



**WALBERT JÚNIOR REIS DOS SANTOS**

**UMIDADE DO SOLO NA ZONA RADICULAR E  
SUA RELAÇÃO COM VIGOR VEGETATIVO  
MEDIDO POR SENSORIAMENTO REMOTO  
EM ESCALA DE MANEJO**

**LAVRAS – MG**

**2014**

**WALBERT JÚNIOR REIS DOS SANTOS**

**UMIDADE DO SOLO NA ZONA RADICULAR E SUA RELAÇÃO COM  
VIGOR VEGETATIVO MEDIDO POR SENSORIAMENTO REMOTO  
EM ESCALA DE MANEJO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. João José Marques

**LAVRAS – MG**

**2012**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Santos, Walbert Júnior Reis dos.

Umidade do solo na zona radicular e sua relação com vigor  
vegetativo medido por sensoriamento remoto em escala de manejo /  
Walbert Júnior Reis dos Santos. – Lavras : UFLA, 2014.

97 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: João José Marques.

Bibliografia.

1. EVI-2. 2. Zona radicular - Umidade do solo. 3. Manejo de  
água. 4. Manejo de solo. I. Universidade Federal de Lavras. II.  
Título.

CDD – 631.432

**WALBERT JÚNIOR REIS DOS SANTOS**

**UMIDADE DO SOLO NA ZONA RADICULAR E SUA RELAÇÃO COM  
VIGOR VEGETATIVO MEDIDO POR SENSORIAMENTO REMOTO  
EM ESCALA DE MANEJO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de fevereiro de 2014.

Dr. João José Marques	UFLA
Dr. Geraldo César de Oliveira	UFLA
Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato	EPAMIG
Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA

Dr. João José Marques  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2012**

*À querida Gilmara, com amor.*

*DEDICO*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de doutorado. A CAPES e ao CNPq.

À Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (CODEVASF), pela liberação para o término do Doutorado. Isso só foi possível pelo esforço conjunto de vários servidores de diferentes áreas, que trataram o caso de forma especial e com afinco. Saibam que serei eternamente grato por isso!

Ao professor João José Marques, pela orientação, paciência e disposição para ajudar.

Ao professor Nilton Curi, pela confiança e apoio empolgante nos trabalhos.

Aos professores Mozart Martins Ferreira, Geraldo César de Oliveira, Gilberto Coelho, Yuri Lopes Zinn, e às pesquisadoras Margarete Marin Lordelo Volpato e Helena Maria Ramos Alves pelas contribuições no trabalho e participação na banca.

A todos funcionários do DCS/UFLA.

A todos os colegas de departamento, pois muitos se tornaram amigos e alguns até padrinhos!

Aos meus pais, Waldemar e Rita pelo amor e apoio incondicional, em todas as minhas decisões nas diferentes etapas da minha vida e ao meu irmão Wesllen.

À Gilmara, pelo companheirismo, amor, apoio em todos os momentos e singular torcida.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

Índices de vegetação derivados de dados de sensores remotos podem ser indiretamente utilizados para obter informação sobre a umidade do solo de áreas agrícolas, pois em muitas regiões do mundo, a umidade no perfil do solo é o principal fator que controla o vigor das plantas. Objetivou-se, nesta tese: (i) verificar a relação entre umidade no perfil do solo (até 100 cm de profundidade) e o vigor vegetativo da planta, medido pelo Índice de Vegetação EVI-2; (ii) identificar qual é o tempo de atraso de resposta do vigor da planta para a umidade do solo, em diferentes profundidades do perfil; (iii) propor uma equação linear para a estimativa da umidade do solo pelo EVI-2; e (iv) testar a hipótese de que é possível identificar, com auxílio do EVI-2, qual profundidade do solo pode ser considerada como profundidade efetiva de extração de água pelas plantas. Os dados foram coletados em uma área de café, em São Roque de Minas, Bacia do Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. A umidade do solo foi obtida por meio de uma sonda dotada de multissensores de capacitância (MCP), no período de março a dezembro de 2010, e o vigor vegetativo do cafeeiro foi medido pelo EVI-2. Verificou-se correlação entre o vigor vegetativo das plantas de café, com a umidade do solo na zona radicular. Equações lineares foram geradas, para estimar a umidade do solo na zona radicular através do índice de vegetação, em escala de manejo (perfil do solo explorado pela cultura). Existe um tempo de atraso de resposta do vigor do cafeeiro com a umidade do solo, e esse tempo varia de acordo com a profundidade e o conteúdo de água no perfil do solo.

Palavras-chave: EVI-2. Relação Solo-Água-Planta. Manejo da água e solo.

## ABSTRACT

Vegetation indexes derived from satellite data can be indirectly utilized for obtaining information on moisture in the soil root zone in cropped areas, considering that the soil profile moisture in many regions of the world is the main factor controlling plant vigor. In this context, the aims of this work were: (i) to verify the relationship between moisture in the soil profile (until 100-cm depth) and the vigor of the plant, as measured by Vegetation Index EVI-2, (ii) to identify which is the plant vigor response time delay for soil moisture at different depths of the profile, (iii) to propose linear equations for estimating soil moisture by EVI-2, and (iv) to test the hypothesis that is possible to identify, with the aid of the EVI-2, which soil depth can be considered the effective depth of water absorption by plants. Data were collected in a coffee crop area at São Roque de Minas, Upper São Francisco River basin, Minas Gerais state, Brazil. The soil moisture was measured with a multi-sensor capacitance (MCP) probe, from March to December, 2010 and the coffee plant vigor was evaluated by Vegetation Index EVI-2. It was verified correlation between vegetative vigor of coffee plants and soil moisture in the root zone. Linear equations were generated to estimate soil moisture in this zone using vegetation indexes at soil management scale (soil profile explored by the crop). There is a response time delay of coffee vigor to soil moisture, and this time varies according to depth and water content in the soil profile. The highest correlation was obtained at a depth of 60 cm, indicating that this depth is the one that best reflects the plant's water status.

Keywords: EVI-2. Soil-water-plant relationships. Soil water management.



## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	9
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	10
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	11
<b>2.1 Região do Alto São Francisco</b> .....	11
<b>2.2 Água no perfil do solo da área de estudo</b> .....	13
<b>2.3 Sensoriamento remoto para o estudo da umidade do solo</b> .....	15
<b>3. Objetivos</b> .....	17
<b>4. Conclusões</b> .....	18
<b>5. Considerações Finais</b> .....	18
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	19
<b>SEGUNDA PARTE – Artigo</b> .....	21
<b>Artigo: Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale</b> .....	21
<b>ABSTRACT</b> .....	22
<b>1. Introduction</b> .....	25
<b>2. Material and methods</b> .....	30
<b>2.1 Study area</b> .....	30
<b>2.2 Soil moisture data acquisition</b> .....	31
<b>2.3 Plant vigor data acquisition by EVI-2</b> .....	32
<b>2.4 Statistical analysis</b> .....	33
<b>3. Results and discussion</b> .....	34
<b>4. Conclusions</b> .....	39
<b>ACKNOWLEDGMENTS</b> .....	39
<b>REFERENCES</b> .....	40
<b>Table and Figures:</b> .....	45

## **PRIMEIRA PARTE**

### **Introdução Geral**

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O teor de água no perfil do solo varia ao longo do tempo, sendo resultado de processos hidrológicos de pluviosidade, capilaridade, drenagem, escoamento, evapotranspiração e irrigação (SILVA, 2012), e é um dos principais fatores de controle do crescimento/vigor da vegetação, sobretudo em regiões que apresentam períodos secos pronunciados (MAGAGI; KERR, 2001; WANG et al., 2007). No entanto, o teor de água do solo é difícil de mensurar devido à grande variabilidade espacial e temporal (KONG; DORLING; SMITH, 2011).

Para o cafeeiro cultivado em solos profundos, a exemplo da maioria dos solos do Cerrado brasileiro, o principal fator limitante ao seu cultivo, na modalidade sequeiro, é a água, devido ao pronunciado período seco e constantes veranicos no período chuvoso (EVANGELISTA; CARVALHO; SEDIYAMA, 2002). Isso ocorre, principalmente, devido à pobreza química dos solos dessa região que normalmente só é corrigida superficialmente, o que acarreta em pequena exploração pelas raízes, no perfil. Algumas promissoras iniciativas de construção da fertilidade química de solos em profundidade e consequente mitigação da limitação hídrica, sem degradação estrutural, vêm sendo relatadas (SERAFIM, 2011; SILVA, 2012). No entanto, a confirmação desses relatos necessita de estudos da dinâmica espaço temporal da água, o que exige o monitoramento constante da umidade do solo (SILVA, 2012), destacando que para grandes áreas e particularmente na sub-superfície do solo isso é um grande desafio. Dessa forma, a possibilidade de obtenção de informações frequentes sobre as condições hídricas do solo em vastas áreas, com base em respostas de plantas obtidas de sensores remotos, é assunto de grande interesse científico, por várias vantagens, destacando-se a praticidade na obtenção de alguns dados já processados e a periodicidade dos mesmos.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguir é apresentado o referencial teórico sobre os principais tópicos da tese, com as descrições pedoclimáticas da área de estudo, o comportamento da água no perfil do solo da área de estudo e o sensoriamento remoto para o estudo da umidade do solo.

### **2.1 Região do Alto São Francisco**

A área de estudo está inserida na Bacia do Rio São Francisco, especificamente na cidade de São Roque de Minas, MG (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Cwa (clima temperado brando de verão quente e úmido, e inverno seco). Esse clima é responsável pela sazonalidade da dinâmica hídrica da região, sendo que o déficit hídrico no inverno, geralmente, é o principal fator da queda do vigor da vegetação nativa e das culturas agrícolas. Além disso, mesmo no período de maior precipitação, há geralmente dias sem chuvas, denominados veranicos, que também geram déficit hídrico, com conseqüente perda de vigor pelas plantas. A precipitação e a temperatura média anual da região são de 1.344 mm e 20,7°C, respectivamente (MENEGASSE; GONÇALVES; FANTINEL, 2002).



Figura 1 Localização da área de estudo

Os solos da classe Latossolos com textura argilosa ou muito argilosa são os que predominam na área de estudo, seguidos pela classe Cambissolo (SILVA, 2012). Embora exista cultivo de café nos Cambissolos e em outras classes de solos da região, há uma preferência para o cultivo em áreas de Latossolos, principalmente pelo relevo suavizado, o que favorece a mecanização. Todavia, ainda que profundos e com boas características físicas (elevada permeabilidade e baixa densidade, devido à estrutura do tipo microgranular) (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999), os Latossolos possuem limitações químicas ao longo de todo o perfil, com elevados teores de  $Al^{3+}$  e baixa fertilidade natural, o que limita o desenvolvimento das raízes, deixando as lavouras mais susceptíveis a déficits hídricos e incapazes de absorver água e nutrientes em maiores profundidades (GUIMARÃES, 1992; SILVA, 2012).

O período seco prolongado da região do Alto São Francisco, somado à pobreza química dos solos da região, podem comprometer a cultura do cafeeiro, tendo sua viabilidade geralmente atrelada à recomendação de irrigação (FERNANDES et al., 2000). No entanto, manejos que visam o maior crescimento radicular do cafeeiro, podem suprir a necessidade de irrigação, como o sistema AP Romero, que se caracteriza pelo uso de altas doses de gesso e cultivo de braquiária nas entrelinhas dos cafeeiros. Além do plantio semiadensado; correção da fertilidade do solo até 60 cm de profundidade; plantio antecipado e monitoramento do estado nutricional das plantas e manejo das adubações com base em análise foliar, realizadas no período de dezembro a abril. Informações mais detalhadas do referido manejo em Serafim (2011).

## **2.2 Água no perfil do solo da área de estudo**

O teor de água no perfil do solo é influenciado pelos atributos do solo (textura, mineralogia, matéria orgânica, estrutura), pelo clima (quantidade de chuva, períodos secos, etc), disponibilidade de irrigação, processos hidrológicos e cobertura do solo. Nesse sentido, apresenta uma elevada variabilidade espacial (ao longo do perfil do solo) e temporal (KONG; DORLING; SMITH, 2011).

Tal fato pode ser observado pela superfície contínua de profundidade x tempo (SCPT) elaborada por Silva (2012) (figura 2).

A SCPT (figura 2) foi gerada utilizando técnicas de geoestatística, com a mesma base de dados utilizada no presente trabalho, e demonstra o comportamento dinâmico da água no perfil do solo, que apresentou elevada correlação com a pluviosidade do período em estudo. Pela SCPT sugere-se, que a camada de 50 a 75 cm é onde há maior atividade do sistema radicular (SILVA, 2012).

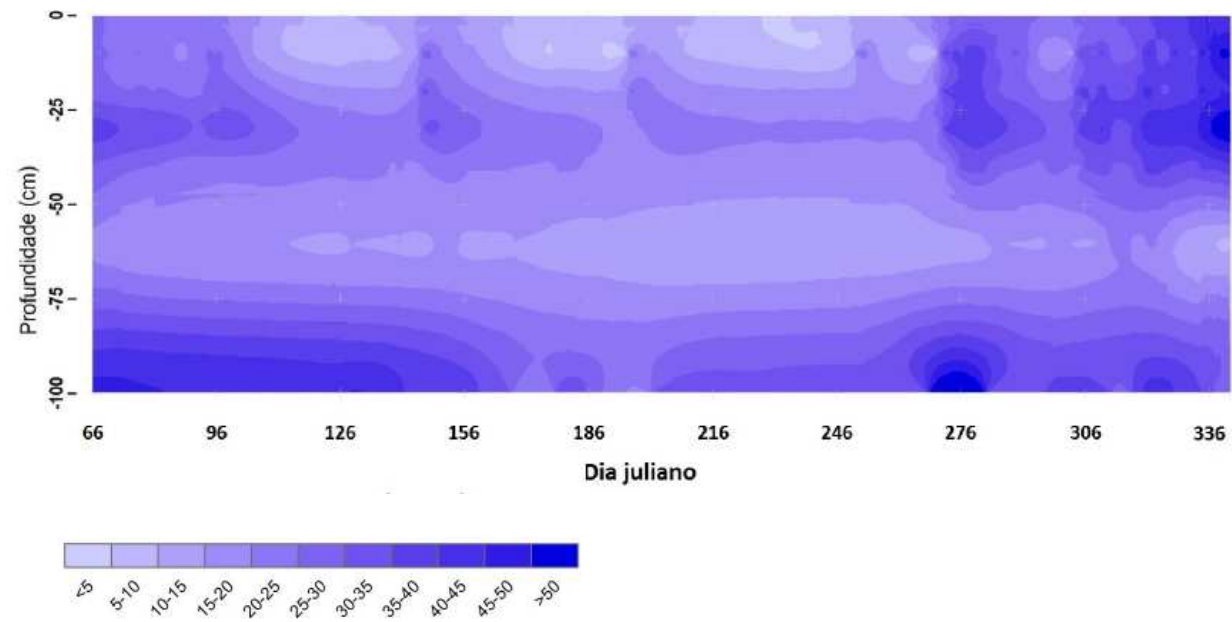


Figura 2 Superfície contínua de profundidade x tempo (SCPT), dados em %. Fonte: Silva (2012)

### 2.3 Sensoriamento remoto para o estudo da umidade do solo

Dados provenientes de sensores remotos vêm sendo utilizados com sucesso para estimar a umidade, em camadas superficiais do solo (MULDER et al., 2011), todavia essa informação é limitada a poucos centímetros abaixo da superfície ( $\pm 5$  cm) (CROSSON; LIMAYE; LAYMON, 2005), não contemplando toda a zona de extração de água, pelas raízes (LIU et al., 2012). Além disso, os sensores remotos são menos efetivos em áreas cobertas com vegetação (NARAYAN; LAKSHMI; NJOKU, 2004). Assim, para estimar a variação da umidade do solo na zona radicular de extração de água, alguns estudiosos, a exemplo de Liu et al. (2012), Schnur, Xie e Wang (2010) e Wang et al. (2007), utilizaram como princípio o controle exercido pela umidade do solo na zona radicular sobre o vigor da planta, medido por índices de vegetação.

Índices de vegetação são combinações, por meio de operações matemáticas, de imagens de satélite de diferentes comprimentos de onda, com o objetivo de realçar a vegetação em uma única imagem e são comumente utilizados para uma grande variedade de estudos envolvendo vegetação. Exemplos de índices de vegetação amplamente utilizados em estudos ambientais são o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o EVI (Enhanced Vegetation Index), ambos disponíveis gratuitamente pela NASA oriundos do satélite Terra/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). O NDVI utiliza as bandas referentes ao infravermelho próximo e a do vermelho, e apesar da utilidade desse índice para estudos de vegetação, ele apresenta algumas limitações, como a alta influência do solo no valor do NDVI e a saturação do índice em áreas com elevada biomassa (JIANG et al., 2008). Nesse contexto, o EVI foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação com o aumento da sensibilidade em regiões com alta biomassa, redução da influência da atmosfera e do solo no valor do índice. Além das bandas do vermelho e do



infravermelho próximo, o EVI utiliza também a banda do azul (MENDEZ-BARROSO et al., 2009). Jiang et al. (2008) desenvolveram o EVI-2, com resultados muito semelhantes ao EVI, porém esse não utiliza dados no comprimento de onda do azul. Dados do EVI-2 do satélite Terra/MODIS estão disponibilizados gratuitamente pelo laboratório virtual do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para qualquer coordenada geográfica da América do Sul, desde o ano de 2000 (<<http://www.dsr.inpe.br/laf/series/>>).

Os índices de vegetação quantificam a evolução da área foliar, sanidade e vigor da vegetação, que é influenciada, dentre outros fatores, pelo conteúdo de água no solo e clima (LIU et al., 2012). Isso ocorre, pois a planta ajusta seus processos biológicos para coincidir com a condição local de clima e disponibilidade de água (SCHNUR; XIE; WANG, 2010), no entanto, como observado por diversos autores (LIU et al., 2012; MENDEZ-BARROSO et al., 2009; SCHNUR; XIE; WANG, 2010; WANG et al., 2007), a planta necessita de um tempo para responder às modificações do ambiente, denominado no presente trabalho como “tempo de atraso de resposta” (*response time delay*).

Wang et al. (2007) obtiveram êxito ao estimar a umidade do solo na zona radicular por meio de índices de vegetação, encontrando uma correlação significativa e consistente, concluindo que o NDVI pode prover uma boa aproximação, para a umidade do solo na zona radicular mapeando grandes áreas (diferentes regiões climáticas). Entretanto, em condições de Brasil, não foram encontrados na literatura estudos de correlação entre índices de vegetação e umidade do solo para a zona radicular, em escala de manejo e cultivo para uma cultura específica.

É importante destacar que estudos de correlação, entre índice de vegetação e umidade do solo, devem ser realizados com base em dados de umidade do solo monitorados em condições de campo, considerando-se também, as especificidades de cada planta cultivada, atributos do solo e clima da região

onde se é feito o cultivo (WANG et al., 2007), necessidade essa que foi observada no presente estudo.

### **3. Objetivos**

Objetivou-se, neste trabalho: (i) verificar a relação entre umidade no perfil do solo e o vigor vegetativo do café, medido pelo Índice de Vegetação EVI-2; (ii) identificar qual é o tempo de atraso de resposta do vigor da planta, para a umidade do solo em diferentes profundidades do perfil; (iii) propor um método para estimativa da umidade do solo pelo EVI-2; e (iv) testar a hipótese que é possível identificar, com auxílio do EVI-2, qual profundidade do solo pode ser considerada como profundidade efetiva de extração de água pelas plantas, por ser essa informação muito importante para o manejo racional da água no solo.

Para atingir os objetivos supracitados, utilizou-se a seguinte metodologia: Os dados foram coletados em uma área de café, em São Roque de Minas, Minas Gerais. A umidade do solo foi obtida por meio de uma sonda dotada de multissensores de capacitância (MCP), no período de março a dezembro de 2010, e o vigor vegetativo do cafeeiro foi medido pelo EVI-2. Verificou-se correlação entre o vigor vegetativo das plantas de café com a umidade do solo, na zona radicular. Equações lineares foram geradas para estimar a umidade do solo na zona radicular através do índice de vegetação, em escala de manejo (perfil do solo explorado pela cultura).

#### **4. Conclusões**

As conclusões do artigo apresentado na segunda parte da tese foram:

- O tempo de atraso de resposta da planta do cafeeiro modifica-se de acordo com a profundidade e o teor de água no perfil do solo;
- É possível a estimativa do teor de água na zona radicular, utilizando o EVI-2 em escala de manejo (perfil do solo explorado pela cultura);
- A maior correlação entre o teor de água no solo e o EVI-2 foi observada na camada de 60 cm, indicando que essa profundidade é a que melhor reflete a situação hídrica da planta.

#### **5. Considerações Finais**

- O EVI-2 é um índice de vegetação já processado e disponibilizado gratuitamente em uma interface agradável, potencializando sua utilidade para usuários com conhecimentos básicos de processamento de imagens;
- A metodologia aplicada no presente estudo pode ser utilizada para outras culturas perenes e semiperenes, principalmente para regiões com período seco pronunciado (maior parte do Brasil).

## REFERÊNCIAS

CROSSON, W. L.; LIMAYE, A. S.; LAYMON, C. A. Parameter sensitivity of soil moisture retrievals from airborne Cand X-Band radiometer measurements in SMEX02. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Caceres, v. 43, n. 12, p. 2842-2853, Dec. 2005.

EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. G. de; SEDIYAMA, G. C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 445-452, 2002.

FERNANDES, A. L. T. et al. Deficiência hídrica e uso de granulados em lavoura cafeeira irrigada por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 376-381, set./dez. 2000.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 513-524, jul./set. 1999.

GUIMARÃES, P. T. G. O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: IBRAFOS, 1992. p. 175-190.

JIANG, Z. et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, Oct. 2008.

KONG, X.; DORLING, S.; SMITH, R. Soil moisture modeling and validation at an agricultural site in Norfolk using the Met Office surface exchange scheme (MOSES). **Meteorological Applications**, Malden, v. 18, n. 1, p. 18-27, Mar. 2011.

LIU, S. et al. Spectral responses to plant available soil moisture in a Californian grassland. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 9, n. 6, p. 31-44, Oct. 2012.

MAGAGI, R. D.; KERR, Y. H. Estimating surface soil moisture and soil roughness over semiarid areas from the use of the copolarization ratio. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 75, n. 3, p. 432-445, Mar. 2001.

MÉNDEZ-BARROSO, L. A. et al. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 377, n. 1, p. 59-70, Mar. 2009.

MENEGASSE, L. N.; GONÇALVES, J. M.; FANTINEL, L. M. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 9-21, May 2002.

MULDER, V. L. et al. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 1/2, p. 1-19, Apr. 2011.

NARAYAN, U.; LAKSHMI, V.; NJOKU, E. G. Retrieval of soil moisture from passive and active L/S band sensor (PALS) observations during the Soil Moisture Experiment in 2002 (SMEX02). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 4, p. 483-496, Sept. 2004.

SCHNUR, M. T.; XIE, H.; WANG, X. Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA. **Ecological Informatics**, New York, v. 5, n. 5, p. 400-409, Sept. 2010.

SERAFIM, M. E. **Manejo do solo na melhoria de atributos físico-hídricos e químicos para a cultura do cafeeiro**. 2011. 119 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SILVA, B. M. **Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco, MG**. 2012. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

WANG, X. et al. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 340, n. 1/2, p. 12-24, June 2007.

**SEGUNDA PARTE – Artigo**

**Artigo: Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed  
by remote sensing at management scale**

Normas da Revista Geoderma, submetido em 09/11/2012, aceito para publicação  
em 04/01/2014

### **ABSTRACT**

Vegetation index derived from satellite data can be indirectly utilized for obtaining information on moisture in the soil root zone in cropped areas, considering that the soil profile moisture in many regions of the world is the main factor controlling plant vigor. In this context, the aims of this work were: (i) to verify the relationship between moisture in the soil profile (until 100-cm depth) and the vigor of the plant, as measured by Vegetation Index EVI-2, (ii) to identify which is the plant vigor response time delay for soil moisture at different depths of the profile, (iii) to propose linear equations for estimating soil moisture by EVI-2, and (iv) to test the hypothesis that is possible to identify, with the aid of the EVI-2, which soil depth can be considered the effective depth of water absorption by plants. Data were collected in a coffee crop area at São Roque de Minas, Upper São Francisco River basin, Minas Gerais state, Brazil. The soil moisture was measured with a multi-sensor capacitance (MCP) probe, from March to December, 2010 and the coffee plant vigor was evaluated by Vegetation Index EVI-2. It was verified correlation between vegetative vigor of coffee plants and soil moisture in the root zone. Linear equations were generated to estimate soil moisture in this zone using

vegetation indexes at soil management scale (soil profile explored by the crop). There is a response time delay of coffee vigor to soil moisture, and this time varies according to depth and water content in the soil profile. The highest correlation was obtained at a depth of 60 cm, indicating that this depth is the one that best reflects the plant's water status.



SOIL MOISTURE IN THE ROOT ZONE AND ITS RELATION TO  
PLANT VIGOR ASSESSED BY REMOTE SENSING AT  
MANAGEMENT SCALE

Authors:

Walbert Júnior Reis dos Santos <sup>a,b,\*</sup>; Santos, W.J.R

Bruno Montoani Silva <sup>a</sup>; Silva, B.M.

Geraldo César de Oliveira <sup>a</sup>; Oliveira, G.C.

Margarete Marin Lordelo Volpato <sup>c</sup>; Volpato, M.M.L.

José Maria de Lima <sup>a</sup>; Lima, J.M.

Nilton Curi <sup>a</sup>; Curi, N.

João José Marques <sup>a</sup>; Marques, J.J.

<sup>a</sup>Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – DCS/UFLA, Campus universitário

Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brazil.

<sup>b</sup>Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba – CODEVASF, CEP 39400-000, Montes Claros, Minas Gerais, Brazil.

<sup>c</sup>Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG, Campus universitário, Caixa Postal 176, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brazil.

\* Corresponding author. Tel.: +55 35 38291267; fax: +55 35 38291251.

E-mail address: walbert\_santos@yahoo.com.br (W.J. R. Santos).

Abbreviations:

EVI, Enhanced Vegetation Index; NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; MCP, multi-sensor capacitance probe; R<sup>2</sup>, coefficient of determination; r, Pearson correlation coefficient; CSDT, Continuous surface depth versus time;  $\theta$ , water content ( $m^3 m^{-3}$ ).

KEYWORDS: EVI-2, Soil-water-plant relationships, Root-zone soil moisture, Soil water-management

## 1. Introduction

Water content in soil profiles changes with time as result of rainfall distribution, soil capillarity and drainage, run-off, evapotranspiration, and irrigation (Silva, 2012). It is one of the main factors that affect plant growth and vigor (Magagi and Kerr, 2001; Wang et al., 2007). However, the high spatial and temporal variability of soil moisture influenced by the heterogeneity of soil texture, topography, vegetation, and climate in the natural environment makes soil moisture difficult to measure (Kong et al., 2011).

For coffee trees cultivated in deep soils, such as the main soils in the Cerrado region of Brazil, the main limiting factor is water due to lengthy dry spells during the rainy season (Evangelista et al., 2002). Water sources for irrigation in São Francisco River basin, included in the Cerrado region, are becoming scarce (ANA, 2011); therefore, strategies aiming for the optimization of water use in agricultural systems are crucial (Silva, 2012; Serafim, 2011; Serafim et al., 2011). These soils have low  $\text{Ca}^{2+}$  contents and high  $\text{Al}^{3+}$  saturation which prevent the root system from growing deeply into depths where moisture is adequate. Gypsum amendments presumably can mitigate these chemical limitations

and stimulate the root system to grow deeper in the soil (Serafim et al., 2011; Silva, 2012; Silva et al., 2012a). However, these field observations need to be confirmed by space-temporal dynamics studies of soil moisture monitoring (Silva, 2012).

Although remote sensing data has been successfully used to estimate the moisture content near the soil surface (Mulder et al., 2011), this information is limited to a few centimeters below the surface ( $\pm 5$  cm) (Crosson et al., 2005) and does not allow access to the whole zone from where water can be absorbed by roots (Liu et al., 2012); besides, the sensors that are used in such studies are less sensitive in vegetated areas (Narayan et al., 2004). Thus, Crow et al. (2008), Liu et al. (2012), Schnur et al. (2010) and Wang et al. (2007) used vegetation indexes, obtained by remote sensing, to measure plant vigor and relate it to the soil moisture in the root zone, in view of that the soil moisture status also influences vegetation growth, and thereby changes the spectral characteristics of the vegetation (Wang et al., 2010).

The vegetation indexes combine satellite data at different wavelengths to separate vegetation patterns in a single scene or image (Rouse et al., 1973); this is commonly used for a wide variety of studies

involving vegetation (Jiang et al., 2008). Examples of widely used vegetation indexes in environmental studies are NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index), both available at the Terra/MODIS satellite (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). The NDVI uses the near infra-red and red bands, and despite the usefulness of that index for vegetation studies, it still shows some limitations, such as the effective influence of the soil conditions and saturation of the index in high biomass areas (Jiang et al., 2008). Due to these limitations, the EVI was developed to increase the signal from the high biomass vegetation and to reduce the atmospheric and soil influences on the index values. Besides the near infra-red and red bands, the EVI also uses the blue band (Méndez-Barroso et al., 2009). Jiang et al. (2008) developed the EVI-2, which produces results very similar to EVI. However, it does not use data in the blue wavelength which is originated from the Terra/MODIS satellite, and it is free of charge at the virtual laboratory of the National Institute of Space Research (INPE) for any geographical coordinate in South America, since the year 2000, in the following site: <http://www.dsr.inpe.br/laf/series/>. This site was developed within the concept of a remote sensing virtual laboratory (Freitas et al.,

2011), aiming to furnish support to studies and analyses involving land use and coverage changes, and it has a friendly interface being easy to handle for different users.

The vegetation indexes can quantify the leaf area and the health and vigor of the vegetation, which are influenced, among other factors, by climate and soil moisture content (Liu et al., 2012). This happens because plants adjust their biological processes to match local climate and water availability in the soil (Schnur et al., 2010). However, as observed by Liu et al. (2012), Méndez-Barroso et al. (2009), Schnur et al. (2010) and Wang et al. (2007), plants need time to respond to changes in atmospheric conditions, which is called “response time delay” in the present work. According to Zhang et al. (2011), this delay reduces the relation between the vegetation index and the soil moisture, and this aspect needs to be taken into consideration when the vegetation index is used to estimate soil moisture.

More recently, Bezerra et al. (2013), utilized data from Landsat satellite to estimate soil moisture at root zone for cotton crop in the Brazilian semi-arid; however, they did not use vegetation indexes but an empiric equation proposed by Scott et al. (2003). Chen et al. (2014)

utilized NDVI to quantify the impact of soil moisture on vegetation at large spatial and long-term temporal scales in Australia, but they work only at 0-10 cm depth, similarly, Wang et al. (2010) utilized NDVI and surface temperature in China's Yongding River basin base to estimate soil moisture at 0-20 cm depth. Wang et al. (2007) successfully estimated the soil moisture in the root zone (until 100 cm depth) based on vegetation indexes. The authors found that NDVI is a good tool for mapping soil moisture content in the root zone in large areas under semi-arid and humid climates. It is important that correlation studies between vegetation index and soil moisture be based on field data considering the specificities of crops, soil properties, and climate of a particular region (Wang et al., 2007); these factors were included in the present study.

In this context, the objectives of this work were: (i) to verify the relationship between moisture content in the soil profile (until 100 cm depth) and the vegetative vigor of the plants, measured by the EVI-2; (ii) to identify the response time delay of plant vigor to the soil moisture at different profile depths; (iii) to propose equations to estimate the soil moisture by using EVI-2; and (iv) to test the hypothesis that EVI-2 can identify the depth where water is more available for the plants, which is

of paramount importance for the crop management in regions having a well-defined dry season as in the present study.

## **2. Material and methods**

### **2.1 Study area**

This study was conducted in a crop area with two-year-old *Coffea arabica* L. Catucaí cultivar, spaced 2.5 m between rows and 0.65 m between plants. The experimental area is located at São Roque de Minas, Upper São Francisco River Basin, state of Minas Gerais, Brazil, with coordinates of 20°15' 24" S and 46°18" WGr, at an average altitude of 900 m. The climate in this area is Cwa, according to the Köppen classification, with an annual average precipitation of 1344 mm, a well-defined dry season between May and September, an average annual temperature of 20.7°C, and average relative humidity of 60% (Menegasse et al., 2002).

The coffee crop was implanted on a typic dystrophic Red Latosol (EMBRAPA, 2013), corresponding to an Anionic Acrustox (Soil Taxonomy, 1999), which is representative of large areas in the Cerrado region and in Brazil. Some soil characterization data are presented in Table 1.

The soil management in the area is described in Serafim et al. (2011) and summarized as follows: The planting furrows, 0.50-m wide and 0.60-m deep, were accordingly limed and fertilized for the coffee crop. After planting the seedlings, high doses of agricultural gypsum were applied on the soil surface. Brachiaria grass was planted between the plant rows to promote soil covering and nutrient cycling (Serafim et al., 2011). Organic material on the soil surface near the gypsum band was scraped and swept towards the plant row.

## **2.2 Soil moisture data acquisition**

The water content in the soil profile was instantly measured with a multi-sensor capacitance probe (MCP) (*Profile probe-Delta T*, Cambridge, UK,  $\pm 0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Since it is a non-destructive method, it is possible to monitor soil moisture at different depths at the same time. Previous calibration of the probe was performed, allowing to obtaining high accuracy measurements (Silva et al., 2012b). The probe was installed in the planting row, between plants, for measuring soil moisture at 10-, 20-, 30-, 40-, 60-, and 100-cm depth, during 276 days, from March 2010 to December 2010, which includes the whole dry season of 2010 plus the



beginning of the rainy season of 2010-2011. Soil moisture was recorded all day long at 4 h intervals.

### **2.3 Plant vigor data acquisition by EVI-2**

To evaluate plant vigor, data of three cells (pixels), with a spatial resolution of 250 m, from 17 previously processed and smoothed EVI-2 images (Freitas et al., 2011) were used. Those three cells encompass the whole studied area. The image data were obtained from the virtual laboratory of the National Institute of Space Research (INPE) (<http://www.dsr.inpe.br/laf/series/>). The data from the EVI-2 were filtered using information sensor angle view, reflectance spectral bandwidth and pixel date of observation, so the information obtained is a result of smoothing the data series without any treatment (Freitas et al., 2011), so the image date was considered to really represent itself.

Calculation of EVI-2 utilizes MODIS images from the MOD13 product (Jiang et al., 2008) with a spatial resolution of 250 m and a temporal resolution of 16 days, made available by NASA. EVI-2 presents results similar to EVI, the first being developed to optimize the vegetation response signal, reducing the influence of the soil and the atmosphere

(Jiang et al., 2008). EVI-2 values range from 0 to 1, and values close to 1 indicate higher plant vigor.

#### **2.4 Statistical analysis**

Pearson correlation coefficients ( $r$ ) were calculated averaging the three pixels of EVI-2 of each one of the 17 images (one image for each date) and relating them to the soil moisture contents (for 10-, 20-, 30-, 40-, 60-, and 100-cm depth) at 0, 5, and 10 days of time delay related to the EVI-2 image date. This methodology was proposed by Wang et al. (2007) and Schnur et al. (2010) to access plant vigor in response to soil profile moisture and time response of plant vigor to the soil moisture at distant sites, and here it was employed at soil management scale.

The highest Pearson correlation coefficient values were selected for linear regressions between EVI-2 and the soil moisture, allowing to test the data dependency by the  $R^2$  correlation coefficient, besides generating functions for estimating the moisture content in the soil profile. Continuous surface depth versus time (CSDT) was employed to access the water content in the soil profile within the studied time frame (Silva, 2012).

### **3. Results and discussion**

The temporal variation of the EVI-2 was directly related to the hidropedology conditions of the area (Figures 1 and 2), which was also observed by Méndez-Barroso et al. (2009). The highest EVI-2 values were observed at times of higher rainfall and soil water content (Figures 1 and 2), indicating high photosynthetic and biomass accumulation activity, similar to what happens on native vegetation during the rainy summer months (Ferreira et al., 2006). On the other hand, the lowest values occurred during the dry period, due to the lower photosynthetic vigor of the coffee plants, caused by the water deficit (Sims and Gamon, 2002), resulting in lower plant vigor as measured by EVI-2. This was also observed by Ferreira et al. (2006), both in agricultural and native ecosystems at the Cerrado region of Brazil.

For all the case scenarios, the highest correlation coefficients involving EVI-2 and soil moisture occurred before either 5- or 10-day delay (Figure 3). That can be related to chlorophyll content and growth rate, influenced by the previous climatic conditions of some days or weeks (Liu et al., 2012). Such a behavior was also observed by other authors (Liu et al., 2012; Méndez-Barroso et al., 2009; Schnur et al., 2010; Zhang et al., 2011; Wang et al., 2007).

The highest correlation coefficients (0.90 and 0.87) were observed for the moisture at 60-cm depth, with a time delay of 5 days, and at 40-cm depth, with a time delay of 10 days, respectively (Figure 3). Thus, those two conditions were chosen for making a linear regression between EVI-2 and the soil moisture (Figure 4). The generated equations can be used to estimate soil water content at those depths, as a tool to identify water deficit conditions, as done for other ample regions by Wang et al. (2007) and Schnur et al. (2010). These authors proposed that the soil moisture in the root zone can be estimated by vegetation indexes generated from remote sensing. However, such equations can only be applied under specific plant, climate and soil conditions; any change on these factors also changes the relationship between soil moisture and the vegetation index (Liu et al., 2012) as well as the plant response time to the soil moisture (Zhang et al., 2011).

The highest plant vigor time response to the soil moisture at 40-cm depth (10-day delay) (Figure 3) can be accounted for the lower evaporation - no solar radiation and wind - as compared to the more superficial layers, and furthermore, at 40-cm depth, the water content was even higher than at 60 cm (Figure 2). According to Wang et al. (2007), at

higher moisture conditions, the time response of the vegetative vigor has a longer delay. Therefore, the moisture content at 40-cm depth seems to be more closely related to the vegetative vigor, when a 10-day time delay is considered for EVI-2 data collection (Figure 3).

The shorter time response at 60-cm depth (5-day delay) is due to its lower water content, as observed during the entire study (Figure 3). Small moisture changes in that depth are more quickly detected by plants, resulting in faster response. The same behavior was observed by Wang et al. (2007), when comparing semi-arid and humid areas.

The high correlation between plant vigor and soil moisture at 60-cm depth can be associated to the higher water absorption by the coffee plants at that depth, such as observed by Silva (2012) in another study using the same database (Figure 2). For the same plant age, management practices, and precipitation conditions, Silva (2012) concluded that the soil layer between 45 and 75 cm was the one from where water was most absorbed by the roots. He observed a dry front in that layer (Figure 2), which matched high root density. Silva (2012) also pointed that the plant furrow was limed and fertilized up to 60-cm depth, which favored root

growth as in a “pot”, where water and nutrients are readily available to be absorbed.

Water content at 60-cm depth supports the concept of an effective soil depth for water absorption by roots, since this concept is widely used as a parameter for defining water management (Bernardo, 2006). This depth is also used in studies of crop water balance (Carvalho et al., 2011) and crop water consumption (Silva et al., 2009; Brito et al., 2009), and it is also used for defining planting season using climatologic water balance tools (Araújo et al., 2011). Other papers mentioned that the effective depth of the root system for water absorption by coffee plants should include the depth of 60 cm, as in Huxley (1974) who proposed 45 to 75 cm layer, and Daker (1976) who proposed the 60 and 80 cm layer.

It was found the lowest correlation coefficient between soil moisture and vegetative vigor at 100-cm depth (Figure 3). Few roots at this depth indicate lower water absorption by plants (Silva, 2012), showing little or no effect on plant vigor as measured by the EVI-2.

Low correlation of soil moisture with plant vigor was also noticed on the 0 to 20 cm layer. In this case, high seasonal variability of water content near the surface seems to be the reason for such a result (Figure

3). At the surface, soil is more likely to get moist but quicker to dry (Hu et al., 2010). Thus, although the soil layer near the surface is commonly considered a zone of high root activity (González and Alves, 2005; Mota et al., 2011), here the moisture content at that layer was not correlated to the vegetative behavior of the plant.

The significant high correlations found in the present work (Figures 3 and 4) indicate the potential of using EVI-2 to assess the moisture content at the root zone, on a management scale (soil profile explored by the crop), as already proposed by Wang et al. (2007) and Schnur et al. (2010) for huge areas situated at climatic conditions quite different from the Brazilian Cerrado region. It is worthy to mention that the EVI-2 is available, processed and smoothed in the INPE site, amplifying the possibility of use of the results of this paper for diverse users type, having different levels of knowledge of remote sensing and image processing.

Future studies involving EVI-2, a wide variety of crops, under different climates and soils are stimulated.

#### **4. Conclusions**

1. Response time delay of coffee plants changes according to depth and water content in the soil profile.
2. It is feasible to estimate root zone water content using EVI-2 at management scale (soil profile explored by the crop).
3. The highest correlation between soil water content and EVI-2 was observed at 60 cm, indicating that this depth is the one that best reflects the plant's water status.

#### **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors thank FAPEMIG, CNPq and CAPES for the scholarship granted to the authors; Embrapa Café and FAPEMIG for funding the project; and EPAMIG and AP Group for the logistical support and assistance on the field work. The first author thanks CODEVASF for releasing him to conclude his Ph.D. program.



## REFERENCES

ANA. Agencia Nacional de Águas – Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. <[http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr\\_nacional.htm](http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/abr_nacional.htm)>. March 1st, 2011.

Araujo, M.A., Souza, J.L.M.D., Tsukahara, R.Y., 2011. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33, 23–31.

Bernardo, S., 2006. Manual de Irrigação. first ed. Imprensa Universitária, Viçosa.

Bezerra, B. G., Santos, C. A. C. dos, Silva, B. B. da, Perez-Marin, A. M., Bezerra, M. V. C., Bezerra, J. R. C., Rao, T. V. R., 2013. Estimation of soil moisture in the root-zone from remote sensing data. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 596–603.

Brito, A.D.S., Libardi, P.L., Gilberto, P.J., 2009. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 295-303.

Carvalho, H.P., Dourado Neto, D., Teodoro, R.E.F., Melo, B., 2011. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. *Biosci. Journal*, 27, 221–229.

Chen, T., de Jeu, R. A. M., Liu, Y. Y., Van der Werf, G. R., Dolman, A. J., 2014. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: a case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, 140, 330–338.

Crosson, W.L.; Limaye, A.S., Laymon, C.A., 2005. Parameter sensitivity of soil moisture retrievals from airborne Cand X-Band radiometer measurements in SMEX02. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43, 2842-2853.

Crow, W., Kustas, W., Prueger, J., 2008. Monitoring root-zone soil moisture through the assimilation of a thermal remote sensing-based soil moisture proxy into a water balance model. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1268–1281.

Daker, A., 1976. *A água na agricultura: Manual de hidráulica agrícola*, fifth ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro.

Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. *Sistema brasileiro de classificação de solos*, third ed. Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro.

Evangelista, A.W. P., Carvalho, L.G. de, Sedyama, G.C., 2002. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 445-452.

Ferreira, M.E., Ferreira, L.G., Huete, A.R., Peccinini, A.A., 2006. Análise comparativa dos produtos MODIS Ecologia para o monitoramento biofísico ambiental do bioma cerrado. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, 251–260.

Freitas, R. M., Arai, E., Adami, M., Ferreira, A.S., Sato, F.Y., Shimabukuro, Y.E., Rosa, R.R., Anderson, L.O., Rudorff, B.R., 2011. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 2, 57–68.

González, A.P., Alves, M.C., 2005. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental* 9, 45-50.

Kong, X., Dorling, S., Smith, R. 2011. Soil moisture modeling and validation at an agricultural site in Norfolk using the Met Office surface exchange scheme (MOSES). *Meteorol. Appl.*, 18, 18-27.

Hu, W., Shao, M., Han, F., Reichardt, K., Tan, J., 2010. Watershed scale temporal stability of soil water content. *Geoderma* 158, 181-198.

Huxley, P.A., Patel, R.Z., Kabaara, A.M., Mitchell, H.W., 1974. Tracer studies with P on the distribution of functional roots of Arabica coffee in Kenya. *Annals of Applied Biology* 77, 159-180.

Jiang, Z., Huete, A., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3833–3845.

Liu, S., Roberts, D.A., Chadwick, O.A., Still, C.J., 2012. Spectral responses to plant available soil moisture in a Californian grassland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, 31–44.

Magagi, R. D., Kerr, Y.H., 2001. Estimating surface soil moisture and soil roughness over semiarid areas from the use of the copolarization ratio. *Remote Sensing of Environment*, 75, 432–445.

Méndez-Barroso, L. A.; Vivoni, E. R.; Watts, C. J.; Rodríguez, J. C., 2009. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region. *Journal of Hydrology*, 377, 59–70.

Menegasse, L.N., Gonçalves, J.M., Fantinel, L.M., 2002. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Revista Águas Subterrâneas* 16, 9-21.

Mota, J.C.A., Libardi, P.L., Brito, A. dos S., Júnior, R.N. de A., Filho, J.A., 2010. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 1721-1731.

Mulder, V.L., Bruin, S.de, Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — a review. *Geoderma*, 162, 1–19.

Narayan, U., Lakshmi, V., Njoku, E.G. 2004. Retrieval of soil moisture from passive and active L/S band sensor (PALS) observations during the Soil Moisture Experiment in 2002 (SMEX02). *Remote Sensing of Environment*, 92, 483–496.

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM*, Washington. Proceedings. Washington: NASA, 1, 309-317.

Schnur, M. T.; Xie, H.; Wang, X., 2010. Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA. *Ecological Informatics*, 5, 400–409.

Scott, C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M. 2003. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. *J. Irrig. Drain.*, 129, 326-335.

Serafim, M.E., 2011. Manejo do solo na melhoria de atributos físico-hídricos e químicos para a cultura do cafeeiro. Doctorate thesis, Federal University of Lavras. 119 pp.

Serafim, M.E., Oliveira, G.C. De, Oliveira, A.S. De, Lima, J.M. De, Guimarães, P.T.G., Costa, J.C., 2011. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. *Bioscience Journal* 27, 964–977.

Silva, A.L., Bruno, I.P., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., Dourado-neto, D., Favarin, J.L., Costa, F.M.P., and Timm, L.C., 2009. Soil water extraction by roots and Kc for the coffee crop. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, 257–261.

Silva, B.M. 2012. Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco (MG). Master dissertation, Federal University of Lavras. 78 pp.

Silva, B.M., Oliveira, G.C., Silva, E.A., Oliveira, L.M., Serafim, M.E., 2012a. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. *Bioscience Journal* 28, 338-345.

Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva Júnior, J.J., Colombo, A., Lima, J.M., 2012b. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 277-286.

Sims, D.A., Gamon, J.A., 2003. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84, 526–537.

Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, second ed., USDA Soil Conservation Service, US Gov. Printing Office, Washington, DC. <<http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy>>.

Wang, X., Xie, H., Guan, H., Zhou, X., 2007. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of Hydrology*, 340, 12–24.

Wang, H., Li, X., Long, H., Xu, X., Bao, Y., 2010. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: a case study in China's Yongding River basin. *Catena*, 82, 135–145.

Zhang, L., Ji, L., Wylie, B. K.. 2011. Response of spectral vegetation indices to soil moisture in grasslands and shrublands. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 5267–5286.

**Table and Figures:**

Table 1. Soil physical and chemical analyses<sup>a</sup> of the 0-0.2 m layer (Ap horizon) and 0.6-0.8 m layer (Bw horizon) of the soil used in this study.

Variable	Horizon sampled	
	Ap	Bw
Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	38	16
Bulk density (Mg m <sup>-3</sup> )	0.89	0.79
Total porosity (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.67	0.65
Microporosity (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.45	0.41
Macroporosity (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.22	0.24
Clay (g kg <sup>-1</sup> )	763	819
Silt (g kg <sup>-1</sup> )	198	148
Sand (g kg <sup>-1</sup> )	39	33

<sup>a</sup> Embrapa (1997)

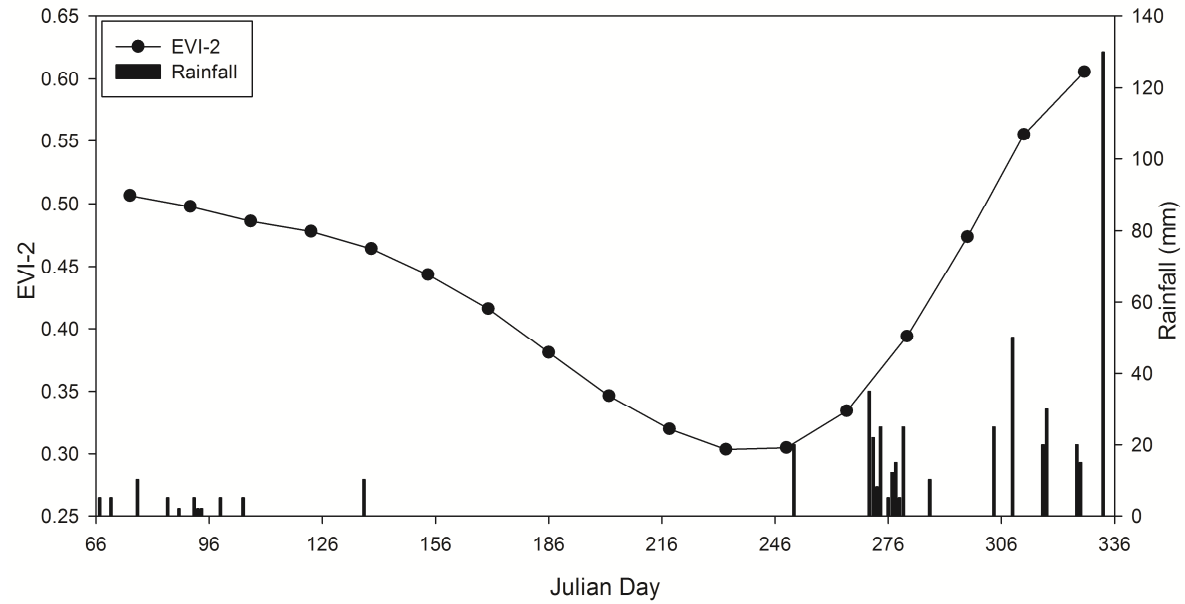


Figure 1. Temporal behavior of the EVI-2 vegetation index and average rainfall of the study period.

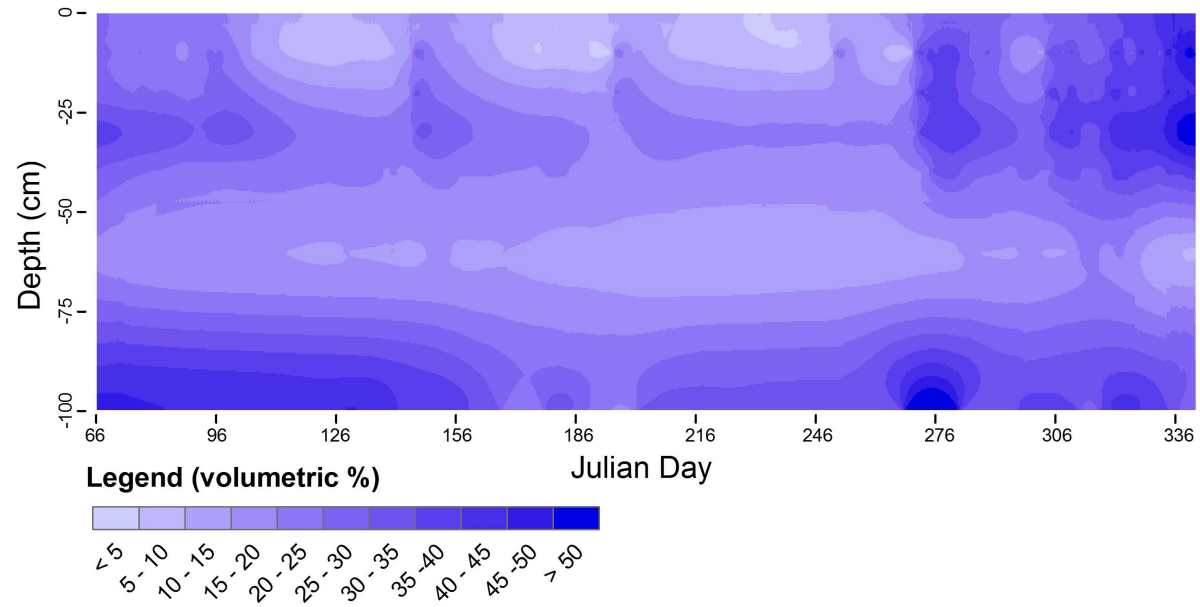


Figure 2. Continuous surface depth x time for soil moisture of the study area. Source: Silva (2012).



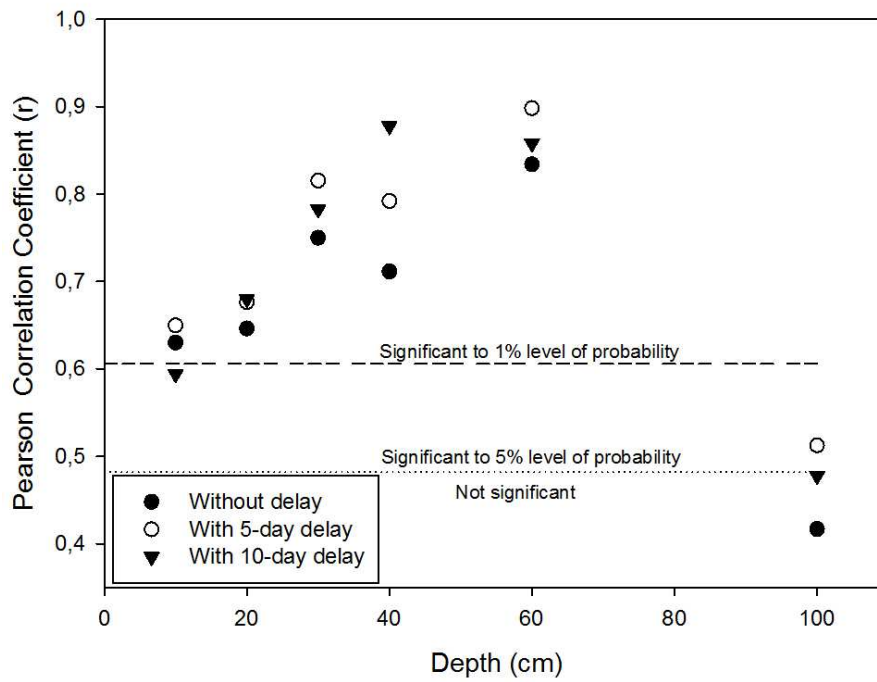


Figure 3. Pearson correlation between EVI-2 and soil moisture at different soil profile depths and different EVI-2 delay times (values above the dashed line are significant to 1% level of probability, values between the dotted and dashed lines are significant to 5% probability, values below the dotted line are not significant).

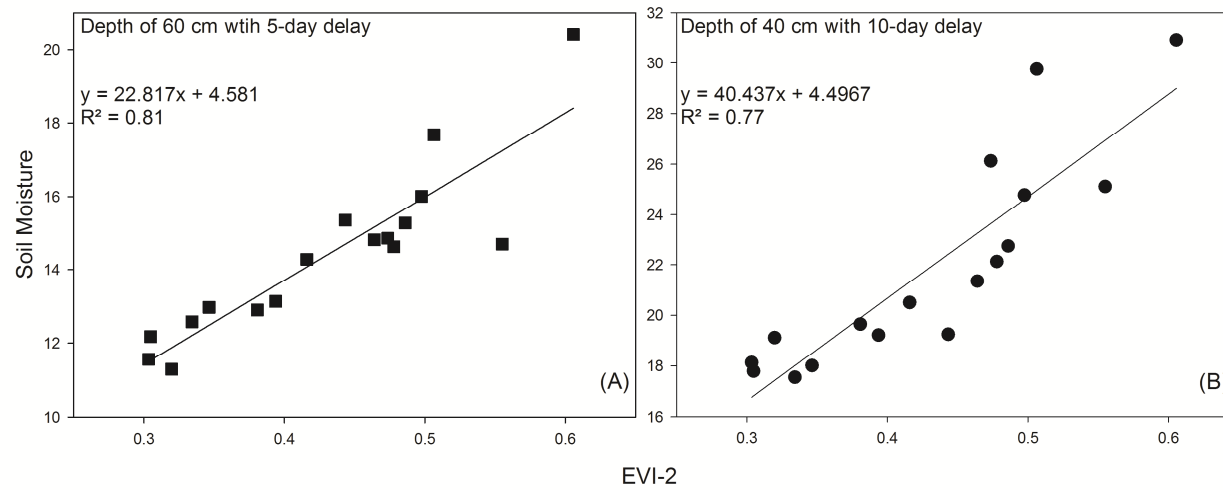


Figure 4. Linear regression adjustment between soil moisture ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) and EVI-2 at 60 cm depth with 5-day delay (A), and at 40 cm depth with 10-day delay (B).