais atributos sinalizam para uma menor mobilidade da água no solo, quando comparada à área de FESM. Desta maneira, como o aporte de água por precipitação se dá pela superfície do solo, infere-se que no uso do solo caracterizado por pastagem há “retenção” da água na camada superficial do solo, quando comparado a FESM. Também há de se considerar o uso do solo que é caracterizado principalmente por culturas anual sob cultivo convencional (milho/pastagem) e cultura perene (café). De acordo com Ribeiro et al. (2016), o preparo do solo influencia no comportamento físico, visto que este atua diretamente sobre a estrutura e causa modificações na porosidade e densidade, afetando a retenção de água. Pinto et al. (2018) explicam que a diferença de macroporosidade entre áreas de floresta e pastagem resulta em maior capacidade para o movimento da água no perfil do solo sob floresta. A menor macroporosidade em solos sob pastagem quando comparada a áreas sob florestas, também pode ser decorrente de compactação da camada superficial do solo devido ao pisoteio animal (CELIK, 2005) e à falta de cuidados conservacionistas (PINTO et al., 2018). Outro fator a se considerar é o menor índice de área foliar da pastagem, resultando em menores perdas por interceptação, e conseqüentemente, maior precipitação interna, conforme também constatado por Ávila et al. (2010). A variabilidade espacial da interceptação e suas implicações na precipitação interna e escoamento no tronco criam padrões de umidade diferentes que persistem no tempo (GUSWA, 2012).

Analisando a umidade do solo em profundidade, verificou-se que a primeira camada (10 cm) apresenta maior variabilidade espacial. Atribui-se esta característica ao seu contato direto com a atmosfera, conferindo-lhe uma resposta mais rápida aos estímulos climáticos, ambientais e do uso do solo. De acordo com Gevaerd e Freitas (2006), a forte dependência entre atmosfera e superfície tem sido comprovada em estudos observacionais e análises numéricas. Esta interação acontece por meio da troca de umidade, calor e momento linear. Geralmente, durante o dia, a superfície do solo atua como fonte de calor e umidade para as camadas de ar mais próximas da superfície.

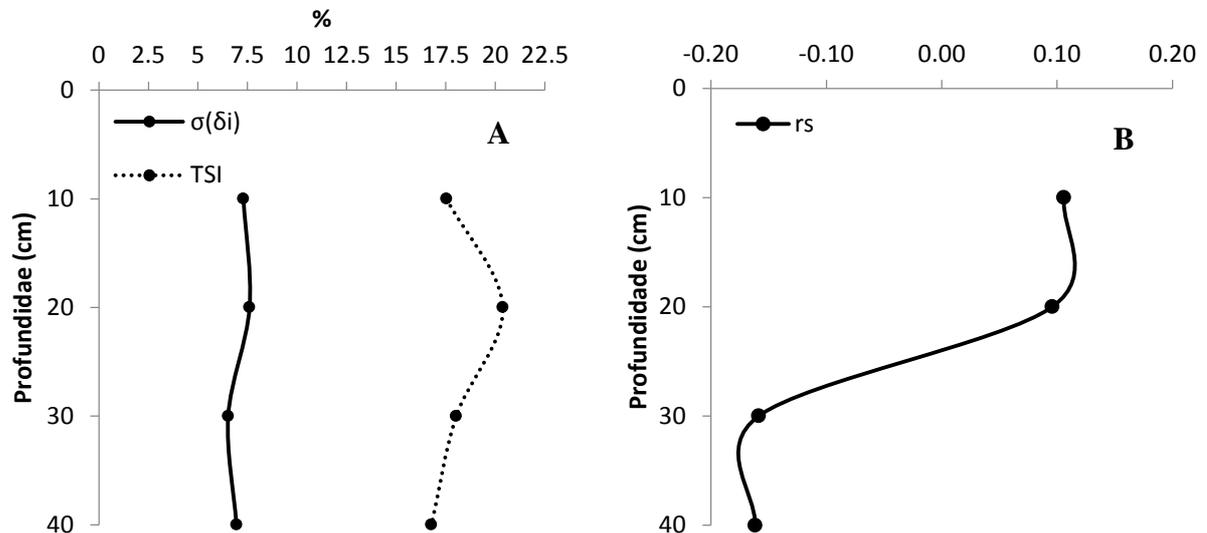
A partir da profundidade de 20 cm pode-se observar um padrão de variabilidade espacial melhor definido ao longo do tempo, ou seja, embora ocorram variações no teor de umidade, há maior semelhança entre os mapas produzidos para cada mês do ano. Outro aspecto refere-se à identificação de um gradiente crescente da umidade do solo da superfície em direção às maiores profundidades para os meses chuvosos.

No mês de novembro, no qual ocorreu a maior precipitação acumulada, a umidade mínima foi de 18,1 % (10 cm) e 21,2% (40 cm) na região de menor umidade na bacia. Ainda para este mês, já para a região mais úmida, foi de 35,5% (10 cm) e 37,7% (40 cm). Entretanto, se considerarmos os meses nos quais  $ET_o > P$ , caracterizando a retirada de água do solo, observa-se gradiente oposto. Tomando-se, por exemplo, o mês de julho, para a região de menor umidade da bacia a umidade a mínima a 10 cm foi de 19,9%, enquanto que para 40 cm foi de 15,8%.

### **Estabilidade Temporal da Umidade do Solo**

Na Figura 14 pode ser observado o comportamento médio dos indicadores de estabilidade temporal da umidade do solo por camada de solo, para o ano hidrológico de 2016/2017. Observou-se que o desvio padrão das diferenças relativas ( $\sigma_{di}$ ) apresentou pequena variação, com valores de 7,3% (10 cm), 7,6% (20 cm), 6,5% (30 cm) e 6,9% (40 cm). Já os valores médios do TSI foram de 17,5% (10 cm), 20,4% (20 cm), 18% (30 cm) e 16,8% (40 cm). De acordo com Junqueira Júnior et al. (2017) tais valores podem ser considerados reduzidos, podendo-se afirmar que há estabilidade temporal nas quatro camadas estudadas.

**Figura 14** – Médias por camada de solo das estatísticas de estabilidade temporal (desvio padrão das diferenças relativas ( $\sigma(\delta i)$ ) e indicador de estabilidade temporal (TSI)) para o perfil de umidade do solo no ano hidrológico de 2016/2017 (A) e distribuição do coeficiente de correlação médio de Spearman ( $\bar{r}_s$ ) (B).



Fonte: Do Autor (2018)

Na Tabela 3 são apresentados os resultados do teste de Spearman ( $r_s$ ) para as profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm. Considerando o nível de significância de 5% ( $T < Z_{0,975}$ ), observou-se que as séries de dados da umidade do solo para as profundidades 10 cm, 20 cm e 30 cm não apresentaram significância estatística. Sendo assim, para estas profundidades deve-se aceitar a hipótese  $H_0$ , de que não há tendência temporal. Em contrapartida, a profundidade de 40 cm apresentou um único evento com significância estatística (novembro/16), sendo então rejeitada a hipótese  $H_0$ , significando que a umidade do solo para este mês apresentou tendência temporal. O mês de novembro/2016 foi o que apresentou maior precipitação acumulada no ano hidrológico trabalhado. Acredita-se que o “forte” início do período chuvoso possa ter produzido a instabilidade temporal na área. Junqueira Júnior et al. (2017), em estudo em área de FESM identificaram tendência temporal nas camadas de 10 cm e 20 cm. Nessa ocasião os autores concluíram que nas proximidades da superfície há maior frequência de ocorrência de tendência temporal, sobretudo nos meses considerados chuvosos. Entretanto, no presente estudo não foi encontrada tendência temporal nas camadas de 10 cm e 20 cm. Isto pode estar relacionado com o local de estudo, que para o presente estudo se trata de uma bacia hidrográfica com distintos usos do solo e distintas classes de declividade, ao passo que, no estudo de Junqueira Júnior et al. (2017) o relevo é

relativamente menos acidentado e ocorre um único uso do solo (FESM) e a mesma unidade pedológica.

Na Figura 14B, na qual constam os valores médios do teste de Spearman ( $r_s$ ) por camada, observou-se que houve decréscimo dos valores de  $r_s$  com o aumento da profundidade. Como os maiores valores se deram próximos à superfície do solo (10 cm e 20 cm), pode-se inferir que nestas há maior estabilidade temporal da umidade, quando comparada às camadas subsequentes (30 cm e 40 cm). Ressalta-se que para as camadas de 30 cm e 40 cm foram encontrados valores negativos de  $r_s$ . Este resultado foi semelhante ao encontrado por Junqueira Júnior et al. (2017). Os autores consideraram que o resultado se deve ao maior conteúdo de matéria orgânica nas camadas superficiais, além da cobertura superficial do solo pela serapilheira que torna o ambiente mais estável e conserva a umidade do solo com menores oscilações pontuais ao longo do ano, principalmente nos períodos úmidos. Segundo Grayson et al. (1997) a variação negativa do coeficiente de correlação de Spearman nas maiores profundidades é consequência de fatores locais, incluindo o tipo de formação vegetal e sua distribuição, bem como das propriedades do solo. Ainda neste sentido, Junqueira Júnior et al. (2017) explicam a estabilidade temporal decrescente no perfil de solo em função de: (a) vegetação e clima: fatores que têm maiores efeitos sobre camadas superiores do solo, conforme afirmam Kamgar et al. (1993) e b) estrutura do solo e capacidade de retenção de água: que conforme afirmam Korsunskaya, Gummatov e Pachepsky (1995) são mais estáveis em maiores profundidades.

**Tabela 2** - Coeficiente de correlação de Spearman (rs) e estatísticas do teste de Spearman (T) nos diferentes meses de monitoramento para o ano hidrológico 2016/2017 para as profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm.

Mês	Profundidade							
	10 cm		20 cm		30 cm		40 cm	
	rs	T	rs	T	rs	T	rs	T
out/16	0,28 <sup>ns</sup>	1,21 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>	-0,85 <sup>ns</sup>
nov/16	0,18 <sup>ns</sup>	0,89 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	-0,28 <sup>ns</sup>	-1,42 <sup>ns</sup>	-0,40 <sup>ns</sup>	-2,02*
dez/16	-0,03 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,72 <sup>ns</sup>	-0,09 <sup>ns</sup>	-0,46 <sup>ns</sup>
jan/17	0,06 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,12 <sup>ns</sup>	-0,61 <sup>ns</sup>
fev/17	0,06 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,55 <sup>ns</sup>	-0,29 <sup>ns</sup>	-1,43 <sup>ns</sup>	-0,29 <sup>ns</sup>	-1,44 <sup>ns</sup>
mar/17	0,19 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,81 <sup>ns</sup>	-0,13 <sup>ns</sup>	-0,63 <sup>ns</sup>
abr/17	0,04 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	-0,74 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>
mai/17	0,02 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,69 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,78 <sup>ns</sup>
jun/17	0,04 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,74 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>	-0,20 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,52 <sup>ns</sup>
jul/17	0,07 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,63 <sup>ns</sup>	-0,25 <sup>ns</sup>	-1,27 <sup>ns</sup>	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,96 <sup>ns</sup>
ago/17	0,24 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	-0,23 <sup>ns</sup>	-1,08 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,78 <sup>ns</sup>
set/17	0,12 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,90 <sup>ns</sup>	-0,09 <sup>ns</sup>	-0,43 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> não significativo; \* significativo a 5% de probabilidade

Fonte: Do Autor (2018)

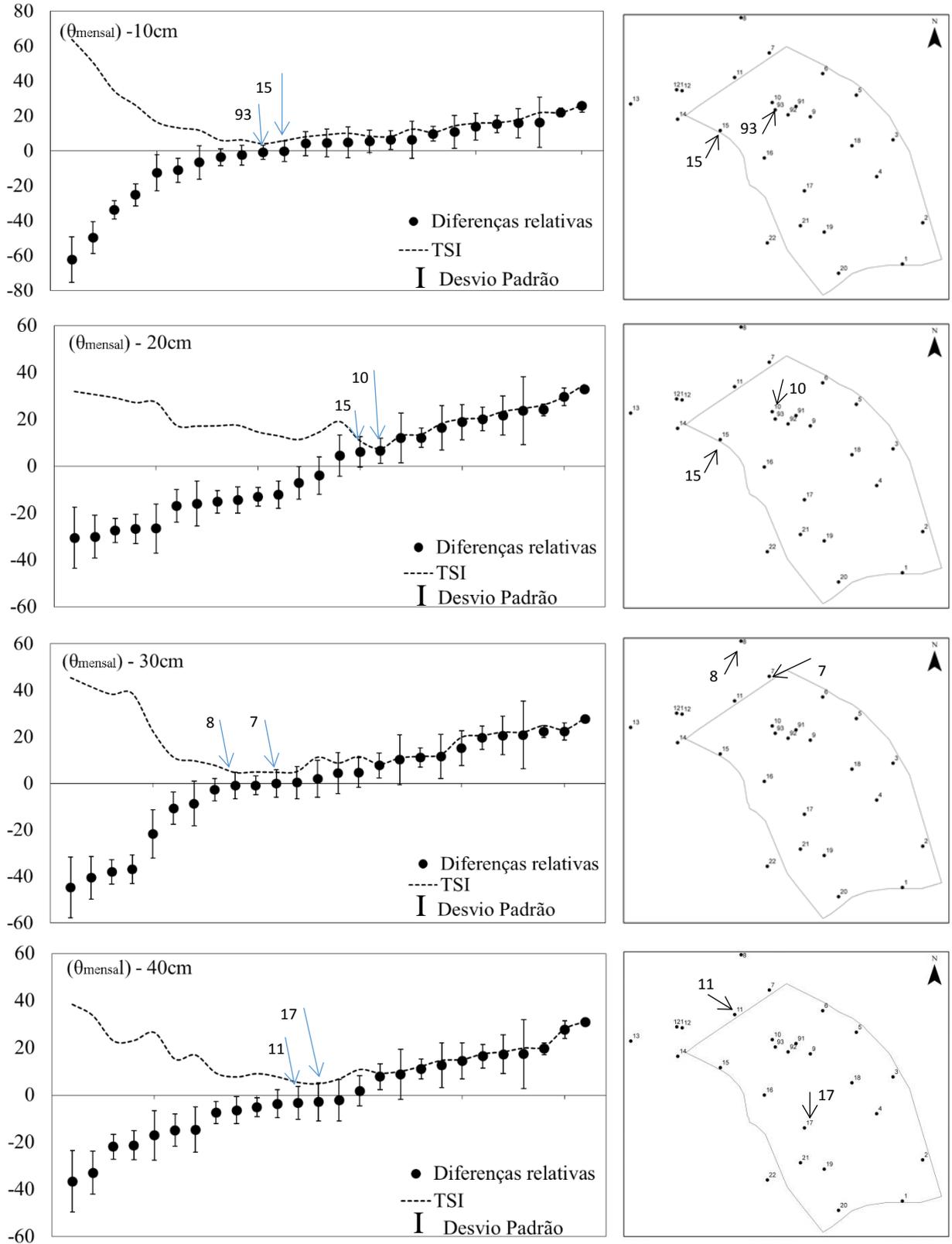
### Posição padrão para o monitoramento da umidade no perfil do solo

A Figura 15 exibe a diferença relativa média ( $\delta_{ij}$ ), desvio padrão ( $\sigma(\delta_i)$ ) e o indicador de estabilidade temporal (TSI), com a indicação de dois pontos considerados representativos para cada profundidade. Assim como também observado por Moreira et al. (2014) e Junqueira Júnior et al. (2017), nota-se que as medidas se distribuem amplamente em cada posição e profundidade, revelando ausência de tendência para a concentração de valores em qualquer direção. Os valores extremos de  $\delta_{ij}$  encontrados, que representam os pontos de maior instabilidade foram -62,4% (10 cm), -30,6% (20 cm), -44,8% (30 cm) e -36,5% (40 cm). Notou-se que os valores negativos de  $\delta_{ij}$  apresentaram maior heterogeneidade, variando de -30,6% até -62,4%. Já para valores positivos de  $\delta_{ij}$ , percebe-se menor heterogeneidade nos valores encontrados, com percentuais que variam de 25,7% (10 cm), 32,7% (20 cm), 27,6% (30 cm) e 31% (40 cm). Devido a essa heterogeneidade dos resultados de  $\delta_{ij}$  e de acordo com Junqueira Júnior et al. (2017), pode-se verificar que a área de estudo apresentou grande heterogeneidade em suas características hidrológicas

De acordo com Junqueira Junior et al. (2017) a amplitude das variações dos percentuais da diferença relativa média podem apontar informações importantes do ponto de

vista da estabilidade espaço-temporal. Neste sentido, quanto menor a amplitude de valores encontrados, mais estável será o processo. No caso, foram encontradas amplitudes de 88,1% (10 cm), 63,3% (20 cm), 72,4% (30 cm) e 67,5% (40 cm). Tais amplitudes são maiores que as obtidas por Ávila et al. (2011) que encontrou amplitudes da ordem de 38% em períodos chuvosos e de 28% em períodos secos. Sendo também maiores que o encontrado por Moreira et al. (2014), que encontram amplitudes da ordem de 30% durante o ciclo da cultura de milho cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo.

**Figura 15** - Diferenças relativas médias, desvio padrão e TSI da umidade para as profundidades 10 cm (a), 20 cm (b), 30 cm (c) e 40 cm (d) e a localização dos respectivos pontos representativos selecionados na área (primeiro e segundo pontos mais estáveis).



Fonte: Do Autor (2018)

No que concerne à indicação de pontos padrão para o monitoramento da umidade do solo, verificou-se que de acordo com os critérios de seleção, os pontos variariam de acordo com a profundidade. Junqueira Júnior et al. (2017) também encontram pontos diferentes para diferentes profundidades. Sendo assim, para cada profundidade um ponto específico foi considerado como sendo o mais representativo, sendo este caracterizado pela menor diferença relativa média associada aos menores desvios padrão e TSI para todo o período analisado. Para a profundidade de 10 cm foram selecionados os pontos 93 e 15 como sendo os mais representativos. Para o ponto 93 a diferença relativa foi de -0,9%, o desvio padrão foi de 4,0% e o TSI igual a 4,1%. Este ponto está em área de Latossolo Vermelho-Amarelo, FESM e relevo ondulado. O ponto 15, por sua vez, teve o segundo menor valor de TSI (5,9%), a diferença média relativa de -0,2% e desvio padrão de 5,9%. O ponto está em área de Argissolo Amarelo, FESM e relevo ondulado. Para a profundidade de 20 cm foram selecionados os pontos 10 e 15. O ponto 10 está em área de FESM, Argissolo Vermelho-Amarelo e relevo ondulado. Já para a camada a 30 cm foram selecionados os pontos 7 e 8. Ambos se encontram em área de Argissolo Vermelho-Amarelo, FESM e relevo suave ondulado e plano, respectivamente. A última camada estudada (40 cm) teve os pontos 11 e 17 selecionados. Os dois pontos encontram-se em área de FESM, Argissolo Vermelho-Amarelo e relevo ondulado e suave ondulado, respectivamente.

Ressalta-se que todos os pontos selecionados se encontram em área de FESM, e com exceção do ponto 93, todos estão em áreas de argissolos. Na FESM ocorre menor grau de perturbação do solo quando comparado aos demais usos presentes na bacia. Outro fator que contribui para este resultado são as melhorias físico-hídricas do solo propiciadas pelo ambiente florestal, sobretudo pelo elevado teor de matéria orgânica e pela presença de serapilheira, como também constatado por Junqueira Júnior et al. (2017). Quanto a classe de solo Argissolo, relaciona-se a este resultado o seu elevado teor de argila e que exerce efeito sobre a retenção de água.

A Tabela 3 traz a comparação dos dados de cada ponto apontado como mais representativo da umidade do solo em cada profundidade e os valores médios dos pixels dos mapas produzidos para os respectivos meses. Como pode ser observado, ocorre ligeira subestimativa dos resultados. Os pontos 93 e 15, para a profundidade de 10 cm, apresentaram em média 7% de subestimativa da umidade no período monitorado. Já para a profundidade de 20 cm, os pontos 10 e 15, apresentaram em média de 2% e 26% de subestimativa, respectivamente. A 30 cm, os pontos 7 e 8 apresentaram, respectivamente, 7% e 6% de

subestimativa. E a 40 cm de profundidade, os pontos 11 e 17 apresentaram em média 5% de subestimativa. Verifica-se, em razão dos reduzidos valores de erro verificados no processo de validação, que estes os pontos podem representar adequadamente a umidade média na bacia hidrográfica.

**Tabela 3** – Validação dos dados apontados como representativos da umidade do solo nos diferentes meses de monitoramento para o ano hidrológico 2016/2017 para as profundidades de 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm.

10 cm						20 cm				
Data	θ	P93	Validação	P15	Validação	θ	P10	Validação	P15	Validação
out/16	28,4	*	*	27,2	-0,04	28,4	26,2	-0,09	22,5	-0,26
nov/16	29,6	26,9	-0,10	31,3	0,05	30,3	31,4	0,03	26,1	-0,16
dez/16	34,3	31,8	-0,08	34,5	0,01	33,7	34,9	0,03	31,3	-0,08
jan/17	33,3	28,8	-0,16	29,7	-0,12	31,1	31,7	0,02	25,0	-0,24
fev/17	26,4	28	0,06	24,4	-0,08	26,9	27,1	0,01	20,0	-0,34
mar/17	30,5	29,6	-0,03	27,4	-0,11	26,9	30,5	0,12	25,1	-0,07
abr/17	28,1	25,9	-0,09	24,5	-0,15	27,6	26,7	-0,03	21,6	-0,28
mai/17	29,8	27,2	-0,10	26,9	-0,11	28,8	29,4	0,02	22,0	-0,31
jun/17	30,0	28,6	-0,05	26,4	-0,14	29,2	30,3	0,04	20,5	-0,43
jul/17	25,9	23,9	-0,09	24,3	-0,07	24,1	24,8	0,03	18,1	-0,33
ago/17	24,8	22,9	-0,08	23,6	-0,05	22,4	23,5	0,05	17,4	-0,29
set/17	24,3	22,6	-0,08	23	-0,06	21,5	21,4	0,00	16,9	-0,27
		<b>Média</b>	<b>-0,07</b>	<b>Média</b>	<b>-0,07</b>		<b>Média</b>	<b>0,02</b>	<b>Média</b>	<b>-0,26</b>

30 cm						40 cm				
Data	θ	P7	Validação	P8	Validação	θ	P11	Validação	P17	Validação
out/16	27,5	28,1	0,02	27,9	0,01	26,3	25,6	-0,03	24,1	-0,09
nov/16	29,6	29,4	-0,01	28,8	-0,03	29,7	28,9	-0,03	27,9	-0,06
dez/16	31,5	31,8	0,01	30,5	-0,03	31,2	30,2	-0,03	32,3	0,03
jan/17	29,0	27,2	-0,07	29,4	0,01	28,6	27,7	-0,03	27,5	-0,04
fev/17	26,5	25,0	-0,06	25,2	-0,05	25,9	24,5	-0,06	25,5	-0,02
mar/17	29,5	27,0	-0,09	26,9	-0,10	28,7	27,6	-0,04	28,8	0,00
abr/17	27,2	24,4	-0,11	24,0	-0,13	26,9	26,5	-0,01	25,0	-0,08
mai/17	27,6	24,8	-0,11	24,3	-0,14	27,0	26,5	-0,02	24,8	-0,09
jun/17	27,4	26,3	-0,04	25,3	-0,08	26,5	26,2	-0,01	23,8	-0,11
jul/17	23,6	20,8	-0,14	22,0	-0,07	23,6	22,0	-0,07	22,6	-0,05
ago/17	21,8	19,3	-0,13	21,4	-0,02	22,4	19,9	-0,13	21,6	-0,04
set/17	21,4	19,8	-0,08	21,4	-0,07	22,2	19,2	-0,15	22,2	-0,05
		<b>Média</b>	<b>-0,07</b>	<b>Média</b>	<b>-0,06</b>		<b>Média</b>	<b>-0,05</b>	<b>Média</b>	<b>-0,05</b>

\*Falha na série de dados

Fonte: Do Autor (2018)

Os pontos de maior instabilidade por sua vez foram 12 e 7 (10 cm), 13 e 121 (20 cm), 15 e 14 (30 cm) e 13 e 14 (40 cm). Excetuando-se os pontos 7 e 15 que estão em área de

Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Amarelo, respectivamente, os demais ocorrem em áreas de Cambissolo Háplico ou Gleissolo Háplico; todos em FESM; relevo ondulado ou forte ondulado.

Assim, os resultados mostraram que o mapeamento da umidade do solo em profundidade é uma importante ferramenta para o entendimento da dinâmica da água em diferentes usos do solo, classes de solo e de relevo. Também foi possível constatar que a umidade do solo apresenta estabilidade temporal, e que o monitoramento pode ser otimizado, estabelecendo-se pontos representativos de monitoramento, otimizando o monitoramento hidrológico e corroborando para o monitoramento hidrológico de longo termo.

## **CONCLUSÕES**

O GD médio das médias mensais de umidade do solo na área de estudo foi de 95%, sendo caracterizado como forte, o que permitiu o uso da krigagem ordinária para a produção de mapas de umidade do solo para todos os meses do ano hidrológico. Os mapas permitiram avaliar o comportamento espacial da umidade ao longo do tempo em profundidade, e ainda permitiram identificar que a área de FESM permanece com os menores valores de umidade do solo ao longo do tempo. As áreas destinadas às culturas anual e perene permaneceram com os maiores valores de umidade.

As análises físico-hídricas desenvolvidas no capítulo I, os mapas de solos e de uso do solo foram essenciais para o entendimento do comportamento espacial da umidade do solo.

Foi verificada a ocorrência de estabilidade temporal da umidade do solo em profundidade, sendo que as camadas superficiais (10 cm e 20 cm) foram consideradas mais estáveis que as camadas inferiores. A análise permitiu também apontar que os pontos mais representativos da área localizaram-se no interior da área de FESM e em sua maioria estavam em área de argissolos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. Q. **Dinâmica hídrica em microbacias cultivadas com eucalipto e pastagem no leste de Minas Gerais**. 2012. Viçosa: UFV, 2012. 77p. Tese Doutorado.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V.; ROCHA, P.A.B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de mata atlântica em uma microbacia experimental em Cunha-SP. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.2, p.257-262, 2003.

ATAROFF, Michele; SÁNCHEZ, Luz Amelia. Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**, v. 41, n. 1, p. 11-30, 2000.

ATAROFF, Michele; NARANJO, María Elena. Interception of water by pastures of *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. and *Melinis minutiflora* Beauv. **Agricultural and forest meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1616-1620, 2009.

ÁVILA, Léo F.; DE MELLO, Carlos R.; DA SILVA, Antônio M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 12, 2010.

ÁVILA, L. F. et al. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1801-1810, set./out. 2011.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 7. ed. Florianópolis: UFSC, 2010. 282 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1993. 355 p.

BEVEN, K.; Germann, P. 2013. Macropores and water flow in soils revisited. **Water Resources Research** 49: 3071-3092. DOI:10.1002/wrcr.20156

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; NOVAK, J.M.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:1501-1511, 1994.

CELIK, I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. **Soil & Tillage Research** 83: 270-277. 2005

CHENG, J. D.; LIN, L. L.; LU, H. S. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 165, n. 15, p. 11-28, July 2002.

CORRADINI, C., 2014. Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. **J. Hydrol.** 516, 1–5.

CURI, N.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; MENEZES, M. D. de. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras: Editora UFLA, 1a edição, 148p, 2017.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. ArcGIS 9: Getting started with ArcGIS. Redlands: 2004. 265p.

EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Soil profile water content determination: axil response, calibration, temperature dependence, and precision. **Vadose Zone Journal**, Austin, v. 5, n. 3, p. 894-907, 2006.

GAO, L., Lv, Y., Wang, D., Tahir, M., Peng, X., 2015A. Can shallow-layer measurements at a single location be used to predict deep soil water storage at the slope scale? **J. Hydrol.** 531, 534–542.

GAO, L., Shao, M., Peng, X., She, D., 2015B. Spatio-temporal variability and temporal stability of water contents distributed within soil profiles at a hillslope scale. **Catena** 29–36.

GEVAERD, RODRIGO E FREITAS, SAULO. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera parte I: descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 1-15, 2006.

GRAYSON, R. B. et al. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, p. 2897-2908, 1997.

GUSWA, A. J. (2012). Canopy vs. Root: Production and destruction of variability in soil moisture and hydrologic fluxes. **Vadose Zone Journal**, 11(3), 1-13.

HU, W., Shao, M.A., Wang, Q.J., Fan, J., Horton, R., 2009. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. **Geoderma** 149, 355–366.

Hümann, M.; Schüler, G.; Müller, C.; Schneider, R.; Johst, M.; Caspari, T. 2011. Identification of runoff processes: the impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. **Journal of Hydrology** 409: 637-649.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ed.; Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, 2012. 91p.

JACOBS, J. M. et al. SMEX02: field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 4, p. 436-446, Sept. 2004.

JUNQUEIRA JÚNIOR., J. A. et al. Time-stability of soil water content (SWC) in an Atlantic Forest-Latosol site. **Geoderma**, v. 288, p. 64-78, 2017.

KAMGAR, A. et al. Plot size and sample number for neutron probe measurements in small field trials. **Soil Science**, The Hague, v. 156, p. 213-224, 1993.

KORSUNSKAYA, L. P.; GUMMATOV, N. G.; PACHEPSKY, Y. A. A. Seasonal changes in root bio-mass, carbohydrate content, and structural characteristics of Gray Forest soil. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 27, p. 45-52, 1995.

MACHADO, E. L. M. et al. Efeitos do substrato, bordas e proximidade espacial na estrutura da comunidade arbórea de um fragmento florestal em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 287-302, 2008.

MCBRATNEY, A. G.; WEBSTER, A. G. *Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates*. **Journal of Soil Science**, London, v. 37, n. 4, p. 617-639, 1986.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 110p. Tese Doutorado.

MELLO, C. R.; Viola, M. R.; Mello, J. M.; Silva, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.2, p.532-539, 2008.

MINET, J. et al. Temporal stability of soil moisture patterns measured by proximal ground-penetrating radar. **Hydrology and Earth Systems Science Discussions**, Göttingen, v. 10, n. 2, p. 4063-4097, Apr. 2013.

MOREIRA, N. B. et al. Análise espaço-temporal de componentes do balanço hídrico em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 60-72, jan./fev. 2014.

PINTO, Leandro Campos et al. A hydrogeological approach to a mountainous Clayey Humic Dystrudept in the Mantiqueira Range, southeastern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 1, p. 60-69, 2018.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO JUNIOR, Paulo J. and Diggle, Peter J. (2016). geoR: Analysis of Geostatistical Data. R package version 1.7-5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

RIBEIRO, L. S. et al. Spatial variability of physical attributes of a cohesive soil under conventional and no-tillage management systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1699-1702, 2016

SANTOS, T. E. M. dos; Montenegro, A. A. A.; Silva, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.7, p.670-679, 2011.

SHARMA, M. L.; BARRON, R. J. W.; WILLIAMSON, D. R. Soil water dynamics of lateritic catchments as affected by forest clearing for pasture. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 94, p. 29-46, 1987.

SYLVAIN, J. M. et al. Comparison of the spatio-temporal variability of annual minimum daily extreme flow characteristics as a function of land use and dam management mode in Quebec, Canada. **Water**, Basel, v. 7, n. 3, p. 1232-1245, 2015.

VACHAUD, G. et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 822-827, 1985.

VERECKEN, H., Kamai, T., Harter, T., Kasteel, R., Hopmans, J., Vanderborght, J., 2007. Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: a stochastic unsaturated flow perspective. **Geophys. Res. Lett.** 34, L22402. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031813>.

ZUCCO, G. et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. **Journal of hydrology**, v. 516, p. 193-199, 2014.