

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas usando a abordagem em espaço de estados em uma área de terras baixas cultivada com arroz irrigado por aspersão

Letiane Helwig Penning

Pelotas-RS, 2016

Letiane Helwig Penning

Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas usando a abordagem em espaço de estados em uma área de terras baixas cultivada com arroz irrigado por aspersão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Orientador: Luís Carlos Timm
Co-Orientadores: Adilson Luís Bamberg
Oswaldo Rettore Neto

Pelotas-RS, 2016

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P414r Penning, Letiane Helwig

Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas usando a abordagem em espaço de estados em uma área de terras baixas cultivada com arroz irrigado por aspersão / Letiane Helwig Penning ; Luís Carlos Timm, orientador ; Osvaldo Rettore Neto, Adilson Luís Bamberg, coorientadores. — Pelotas, 2016.

64 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Arroz irrigado. 2. Umidade do solo. 3. Terras baixas. 4. Variáveis climáticas. 5. Modelo autoregressivo. I. Timm, Luís Carlos, orient. II. Rettore Neto, Osvaldo, coorient. III. Bamberg, Adilson Luís, coorient. IV. Título.

CDD : 633.18

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

LETIANE HELWIG PENNING

Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas usando a abordagem em espaço de estados em uma área de terras baixas cultivada com arroz irrigado por aspersão

Data da defesa: 17/06/2016

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luís Carlos Timm (Orientador)

Depto. Engenharia Rural - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" – UFPel

Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFSul

Prof. Dr. Willian Silva Barros

Instituto de Física e Matemática – UFPel

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais Sildomar e Neida, a minha irmã Islem e meu cunhado Éverton, ao meu namorado Flávio Renato e a minha avó Hilda.

Agradecimentos

À Deus, que me orientou, me deu forças, coragem, confiança, paciência e fé. Que guiou meus passos até aqui e nunca me faltou.

À minha família, pela paciência e confiança, pelo suporte, pelo amor e pelo carinho.

Ao Flávio, namorado querido, pelo amor, carinho, dedicação, compreensão e mais do que tudo pela amizade de sempre.

Ao Orientador, Professor Dr. Luís Carlos Timm, pela orientação e transmissão de seus conhecimentos, confiança, incentivo e amizade durante o mestrado.

Ao Co-orientador, Professor Dr. Osvaldo Rettore Neto pela amizade e contribuição no mestrado.

Ao Co-orientador, Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg pela amizade e contribuição no mestrado.

Aos colegas e amigos que sempre estiveram ao meu lado dando apoio e incentivo.

À Professora Dra Cláudia Liane Rodrigues de Lima pela amizade e incentivo durante o mestrado.

À EMBRAPA pela disposição de recursos para a elaboração do estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (PPG MACSA), juntamente com seus professores pela oportunidade do aperfeiçoamento.

À FAPERGs pelo auxílio financeiro.

Resumo

PENNING, Letiane Helwig. **Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas usando a abordagem em espaço de estados em uma área de terras baixas cultivada com arroz irrigado por aspersão.** 2016. 64 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS.

A umidade do solo é uma variável importante para todos os processos ligados ao sistema solo-planta-atmosfera devido à sua relevante participação na separação da chuva em infiltração e escoamento superficial, desempenhando um papel importante no crescimento das culturas e em estudos que visam a conservação do solo e da água. O monitoramento espacial e temporal da umidade do solo é um processo caro e demorado, o que torna necessária uma metodologia adequada para garantir uma boa representatividade de seu comportamento no campo. Neste sentido, Vachaud et al. (1985) propuseram uma metodologia para análise da estabilidade temporal da umidade do solo no intuito de reduzir o número de locais de medidas necessários para analisar o seu comportamento em um determinado solo. O objetivo geral do trabalho foi o de caracterizar a estabilidade temporal da umidade do solo, camada de 0-0,20 m de profundidade, em um solo cultivado com arroz sob irrigação por aspersão por meio da estatística descritiva e do método de Vachaud et al. (1985) bem como avaliar o potencial de aplicação da abordagem de espaço de estados no estudo do relacionamento temporal entre o armazenamento de água no solo e algumas variáveis climáticas. O experimento foi conduzido em uma área pertencente a Embrapa Clima Temperado situada no município do Capão do Leão-RS, cultivada com a cultura do arroz irrigado por aspersão utilizando-se um sistema linear móvel Valley. O estudo foi conduzido de novembro de 2012 a março de 2013 compreendendo o período da safra da cultura do arroz (safra 2012-2013), totalizando 133 dias. Foram instalados de forma aleatória 70 sensores Watermark® e sete sensores de temperatura do solo na área experimental, profundidade de 0,10 m no intuito de representar a camada de 0-0,20 m, para fazer o monitoramento contínuo da tensão de água no solo e da temperatura no solo. As leituras de tensão foram transformadas em umidade do solo a base de volume (θ) a partir da curva de

retenção de água no solo determinadas próximo a cada ponto de monitoramento da tensão. Aos dados experimentais da curva de retenção foi ajustado o modelo matemático de van Genuchten para a curva de retenção de água de um solo. A estabilidade temporal da umidade do solo em cada sensor instalado na camada de 0-0,20 m, foi avaliada pelo método de Vachaud et al. (1985). Após a identificação do ponto que apresentava a maior estabilidade espaço-temporal da umidade do solo na camada de 0-0,20 m, foram calculados os valores do armazenamento de água no solo. Para caracterizar a estrutura de variabilidade temporal do armazenamento de água do solo nesse ponto foram aplicadas ferramentas da estatística descritiva e da análise de séries temporais. Também foram avaliadas as estruturas das variáveis chuva, evapotranspiração potencial, umidade relativa do ar, temperatura do ar e radiação solar, coletadas a partir de uma estação meteorológica automática instalada próximo a área experimental. O relacionamento temporal entre o armazenamento de água no solo e as variáveis climáticas foi avaliado por meio da abordagem de espaço de estados. Resultados mostram que a metodologia de Vachaud et al. (1985) indicou o ponto de monitoramento 32 como o que apresentou a maior estabilidade temporal da umidade do solo, na camada de 0-0,20 m, na área cultivada com arroz irrigado por aspersão no período de estudo; o desempenho do modelo de espaço de estados construído para estudar o relacionamento temporal entre a variável armazenamento de água no solo e chuva + irrigação foi ligeiramente superior aos demais envolvendo as variáveis armazenamento de água no solo, chuva + irrigação e evapotranspiração potencial; e a abordagem em espaço de estados pode potencialmente ser usada como interpolador temporal dos dados de armazenamento de água no solo em função das variáveis chuva + irrigação e evapotranspiração potencial.

Palavras-chave: arroz irrigado, umidade do solo, terras baixas, variáveis climáticas, modelo autoregressivo.

Abstract

PENNING, Letiane Helwig. **Temporal relation between soil water storage and climate variables using the state space approach in a lowland area cultivated with sprinkler irrigated rice.** 2016. 64 f. Dissertation (Master of Science) – Postgraduate Program at Soil and water management and conservation. Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas. Pelotas, RS, Brazil.

Soil moisture is an important variable for all processes related to soil-plant-atmosphere system due to its significant relevance in the partitioning of rainfall into infiltration and runoff, playing an important role in the growth of crops and studies aimed at soil conservation and water. The spatial and temporal monitoring of soil moisture is an expensive and time process, which an appropriate methodology is necessary to ensure a good representation of its behavior in the field. In this sense, Vachaud et al. (1985) proposed a methodology for analysis of temporal stability of soil moisture in order to reduce the number of local measures needed to analyze their behavior in a given field. The overall objective of this study was to characterize the temporal stability of soil moisture, 0-0.20 m soil layer, in a cultivated soil with rice under sprinkler irrigation by using descriptive statistics and the Vachaud's et al. methodology as well as to assess the potential application of the state-space approach to understand the temporal relationship between soil water storage and some climate variables. The experiment was carried out in an area belonging to Embrapa Temperate Climate located in the county of Capão do Leão-RS, Brazil, cultivated with rice irrigated by a sprinkler lateral move Valley system. The study period was from November 2012 to March 2013 covering the rice crop cycle (2012-2013 season), totaling 133 days. In the experimental area, 70 Watermark® sensors and seven soil temperature sensors were randomly installed at the depth of 0.10 m in order to represent the layer of 0-0.20 m, to the continuous monitoring of soil water tension and soil temperature. The soil water tension readings were transformed into soil moisture basis volume using the soil water retention curve which was determined close to each soil sensor. The experimental data of each retention curve was adjusted to the van Genuchten's mathematical model to describe the soil water retention curve. The temporal stability of soil moisture in each sensor installed in the 0-0.20 m layer was evaluated by the method of Vachaud et al. (1985). After identifying the point that had the highest spatial and temporal stability of soil moisture in the layer of 0-0.20 m, soil water storage values were calculated. To characterize the temporal variability structure of soil water storage data, statistical tools from

descriptive statistics and time series analysis were used. We also evaluated the temporal structures of rainfall, potential evapotranspiration, relative humidity, air temperature and solar radiation variables which were obtained from an automatic weather station installed close to the experimental area. The temporal relationship between soil water storage and climate variables was assessed by the state space approach. Results show that the Vachaud's et al. methodology indicated the monitoring point number 32 as the highest soil moisture temporal stability in the study period; the performance of the state space model to study the temporal relationship between soil water storage and rainfall + irrigation variables was slightly higher than the others involving soil water storage, rainfall + irrigation and potential evapotranspiration variables; and the state space approach can potentially be used as a temporal interpolator of soil water storage data as a function of the used climate variables.

Keywords: irrigated rice, soil moisture, lowland, climate variables climáticas, autoregressive model.

Sumário

1. Introdução	12
2. Objetivo geral	12
2.1 Objetivos específicos	12
3. Revisão de literatura	13
3.1 Importância da cultura do arroz e seu manejo de água	13
3.2 Estabilidade temporal da umidade do solo	15
3.3 Variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo	17
3.3.1 Séries temporais e espaciais: definição	17
3.3.2 Ferramentas estatísticas para o estudo da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo	21
3.3.2.1 As funções de autocorrelação e crosscorrelação	21
3.3.2.2 A abordagem em espaço de estados	24
4. Material e métodos	31
4.1 Implantação do experimento	31
4.2 Monitoramento da tensão de água no solo	32
4.3 Avaliação da estabilidade temporal da umidade do solo	33
4.4 Estudo da relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas por meio da abordagem em espaço de estados	34
5. Resultados e discussão	38
5.1 Estabilidade temporal da umidade do solo	38

5.2 Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas por meio da abordagem em espaço de estados.....	40
6. Conclusões.....	53
7. Referências bibliográficas	54

1. Introdução

O arroz é a base alimentar de mais de três bilhões de pessoas e é considerado como um dos alimentos mais importantes na alimentação humana (SOSBAI, 2012). O estado do Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor de arroz no Brasil, utilizando o sistema de cultivo irrigado com inundação contínua que é geralmente associado a baixa eficiência do uso da água pela cultura, ou seja, a baixa quantidade de grãos produzida em relação ao volume de água utilizado na lavoura. Uma alternativa de produção que tem se mostrado viável economicamente, com significativa economia de água no cultivo do arroz é a adoção do método de irrigação por aspersão.

Apesar do método de irrigação por aspersão possibilitar maior economia de água quando comparado ao método de irrigação por superfície, as irregularidades da lâmina aplicada e, principalmente, a variabilidade espacial e temporal dos atributos físico-hídricos do solo fazem com que o armazenamento de água no solo apresente grandes variações no espaço e no tempo, fato importante visto que a umidade em que o solo se encontra é fundamental para proceder um adequado e racional manejo da irrigação.

Muitos trabalhos têm sido publicados sobre a variabilidade espacial de atributos do solo, porém, menor atenção tem sido dada à variabilidade temporal dos mesmos. Apesar disto, nos últimos anos têm aumentado o interesse pela análise da dinâmica temporal, principalmente da umidade do solo, especialmente após a publicação do artigo de Vachaud et al. (1985). Uma das metas elaboradas pelos autores, com o propósito de analisar a estabilidade temporal, era oferecer um método que pudesse reduzir o número de locais de medidas necessárias para analisar o comportamento de um determinado solo. Uma vez que a umidade do solo pode variar consideravelmente no espaço e no tempo, é necessário um grande número de pontos de sua medida nas áreas irrigadas. Desta forma, este

procedimento amostral demanda tempo e recursos, sendo adotado um valor médio, supostamente representativo com certo grau de precisão, obtido a partir de um conjunto de medidas diretas ou indiretas, realizadas na área. No entanto, alguns locais ou pontos na área são consistentemente mais úmidos ou consistentemente mais secos do que o valor médio da umidade. Em função disso, o conceito de estabilidade temporal também pode ser utilizado para otimizar o esquema de amostragem, ajudando a identificar, dentro de uma área de interesse, a localização dos pontos que representam a umidade do solo média na área em estudo.

A cadeia produtiva do arroz irrigado no RS tem sido pressionada pela opinião pública no sentido de diminuir a demanda hídrica do arroz irrigado pelo sistema de inundação contínua. Desta forma, a racionalização do uso da água na lavoura arrozeira passará em uma primeira etapa por uma mudança de como a irrigação tem sido praticada ao longo das últimas décadas. Estudos preliminares têm apontado que as produtividades de arroz obtidas no sistema de aspersão tipo pivô têm-se mostrado comparáveis às de lavouras irrigadas por inundação, entretanto, ainda não foram suficientes para estimular a expansão do sistema de irrigação por aspersão (pivô central ou sistema linear móvel). Pesquisas iniciais apontam para uma economia de água para o cultivo de arroz irrigado por aspersão, em comparação com o sistema inundado.

Por se tratar de uma considerável mudança no manejo da irrigação, a ser adotado no sistema de aspersão quando comparado ao que vem sendo tradicionalmente praticado na lavoura orizícola, diversos aspectos merecem atenção por parte das Instituições de Ensino e Pesquisa. Dentre eles, se destaca o estudo do ambiente físico no qual a planta se desenvolve particularmente relacionado ao sistema solo-água, no intuito de buscar técnicas de manejo mais apropriadas para a racionalização do uso da água e para a obtenção de produtividades mais elevadas da cultura do arroz. O presente trabalho foi desenvolvido a partir da hipótese de que ferramentas da estatística descritiva e da estatística temporal e espacial podem ser aplicadas no estudo do relacionamento entre variáveis físico-hídricas do solo e variáveis climáticas em um solo cultivado com arroz em sistema plantio direto e sob irrigação por aspersão.

2. Objetivo geral

Caracterizar a estabilidade temporal da umidade do solo em um solo cultivado com arroz sob irrigação por aspersão por meio da estatística descritiva e do critério de Vachaud et al. (1985) e avaliar o potencial de aplicação da abordagem de espaço de estados no estudo do relacionamento temporal entre o armazenamento de água no solo e algumas variáveis climáticas.

2.1 Objetivos específicos

- Avaliar a variabilidade e a estabilidade temporal da umidade do solo, camada de 0-0,20 m de profundidade, em um solo cultivado com arroz sob irrigação por aspersão, aplicando a estatística descritiva e o critério de Vachaud et al. (1985);
- Identificar o(s) ponto(s) de medida(s) da umidade do solo na área experimental no intuito de reduzir o esforço amostral para seu monitoramento;
- Avaliar o relacionamento temporal entre o armazenamento de água no solo, camada de 0-0,20 m de profundidade, e as variáveis chuva, umidade relativa do ar, temperatura do ar, evapotranspiração potencial e radiação solar por meio da abordagem em espaço de estados;
- Avaliar a capacidade da abordagem em espaço de estados na interpolação temporal dos valores de armazenamento de água em solo cultivado com arroz irrigado por aspersão.

3. Revisão de literatura

3.1 Importância da cultura do arroz e seu manejo de água

O arroz é a base alimentar de mais de três bilhões de pessoas e é considerado como um dos alimentos mais importantes na alimentação humana (SOSBAI, 2012). As lavouras de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (RS) se destacam no cenário brasileiro, pois respondem atualmente por cerca de 70% da produção nacional de arroz, sendo cultivado em cerca de um milhão de hectares, sobretudo em áreas de várzeas, apresenta uma produtividade média de 5,740 kg ha⁻¹ (IBGE, 2015).

Em nível mundial, o consumo total de água na atualidade é de 200 km³ ano⁻¹, mas poderá atingir 360 km³ ano⁻¹ em 2025, mantida a tendência de crescimento populacional. Desta forma, é necessária uma gestão adequada para que a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos não seja ameaçada no planeta. O estado do RS é o maior produtor de arroz do Brasil, com estimativa de produção em torno de oito milhões e meio de toneladas para a safra 2015/2016 (IBGE, 2015), prevalecendo o uso do sistema de cultivo irrigado com inundação contínua elevando seu índice de uso de água na agricultura (NORONHA, 2006). O sistema de irrigação por inundação contínua é geralmente relacionado à baixa eficiência do uso da água pela cultura, ou seja, a baixa quantidade de grãos produzida em relação ao volume de água utilizado na lavoura, visto que além de suprir a evapotranspiração da cultura são necessários volumes de água para saturação do solo e para manutenção da lâmina de água na sua superfície e ainda há volumes perdidos por percolação e infiltração lateral (STONE et al., 2006).

No sistema de irrigação por inundação a eficiência do uso da água depende da topografia da área, das características físico-hídricas do solo e de cuidados

operacionais no que se refere à construção de drenos e canais de irrigação. O consumo médio de água pela lavoura arroseira no RS é historicamente de $2 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ($17,3 \text{ mm dia}^{-1}$) com uma eficiência de irrigação de 40 a 45% que, em condições adequadas de solo, relevo e manejo da água pode atingir 60% (EMBRAPA, 2005). Recentemente, uma alternativa de produção que vem sendo utilizada por alguns produtores e que tem se mostrado viável economicamente com significativa economia de água no cultivo do arroz é a adoção do método de irrigação por aspersão. Pesquisas iniciais apontam para uma economia de água ao redor de 40 a 50% para o cultivo de arroz irrigado por aspersão em comparação ao sistema inundado (CONCENÇO et al., 2009).

Tomando-se como a necessidade de água média estimada por ciclo de arroz de $12.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (STEINMETZ, 2004), o consumo de água em lavouras de arroz somente no RS é de 12 bilhões de metros cúbicos em cada estação de cultivo. Caso apenas 10% desta área fosse convertida da inundação tradicional para pivôs centrais, por exemplo, a economia de água em lavouras de arroz seria de 600 milhões de metros cúbicos em um único ciclo de cultivo.

Além da economia de água, a adoção da aspersão como método de irrigação na cultura do arroz apresenta outras vantagens adicionais como a possibilidade da adoção da semeadura direta com rotação de culturas. Em áreas de cultivo de arroz sob inundação, a adoção tanto de sistemas de rotação de culturas como de semeadura direta são seriamente limitados (BAMBERG et al., 2009) em decorrência do uso de áreas de baixada naturalmente mais úmidas ou que mantêm a umidade no solo por mais tempo. Aliado a isto, a necessidade da manutenção da lâmina de água na lavoura de arroz faz com que sistemas que possibilitem a drenagem eficiente das áreas em anos em que o arroz não é cultivado não sejam implantados de maneira adequada (SILVA; PARFITT, 2004).

Com o cultivo de arroz sob aspersão, o solo não é tão intensamente trabalhado durante os tratos culturais. O sistema preconiza a aplicação de água ao arroz somente em níveis em que o solo pode reter sem encharcar e de acordo com a necessidade hídrica da cultura (TOESCHER et al., 2005), aumentando a estabilidade dos agregados, capacidade de sustentação e manutenção da porosidade, que estão diretamente relacionados a capacidade de armazenamento de água e aeração do solo (PALMEIRA et al., 1999). Apesar do método de irrigação por aspersão possibilitar maior economia de água quando comparado ao método de

irrigação por superfície, as irregularidades da lâmina aplicada e, principalmente, a variabilidade espacial e temporal dos atributos físico-hídricos do solo fazem com que o armazenamento de água no solo apresente grandes variações no espaço e no tempo (DONGLI et al., 2012), fato importante visto que a umidade em que o solo se encontra é fundamental para proceder um adequado e racional manejo da irrigação (SOUZA et al., 2011; ZUCCO et al., 2014; HUANG et al., 2016).

3.2 Estabilidade temporal da umidade do solo

O monitoramento espacial e temporal das propriedades do solo em escala de campo é um processo caro e demorado, o que torna necessária uma amostragem bem estruturada para garantir uma boa cobertura da variabilidade espacial e temporal (CORBANE et al., 2007). Entretanto, os custos dos trabalhos em campo podem ser significativamente reduzidos pela definição de uma estratégia de amostragem adequada (CICHOTA et al., 2006, SOUZA et al., 2011). Desta forma, especial interesse nesta temática tem sido dispendida após a publicação do artigo de Vachaud et al. (1985) em que foi feita uma análise da estabilidade temporal da umidade do solo no intuito de buscar um método que pudesse reduzir o número de locais de medidas necessários para analisar o seu comportamento em um determinado solo.

A umidade do solo desempenha papel importante nos processos hidrológicos e no transporte de sedimentos devido à sua relevante participação na separação da precipitação em infiltração e escoamento superficial, desempenhando um papel importante no crescimento das culturas (ÁVILA et al., 2011; ZHANG et al., 2012; HUANG et al., 2016). Além disso, a umidade do solo tem uma grande influência sobre uma gama de processos hidrológicos, incluindo inundações, erosão, transporte de solutos e interações solo-atmosfera, sendo, portanto, de grande utilidade em estudos que visam a conservação do solo e da água (SILVA et al., 2001; WESTERN et al., 2004; ÁVILA et al., 2011).

O conteúdo de água no solo, ou na maioria das vezes chamada de umidade do solo, é um dos fatores mais importantes para a produção agrícola (BISWAS; SI, 2013) e é muito variável, tanto no tempo como no espaço, sendo que o conhecimento de sua dinâmica espaço-temporal é necessário para uma produção agrícola sustentável e manejo eficiente dos recursos hídricos (ZUCCO et al., 2014;

HUANG et al., 2016). Uma gestão eficiente no manejo da água no solo é muito importante em sistemas de irrigação de cultivos agrícolas. Neste sentido, os recentes avanços tecnológicos tornaram os sensores utilizados no monitoramento da água no solo uma forma eficiente e automatizada na operação de sistemas de irrigação. Sensores para o controle de umidade no solo têm sido usados em várias práticas de gestão de recursos hídricos, como em estudos relacionados ao rendimento das culturas, manejo de bacias hidrográficas, monitoramento ambiental, agricultura de precisão e irrigação (CHOW et al., 2009). Na agricultura de precisão, muitos instrumentos e métodos têm sido utilizados para monitorar e medir a umidade do solo como tensiômetros, blocos de resistência, métodos gravimétricos entre outros (LEIB et al., 2002; CHOW et al., 2009). Dentre os sensores baseados em resistência elétrica, o sensor denominado watermark tem sido amplamente utilizado e possui características técnicas favoráveis para o monitoramento da irrigação, devido à durabilidade, facilidade de instalação e automação (THOMPSON et al., 2006).

Uma vez que a umidade varia consideravelmente no espaço e no tempo, é necessário um grande número de pontos de amostragem nas áreas irrigadas. Este procedimento amostral demanda tempo e recursos, sendo adotado um valor médio, na maioria das vezes, supostamente representativo com certo grau de precisão, obtido a partir de um conjunto de medidas diretas ou indiretas realizadas na área experimental (GONÇALVES; FOLEGATTI; SILVA, 1999). No entanto, alguns locais ou pontos amostrais na área podem ser consistentemente mais úmidos ou consistentemente mais secos do que o valor médio de umidade do solo (BISWAS; SI, 2013). O trabalho publicado por Vachaud et al. (1985) foi um dos primeiros a estudar a similaridade temporal do padrão espacial em armazenamento de água do solo, denominando-a de “estabilidade temporal”. Para avaliar a estabilidade temporal, Vachaud et al. (1985) analisaram as diferenças entre os valores em cada posição e o valor médio no espaço, ao longo do tempo.

A identificação da estabilidade temporal da distribuição de umidade permite monitorar o armazenamento de água no solo de modo eficaz, com redução do esforço amostral (GONÇALVES; FOLEGATTI; SILVA, 1999; SOUZA et al., 2011; TIMM et al., 2011; ZUCCO et al., 2014). Esse conceito pode ser de grande utilidade no manejo da irrigação no que tange a aplicação da agricultura de precisão (STARR, 2005). Rolston et al. (1991) fizeram uso do conceito de estabilidade temporal para

monitorar a água no solo no sistema de irrigação localizada e concluíram que, se esta estabilidade ocorre, então o monitoramento do seu armazenamento pode ser feito em apenas alguns pontos. Tais pontos são os que sistematicamente apresentam valores próximos da média geral, conforme proposto por Vachaud et al. (1985).

A existência da estabilidade temporal é utilizada para indicar uma possível relação entre as propriedades hidráulicas e a estrutura do solo (CICHOTA et al., 2006), sendo que diferentes propriedades hidráulicas do solo podem apresentar diferentes padrões de estabilidade temporal. O conceito de estabilidade temporal introduzido por Vachaud et al. (1985) também pode ser utilizado para otimizar o esquema de amostragem, ajudando a identificar, dentro de uma área de interesse, a localização exata dos pontos que representam a umidade do solo média da área (BROCCA et al., 2009; ZUCCO et al., 2014).

Baseado no acima exposto, a otimização do número de observações sem perder informações se torna cada vez mais importante. A identificação dos atributos do solo que são estáveis no tempo pode contribuir significativamente para reduzir o número de observações e diminuir os custos associados a agricultura de precisão.

3.3 Variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo

3.3.1 Séries temporais e espaciais: definição

Há uma grande classe de fenômenos (físicos, químicos e biológicos) cujo processo observacional e a consequente quantificação numérica produzem uma sequência de dados distribuídos no tempo ou no espaço. A sequência de dados ordenados segundo o parâmetro tempo é denominada série temporal. São exemplos de séries temporais:

- (i) valores mensais de temperatura do ar em um dado local;
- (ii) valores diários de precipitação em um dado local;
- (iii) dados de produção anual de cana-de-açúcar em uma dada área; e
- (iv) conteúdo anual de matéria orgânica do solo em um dado local.

Da mesma forma, uma sequência de dados dispostos em ordem espacial é denominada série espacial. Alguns exemplos são:

- (i) valores de temperatura do solo coletados ao longo de uma transeção;
- (ii) valores de umidade do solo coletados ao longo de uma linha de cultura de milho;
- (iii) dados de produção de cana-de-açúcar medidos ao longo de uma faixa; e
- (iv) valores de pH do solo medidos ao longo de uma transeção.

As séries temporais podem ser discretas ou contínuas, sendo a forma mais simples de conceituá-las dada por $Z(t_i)$, $t = 1, 2, \dots, n$, compostas de um conjunto de observações discretas, observadas em tempos equidistantes $t_i - t_{i-1} = \alpha$ que apresentam dependência serial entre elas. Mesmo que uma série seja obtida continuamente durante um intervalo de tempo de amplitude T , o que é feito por instrumentos de registro contínuo, será necessário transformá-la em uma série discreta, por meio de amostragem em intervalos de tempo equiespaçados α . O intervalo de tempo entre as observações sucessivas é determinado, algumas vezes, pelo pesquisador, mas em muitas situações ele é determinado pela disponibilidade dos dados, sendo que, quanto menor possível o intervalo de amostragem maior será o número de observações e, conseqüentemente, melhor a análise dos dados (MORETTIN; TOLOI, 1987). De acordo com Tukey (1980), os objetivos básicos em mente quando se analisa uma série temporal são:

- a) modelagem do fenômeno sob consideração;
- b) obtenção de conclusões em termos estatísticos; e
- c) avaliação da adequação do modelo em termos de previsão.

Em toda a investigação que envolve a metodologia estatística, um dos primeiros cuidados a se tomar na análise de uma série é o planejamento amostral e a preparação dos dados. Dependendo dos objetivos da análise, vários problemas com as observações podem ocorrer e medidas devem ser tomadas para evitá-los ou, pelo menos, amenizá-los. Entre essas medidas podemos citar: planejamento, estacionariedade, transformações, observações perdidas e irregulares, *outliers* e registros curtos.

Os modelos usados para descrever séries temporais são processos estocásticos, isto é, processos controlados por leis probabilísticas. A escolha desses modelos depende de vários fatores, como o comportamento do fenômeno ou o conhecimento anterior que temos de sua natureza e do objetivo da análise. Do ponto

de vista prático, depende, também, da existência de métodos ótimos de estimação e da disponibilidade de softwares.

Uma série temporal pode ser analisada de duas maneiras: (i) análise no domínio do tempo e (ii) análise no domínio da frequência. Em ambos os casos, o objetivo é construir modelos para a série com propósitos determinados. No primeiro caso, o objetivo da análise é identificar os modelos para as componentes estacionárias (variáveis aleatórias) e não-estacionárias (função média), sendo que, neste caso, os modelos propostos são modelos paramétricos (com número finito de parâmetros). Entre os modelos paramétricos temos, por exemplo, os modelos AR (auto-regressivo), modelos MA (média móvel), os modelos ARMA (auto-regressivo média móvel), modelos ARIMA (auto-regressivo integrado média móvel) e modelos de Espaço de Estados (*State-Space models*). Já no segundo caso, os modelos propostos são modelos não-paramétricos e consistem em decompor a série dada em componentes de frequência, em que a existência do espectro é a característica fundamental. Entre os modelos não-paramétricos podemos citar a análise espectral, em que são estudados fenômenos que envolvem periodicidade dos dados, tendo, portanto, numerosas aplicações em todas as áreas da ciência.

Quando o interesse reside em fazer a análise de uma série no domínio do tempo, uma das suposições mais frequentes é que esta série é estacionária, ou seja, se desenvolve no tempo aleatoriamente onde as propriedades estatísticas (média e variância) não variam, refletindo alguma forma de equilíbrio estável. Porém, a maior parte das séries que encontramos na prática apresenta alguma forma de não-estacionariedade (média e variância variam) necessitando ou não, dessa forma, uma transformação dos dados originais já que a maioria dos procedimentos de análise estatística de séries temporais supõe que estas sejam estacionárias. Entretanto, existem procedimentos estatísticos que são aplicados quando a série é não-estacionária, tais como a análise em *wavelets* (SI, 2008). Si (2008) apresenta uma revisão sobre ferramentas estatísticas que têm sido usadas para analisar a escala de variabilidade espacial e/ou temporal de propriedades físicas do solo. Dentre elas, menciona que a análise em *wavelets* (*wavelet analysis*) possibilita a análise de uma série espacial (ou temporal) em ambos os domínios. Várias aplicações desta ferramenta na área de ciência do solo têm sido publicadas na literatura, dentre elas podemos citar: Biswas e Si (2011a,b,c,d) e Biswas e Si (2013). No Brasil, Pereira (2013) aplicou a análise em *wavelets*, em termos de filtros, na

área de ciências geodésicas como uma possível alternativa para a solução do problema da heterogeneidade das informações gravimétricas no país e da compatibilização dos diferentes referenciais envolvidos no cálculo de informações associadas.

A definição de séries temporais apresentada anteriormente, apesar de simples, evidencia de certa forma a “Análise de Séries Temporais” como área bem definida na Estatística, visto que estamos claramente descartando os dados independentes e identicamente distribuídos (estatística clássica), comumente usados nos diversos modelos estatísticos (SOUZA, 1989).

Como mencionado, até recentemente, pesquisadores ligados à área agrônômica estudavam a variabilidade das propriedades do solo por meio da estatística clássica (análise de variância, média, coeficiente de variação, análise de regressão etc.), que pressupõe que as observações de uma dada propriedade são independentes entre si, desconsiderando-se sua localização na área. Neste caso, os experimentos são conduzidos para minimizar o impacto da variabilidade espacial ou temporal, sendo, portanto, ignorado o fato de que as observações podem ser espacialmente (ou temporalmente) dependentes. Entretanto, tem sido enfatizado que observações adjacentes de dada propriedade do solo não são completamente independentes e que essa variabilidade espacial deve ser considerada na análise estatística dos dados. Nielsen e Alemi (1989) comentam que as observações dentro e entre os tratamentos podem não ser independentes entre si, o que torna o arranjo experimental no campo inadequado.

A variabilidade espacial das propriedades dos solos pode ocorrer em diferentes níveis, podendo estar relacionada a vários fatores: variação do material de origem, clima, relevo, organismos e tempo, ou seja, de processos genéticos de formação do solo e/ou efeitos de técnicas de manejo dos solos decorrentes de seus usos agrícolas (MCGRAW, 1994). Ferramentas estatísticas, como, autocorrelogramas, crosscorrelogramas, análise espectral, análise em *wavelets*, modelos auto-regressivos, modelos ARIMA, modelos de espaço de estados etc., têm sido utilizadas para estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo e podem, potencialmente, levar a um manejo que propicie melhor entendimento dos processos de interação solo-planta-atmosfera (WENDROTH et al., 1992, 1997, 2001, 2014; DOURADO-NETO et al., 1999; TIMM et al., 2000, 2003a, 2003b, 2006, 2011, 2014;

JOSCHKO et al., 2009; JIA et al., 2011, 2012; AWE et al., 2014; OGUNWOLE et al., 2014; SHE et al., 2014; AQUINO et al., 2015).

A variabilidade espacial e temporal dos atributos físico-hídricos do solo pode ocorrer em diferentes escalas e estar relacionada a vários fatores, visto que os solo é fundamentalmente heterogêneo (REICHARDT; TIMM, 2012). Iqbal et al. (2005) comentam que as medidas de conservação e gestão do solo em uma dada área podem influenciar a sua variabilidade espacial e temporal. WANG et al. (2009) relatam que o preparo do solo, fertilizantes, espécies vegetais, topografia e a vegetação são algumas das muitas causas que atuam na variabilidade espacial dos atributos de um solo. O tipo de manejo do solo é considerado uma das principais causas da variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos do solo (ALLETO et al., 2010).

O comportamento dos atributos do solo é diferente e depende do tempo e do espaço. Assim, identificar e quantificar a variabilidade dos atributos do solo torna-se importante em vários aspectos citados por diferentes autores (SOUZA et al., 2004; IQBAL et al., 2005; ÖZGÖZ, 2009; TESFAHUNE et al., 2011): Planejar a conservação e recuperação de áreas degradadas; Auxiliar na avaliação da agricultura de precisão, da fertilidade do solo e controlar as taxas de fertilização e irrigação; Melhorar as estratégias de amostragem e planejamento de experimentos; Preparar o solo de forma adequada e fazer seu uso corretamente; Aumentar a eficiência das práticas agrícolas; Corrigir problemas de produtividade em áreas localizadas; Gerenciar os recursos naturais e planejar a gestão ambiental destes recursos.

3.3.2 Ferramentas estatísticas para o estudo da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo

3.3.2.1 As funções de autocorrelação e crosscorrelação

A dependência temporal de um conjunto de observações pode ser avaliada por meio de algumas medidas estatísticas que tem como princípio a verificação da similaridade ou da dissimilaridade das observações. Uma delas é a função de autocorrelação, que tem como princípio a verificação da similaridade entre as observações.

No caso de duas variáveis aleatórias x e y , com alguma relação de dependência, a covariância (C) passa a ter grande importância, sendo definida por:

$$C = \frac{1}{(n-1)} \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right] \quad (1)$$

Na equação 1 as duas variáveis x e y tornam-se uma função de autocorrelação se nessa equação o y for trocado pelo próprio x em outra posição ou tempo dentro da transeção e esta covariância for relacionada com a variância do conjunto de dados. Como se trata de uma correlação entre uma variável e ela mesma em outra posição (ou tempo), o processo é denominado autocorrelação.

Assim, para as variáveis x_i (na posição ou tempo i) e x_{i+j} [na posição ou tempo $(i+j)$], distante de i por jh onde h é a distância entre pontos de observações da variável e j é o número de “lag’s”, ou seja o número de defasagem entre os vizinhos sendo igual a: 0, 1, 2, 3, ...] a equação da função de autocorrelação ($r(j)$) é dada por:

$$r(j) = \frac{C(j)}{s^2} \quad (2)$$

onde: $r(j)$ é o coeficiente de autocorrelação; s^2 é a variância dos dados e $C(j)$ é a covariância entre a variável na posição ou tempo i com ela mesma na posição ou tempo $i+j$ que é dada por:

$$C(j) = \frac{1}{(n-1)} \left[\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \bar{x})(x_{i+j} - \bar{x}) \right] \quad (3)$$

em que: x_i e x_{i+j} é a variável na posição ou tempo i e na posição ou tempo $i+j$; \bar{x} é a média do conjunto de dados da variável x ; n é o número de observações.

A autocorrelação é, portanto, uma correlação entre vizinhos padronizada pela variância dos dados. A correlação entre primeiros vizinhos é: $j = 1$ (x_1 com x_2 , x_2 com x_3 , x_4 com x_5 ,... x_i com x_{i+1}); entre segundos vizinhos é: $j = 2$ (x_1 com x_3 , x_2 com x_4 ,... x_i com x_{i+2}) e assim por diante. Pode-se verificar que quando há uma defasagem de $j = 1$ perde-se um par na correlação, para $j = 2$ perde-se 2 pares e, assim, com o

aumento de j o número de pares indicado na somatória da equação 3 diminui e equivale ao índice superior da somatória: $n - j$. Por isso, para o uso da autocorrelação e outras ferramentas da estatística regionalizada, é preciso de um grande número n de observações. Na equação 2 aparece apenas o quociente s^2 por que $s_x = s$ e $s_y = s$, cujo produto é s^2 .

Com a utilização da equação 2 para valores de $j = 0, 1, 2, \dots, k$ obtêm $r(0), r(1), r(2), \dots, r(k)$. O valor de $r(0)$ é 1, pois correlaciona-se x_i com x_i . Se houver correlação entre vizinhos, teremos valores de $r(1), r(2)$, proporcionais à estas correlações, mas sempre menores que 1. Para vizinhos muito distantes, tanto no espaço quanto no tempo, espera-se que a correlação diminua tendendo para zero. O gráfico de $r(j)$ em função de j é denominado autocorrelograma. Ele mede, portanto, a variação da autocorrelação em função da distância que separa os dados. Se $r(j)$ cai rapidamente para zero, a variável x não é autocorrelacionada e seus valores x_i podem ser considerados independentes. Se $r(j = 5)$ ainda for significativo (o que pode ser feito através de testes de probabilidade), isto significa que até o quinto vizinho (distante de 5h) ainda existe autocorrelação.

Para verificar dependência espacial ou temporal, o próximo passo é o cálculo dos intervalos de confiança de $r(j)$ para verificar se ele é significativo ou não, e, desta forma, definir o comprimento j_h no qual existe a dependência espacial entre as observações adjacentes da variável em estudo. Para determinar os limites dos intervalos de confiança (IC) de autocorrelação é aplicada a função de probabilidade acumulada p ($p = \pm 1,96$ para 95% confiança) para a função de distribuição normalizada com o número de observações n (equação 4) (DAVIS, 1986):

$$IC = \pm \frac{p}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

O autocorrelograma expressa a variação da autocorrelação em função da distância que separa os dados, que pode ser o também o tempo, definindo desta forma, até que distância ou intervalo de tempo existe a dependência espacial ou temporal entre as observações adjacentes de uma dada variável (REICHARDT; TIMM, 2012).

No que se refere a função de crosscorrelação que dá origem ao crosscorrelograma, é a correlação de x_i com y_{i+j} , ou seja, a correlação da variável x na posição i com a variável y na posição $i+j$, dada pela equação:

$$r_c(j) = \frac{C(x_i, y_{i+j})}{\left(\sqrt{s_x^2 \cdot s_y^2}\right)^{-1}} \quad (5)$$

onde: $C(x_i, y_{i+j})$ é a covariância entre a variável x na posição i com a sua vizinha y na posição $i+j$. s_x^2 é a variância do conjunto de dados da variável x e s_y^2 é a variância do conjunto de dados da variável y .

Nota-se que quando as correlações são realizadas entre x_i e x_{i+j} elas são idênticas às de x_{i+j} e x_i , por isso, o autocorrelograma é apresentado apenas para j positivo. No caso do crosscorrelograma, a correlação entre x_i e y_{i+j} é diferente de y_{i+j} e x_i , o que irá conferir defasagens em direções positivas e negativa.

3.3.2.2 A abordagem em espaço de estados

O modelo em espaço de estados de um processo estocástico estacionário ou não é baseado na propriedade de sistemas markovianos que estabelece a independência do futuro do processo em relação ao seu passado, dado o estado presente. A formulação de um modelo em espaço de estados é uma forma de representar um sistema linear (ou não) a partir de um sistema de duas equações dinâmicas. Para o caso de um sistema linear teremos:

- 1ª) a forma pela qual o vetor das observações $Y_j(x_i)$ do processo é gerado em função do vetor de estado $Z_j(x_i)$, denominada equação das observações (equação 6);
- 2ª) a evolução dinâmica do vetor de estado não-observado $Z_j(x_i)$, denominada equação de estado ou do sistema (equação 7).

De uma forma analítica temos:

$$Y_j(x_i) = M_{jj}(x_i) Z_j(x_i) + v_{Y_j}(x_i) \quad (6)$$

$$Z_j(x_i) = \phi_{jj} Z_j(x_{i-1}) + u_{Z_j}(x_i) \quad (7)$$

A matriz de observação M_{jj} na equação 6 origina-se do seguinte conjunto de

matriz de observação $M_{ij}(x_i)$ e por um erro (ou ruído) de observação $v_{Y_j}(x_i)$ (equação 6). Isso significa que valores observados Y_j [que podem ser quaisquer variáveis como a umidade do solo θ , armazenamento de água no solo, pH, matéria orgânica, densidade do solo etc. medidas ao longo de uma transeção de n pontos espaçados do lag h , isto é, $i - (i - 1) = h$] não são tomados como verdadeiros, mas são considerados medida indireta de Y_j refletindo o verdadeiro estado da variável Z_j (valor não-observado da variável) adicionado a um erro de observação v_{Y_j} . Por outro lado, o vetor de estado $Z_j(x_i)$ na posição i é relacionado ao mesmo vetor na posição $i-1$ por meio da matriz dos coeficientes de estado $\phi_{jj}(x_i)$ (matriz de transição) e um erro (ou ruído) associado ao estado $u_{Z_j}(x_i)$ com a estrutura de um modelo auto-regressivo de primeira ordem. É assumido que $v_{Y_j}(x_i)$ e $u_{Z_j}(x_i)$ são normalmente distribuídos, independentes e não-correlacionados entre si para todas as defasagens.

As equações 6 e 7 contêm perturbações (ou ruídos) distintas, uma sendo associada às observações (equação 6) e a outra ao estado (equação 7). De acordo com Gelb (1974), o desenvolvimento de métodos para processamento de observações contaminadas por ruído pode ser atribuído aos trabalhos de Gauss e Legendre (em torno de 1800), que desenvolveram, independentemente um do outro, o método dos mínimos quadrados para modelos lineares. Mais recentemente, uma solução recursiva para o método de mínimos quadrados em modelos lineares foi obtida por Plackett em 1950. Kalman (1960), usando uma formulação em espaço de estados, desenvolveu um filtro recursivo ótimo para estimação em sistemas lineares dinâmicos estocásticos, sendo atualmente conhecido na literatura como Filtro de Kalman (FK). Segundo Gelb (1974), um estimador ótimo é um algoritmo computacional que processa as observações para deduzir uma estimativa mínima (de acordo com algum critério de otimização) do erro do estado de um sistema utilizando: (i) conhecimento da dinâmica das observações e do sistema; (ii) assumindo inferências estatísticas aos ruídos associados às observações e aos associados ao estado; e (iii) conhecimento da condição inicial da informação. Resumindo, dado o sistema dinâmico de equações que descreve o comportamento do vetor de estado e das observações, os modelos estatísticos que caracterizam os erros observacionais e do estado e a condição inicial da informação, o filtro de Kalman faz a atualização sequencial do vetor de estado no tempo (ou espaço) $i-1$

para o tempo (ou espaço) i . De fato, pode-se argumentar que o FK é, em essência, solução recursiva (solução que permite processamento seqüencial das observações) para o método original dos quadrados mínimos de Gauss. Contudo, cabe salientar que é necessário o uso de outro algoritmo [p.ex., o algoritmo de máxima verossimilhança (EM), amplamente discutido por Shumway e Stoffer (2000, 2011) para que junto com o FK seja solucionado o problema das observações contaminadas por ruídos, ou seja, presença de parâmetros de incerteza (GELB, 1974).

De acordo com o objetivo do estudo envolvendo a metodologia de espaço de estados pode-se ter diferentes tipos de estimativas: (a) quando o tempo (ou espaço) no qual uma estimativa é desejada coincide com o último dado observado (t ou $x = n$), o problema é dito de filtragem; b) quando o tempo (ou espaço) de interesse se situa dentro de todo o conjunto de dados observados, ou seja, todo o conjunto de dados observados é utilizado para estimar o ponto de interesse (t ou $x < n$), o problema é dito de suavização; e (c) quando o tempo (ou espaço) de interesse se situa além do último dado observado (t ou $x > n$), o problema é dito de predição.

Qualquer modelo linear (MOTTA; HOTTA, 1998) e não-linear (KATUL et al., 1993) pode ser representado na formulação de espaço de estados, a partir de um sistema de duas equações: uma equação para um vetor de observações e outra para a evolução do vetor de estados.

A formulação de espaço de estados pode ser usada, como a krigagem e a co-krigagem (ALEMI et al., 1988; DEUTSCH; JOURNAL, 1992), para a interpolação espacial de dados, porém a filosofia por trás dessas ferramentas é diferente. Por exemplo, para a aplicação da técnica de krigagem e co-krigagem a condição de estacionariedade dos dados é requerida, diferindo da abordagem de espaço de estados em que essa condição não é um fator limitante, ou seja, a série em estudo pode não ser estacionária (SHUMWAY, 1985).

Até então, o sistema de equações lineares dinâmicas (equações 6 e 7), que descreve a formulação de espaço de estados foi apresentado de forma geral. Entretanto, a formulação de espaço de estados pode ser usada sob duas abordagens diferentes: a primeira apresentada em Shumway (1988) e Shumway e Stoffer (2000, 2011) que vem sendo empregada por vários pesquisadores na área agrônômica, dando ênfase à equação de evolução de estado do sistema (equação 7), e a segunda apresentada em West e Harrison (1989, 1997), que ainda tem sido

pouco explorada na área agronômica em que é dada ênfase maior na equação das observações (equação 6). No presente estudo foi usada a abordagem apresentada em Shumway (1988) que tem sido aplicada com sucesso na área de ciência do solo e que resumidamente será descrita abaixo.

A abordagem apresentada em Shumway (1988) e Shumway e Stoffer (2000, 2011) dá maior ênfase na equação de evolução de estado do sistema em que a matriz dos coeficientes de transição ϕ (equação 7) é uma matriz de dimensão $j \times j$ que indica a medida espacial da associação linear entre as variáveis de interesse. Esses coeficientes são otimizados por um procedimento recursivo, usando algoritmo tipo filtro de Kalman (SHUMWAY; STOFFER, 1982) em que o método da máxima verossimilhança é usado junto com o algoritmo de maximização da média de Dempster et al. (1977). Neste caso, as equações 6 e 7 são resolvidas assumindo valores iniciais para a média e a variância de cada variável e para as matrizes: de covariância do ruído das observações R; de covariância do ruído associado ao vetor de estado Q; dos coeficientes de transição ϕ ; e de observação M. Shumway (1988) considera a matriz M unitária (identidade). Dessa forma a equação 6 torna-se:

$$Y_j(x_i) = Z_j(x_i) + v_{Y_j}(x_i) \quad (6a)$$

o que significa que Y difere de Z apenas por um erro.

No desenvolvimento do software Applied Statistical Time Series Analysis (ASTSA) (SHUMWAY, 1988) usado para a análise de séries temporais (espaciais), a matriz M foi fixada durante todos os passos da estimativa da variável. Isso mostra a maior ênfase de sua abordagem na equação de evolução de estado e não na equação das observações.

Exemplos de aplicação com sucesso da abordagem em espaço de estados descrita em Shumway (1988) são: Warrick et al. (1986) e Ahuja e Nielsen (1990) estudaram o relacionamento entre a umidade, temperatura, salinidade, infiltração de água no solo e produção da cultura; Shumway et al. (1989) descreveram a associação espacial do conteúdo de água com a temperatura do solo; Timm et al. (2004) estudaram a relação entre a umidade do solo, matéria orgânica, conteúdo de argila e estabilidade de agregados; e Wendroth et al. (2006) estudaram a relação

entre as propriedades hídricas do solo com a condutividade elétrica da solução e a sua textura, dentre outros.

Embora a abordagem em espaço de estados descrita em Shumway (1988) venha da Análise de Séries Temporais, ela tem sido aplicada com sucesso para avaliar a variabilidade espacial de propriedades do solo coletadas ao longo de transeções espaciais (p.e., TIMM et al., 2003a; YANG et al., 2013; OGUNWOLE et al., 2014; YANG; WENDROTH, 2014). Entretanto, algumas aplicações desta abordagem podem ser encontradas também para dados coletados em malhas experimentais, tais como: Stevenson et al. (2001), Liu et al. (2012) e She et al. (2014).

Aplicação recente da abordagem em espaço de estados em dados coletados na mesma malha experimental descrita por Parfitt (2009) visando avaliar os efeitos da sistematização do solo na relação espacial entre as propriedades do solo em oito diferentes cenários (quatro na vertical e quatro na horizontal) é a de Aquino et al. (2015). Os autores quantificaram as relações entre a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) adotadas como variáveis respostas, antes e depois da sistematização, com os teores de areia, silte e argila, microporosidade do solo, densidade do solo, capacidade de troca de cátions, teor de carbono orgânico e profundidade do topo do horizonte B em relação a superfície do solo, também determinadas antes e depois da sistematização e adotadas como co-variáveis nos modelos de espaço de estados. Aquino et al. (2015) concluem que o desempenho dos modelos em estimar θ_{CC} e θ_{PMP} é afetado pelo cenário após a sistematização, sendo a melhor performance dos modelos para os cenários verticais. Também concluíram que as co-variáveis profundidade do topo do horizonte B e capacidade de troca de cátions contribuíram para a estimativa de θ_{CC} e θ_{PMP} para todos os cenários avaliados após a sistematização.

Uma aplicação da abordagem em espaço de estados, descrita por Shumway (1988) e Shumway e Stoffer (2000, 2011), em séries coletadas ao longo do tempo (séries temporais) foi apresentada por Timm et al. (2011). Neste estudo, os autores apresentaram as equações 6b (equação de observação) e 7b (equação de estado) para análise de séries coletadas ao longo do tempo, i.e.:

$$Y_t = AX_t + v_{Y_t} \quad (6b)$$

$$X_t = \phi X_{t-1} + u_{X_t} \quad (7b)$$

sendo X_t e X_{t-1} o vetor de estado no tempo t e $t-1$.

Timm et al. (2011) aplicaram o modelo de espaço de estados para a avaliação da relação temporal (*State-time analysis*) entre os componentes do balanço hídrico (precipitação P , evapotranspiração ET e armazenamento de água no solo S) em uma cultura de café estabelecida em uma área experimental em Piracicaba-SP. A aplicação dos modelos de *State-time* mostraram que as estimativas de S em um tempo t dependeram mais das medições de precipitação (52%) do que das de ET (28%) e S (20%) em um tempo $t-1$. As análises também mostraram que as estimativas de ET no tempo t foram mais dependentes das medições de ET (59%) do que P (30%) e S (9%) em um tempo $t-1$. Recentemente, Awe et al. (2014) aplicaram a abordagem em espaço de estados em dados coletados ao longo do tempo no intuito de avaliar o armazenamento de água no solo em uma área cultivada com cana-de-açúcar e com a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo. Os autores monitoraram o armazenamento de água no solo e o potencial matricial nas camadas de solo de 0-10 cm, 10-20 cm e 40-60 cm usando sensores de reflectometria no domínio do tempo e tensiômetros, respectivamente. Também foi monitorada diariamente a precipitação por meio de pluviômetros e calculada a evapotranspiração real da cultura a partir de dados coletados em uma estação meteorológica. Os autores compararam o desempenho dos modelos em espaço de estados em estimar o armazenamento de água no solo com os equivalentes construídos por meio de modelos clássicos de regressão lineares e concluíram que os primeiros tiveram melhor desempenho em estimar o armazenamento de água no solo ao longo do tempo em todas as combinações avaliadas usando o logaritmo do potencial matricial, evapotranspiração real da cultura e precipitação como co-variáveis nas equações.

4. Material e métodos

4.1 Implantação do experimento

O experimento foi conduzido em uma área pertencente a Embrapa Clima Temperado (CPACT – Estação Terras Baixas) situada no município do Capão do Leão-RS. A área de aproximadamente 10000 m² foi cultivada com a cultura do arroz irrigado por aspersão utilizando-se um sistema linear móvel Valley (Figura 1). O estudo foi conduzido de novembro de 2012 a março de 2013 compreendendo o período da safra da cultura do arroz (safra 2012-2013), totalizando 133 dias de monitoramento.



Figura 1. Sistema de irrigação por aspersão linear móvel Valley® utilizado na irrigação da cultura do arroz.

A variedade de arroz cultivada foi a precoce BRS Pampa, na densidade de 100 kg ha⁻¹ e espaçamento de 17,5 cm nas entrelinhas. A adubação foi realizada com base na análise química do solo e seguiu as recomendações para arroz irrigado por inundação da SOSBAI (2010), visto que ainda não há recomendação para arroz cultivado sob aspersão. Para controle de plantas daninhas em pré-emergência foi

utilizada a tecnologia gamit/permit® e em pós-emergência, aplicados os herbicidas recomendados às espécies problemáticas.

4.2 Monitoramento da tensão de água no solo

Foram instalados de forma aleatória 70 sensores Watermark® e 7 sensores de temperatura do solo na área experimental, profundidade de 0,10 m no intuito de representar a camada de 0-0,20 m, para fazer o monitoramento contínuo da tensão de água no solo e da temperatura no solo. As leituras de tensão de água no solo ao longo do tempo foram armazenadas em um datalogger (Fig. 2), que registrava diariamente os dados de tensão de 7 sensores Watermark® e de um sensor de temperatura.



Figura 2. Datalogger instalado na área da cultura do arroz irrigado por aspersão para armazenamento contínuo dos dados de tensão de água no solo pelos sensores Watermark®.

Os sensores (Fig. 3a) foram instalados a partir da emergência da cultura do arroz (Fig. 3b), promovendo um período de monitoramento da tensão de água no solo de 23 de novembro de 2012 a 26 de março de 2013 em intervalo de leitura diário.

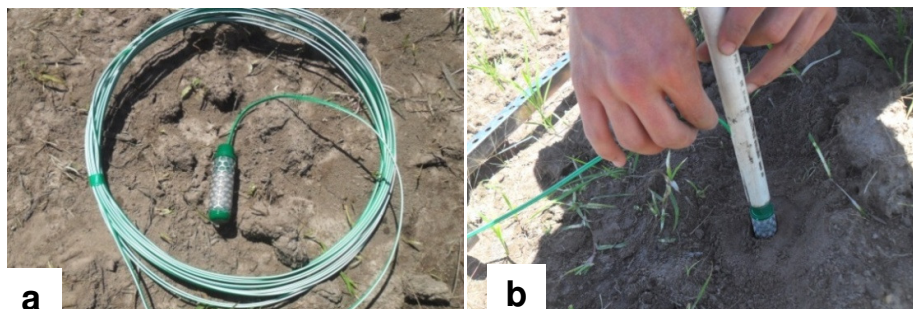


Figura 3. Sensor Watermark® utilizado no monitoramento da tensão de água no solo (a) e sua instalação na área experimental (b) da cultura do arroz irrigado por aspersão.

Todos os valores de tensão de água no solo foram convertidos em valores de conteúdo de água no solo a base de volume (θ) a partir da curva de retenção de água no solo. Próximo a cada ponto de instalação de um sensor de tensão, foram coletadas amostras de solo preservadas na profundidade de 0,10 m, usando anéis volumétricos (0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura), para a elaboração da curva experimental de retenção de água no solo (EMBRAPA, 2011). Aos dados experimentais da curva (pares de tensão de água no solo e de conteúdo de água no solo) foi ajustado o modelo matemático de van Genuchten (1980) que tem sido amplamente usado na literatura para representar a curva de retenção de água de um solo. Sua equação, explicitada em termos de θ , é:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad (8)$$

na qual os parâmetros α , n , m e θ_r são obtidos no processo de ajuste, pelo método de minimização dos quadrados dos desvios. θ_s é o ponto da curva de retenção para $\Psi = 0$, medido experimentalmente, na maioria das vezes. O software SWRC, versão 2.00 (DOURADO-NETO et al., 2000) foi usado para obtenção dos parâmetros de ajustes do modelo.

4.3 Avaliação da estabilidade temporal da umidade do solo

A estabilidade temporal da umidade do solo em cada sensor instalado na camada de 0-0,20 m, foi avaliada pelo método proposto por Vachaud et al. (1985). A aplicação do conceito de estabilidade temporal consiste basicamente no cálculo das diferenças relativas, onde é realizada uma análise dos desvios entre os valores observados de θ no tempo (j) e no espaço (i) e a sua média no tempo j (j é igual a 133 dias neste estudo) em todas as posições i (neste estudo $i = 70$). A diferença relativa (δ_{ij}) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\delta_{ij} = \frac{(\theta_{ij} - \bar{\theta}_j)}{\bar{\theta}_j} \quad (9)$$

$$\bar{\theta}_j = \left(\frac{1}{70} \right) \sum_{i=1}^{i=70} \theta_{ij} \quad (10)$$

em que δ_{ij} é a diferença relativa na posição i no tempo j ; θ_{ij} é o valor da umidade do solo na posição i e no tempo j ; $\bar{\theta}_j$ é a média dos valores de umidade do solo em todas as posições, no tempo j (Equação 10). Para cada posição i foi calculada a média dos valores de diferença relativa δ_{ij} . De acordo com Vachaud et al. (1985), uma pequena variação na diferença relativa média ao longo do tempo, é a indicação de estabilidade temporal. Desta forma, as diferenças relativas médias, expressas em termos percentuais, associadas ao respectivo desvio-padrão no tempo e ordenadas de forma crescente, permitem identificar a posição cujos valores de umidade do solo se aproximam da média no espaço, em qualquer tempo (GONÇALVES; FOLEGATTI; SILVA, 1999). Quanto menor o desvio-padrão, maior a confiabilidade da medida naquele ponto. Esta avaliação permite identificar o padrão de variabilidade temporal em cada ponto, agrupar os pontos amostrais que possuam comportamentos similares em termos de estabilidade temporal e otimizar o esquema de monitoramento da umidade do solo visando, por exemplo, um manejo racional da irrigação na área.

4.4 Estudo da relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas por meio da abordagem em espaço de estados

Após a identificação do ponto que apresentava a maior estabilidade espaço-temporal da umidade do solo na camada de 0-0,20 m, foram calculados os valores do armazenamento de água no solo (S , mm) na respectiva camada por meio da seguinte equação:

$$S_{0-0,20} = \theta \cdot \Delta z \quad (11)$$

sendo $\Delta z = 200$ mm neste estudo.

Para identificar e quantificar a estrutura de variabilidade temporal do armazenamento de água do solo nesse ponto foram aplicadas ferramentas da estatística descritiva e da análise de séries temporais/espaciais. Também foram avaliadas as estruturas das variáveis climáticas [chuva (P), irrigação (I), evapotranspiração potencial (ETp), Umidade Relativa do ar (UR), Temperatura do ar (T) e Radiação solar (Rsolar). O possível relacionamento temporal entre o armazenamento de água no solo e as variáveis climáticas foi avaliado por meio da aplicação da abordagem de espaço de estados.

As variáveis climáticas foram coletadas em uma estação meteorológica automática, modelo Squitter®, modelo ISIS S1220 (Fig. 4), instalada próximo a área experimental. A estação foi programada para aquisição e registro de dados de hora em hora, os quais foram armazenados em um datalogger acoplado a mesma. Os dados de chuva, evapotranspiração potencial, temperatura do ar, umidade relativa média do ar, radiação solar e velocidade do vento foram descarregados em um computador portátil.



Figura 4. Estação Meteorológica Automática Squitter modelo ISIS S1220, utilizada para coleta de dados de chuva, evapotranspiração potencial, temperatura do ar, umidade relativa média do ar, radiação solar e velocidade do vento.

Os dados de chuva foram adicionados aos de irrigação (aqui chamada de variável P+I). Em dias sem chuva e irrigação foi adotado o valor $P+I = 0,1\text{mm}$ para essa variável, para não haver problema de instabilidade computacional no momento da aplicação da abordagem em espaço de estados. A lâmina de irrigação aplicada foi diferente na área experimental, porém, após a identificação do ponto de estabilidade temporal da umidade do solo que melhor representava a média de umidade na área, foi levado em consideração o valor da lâmina de irrigação aplicada na região onde aquele ponto se situava.

A análise estatística descritiva consistiu no cálculo das medidas de posição (média aritmética e mediana), de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)] e de medidas que indicam o formato da distribuição [coeficientes de assimetria (Ass.) e de curtose (Cur.)]. Também foi avaliada a distribuição de freqüência dos valores de S e das variáveis climáticas aplicando o teste de Kolmogorov-Smirnov. Este é um teste de aderência não paramétrico que verifica se o conjunto de dados pode ser considerado com uma distribuição de probabilidade, nesse caso, a distribuição normal. Todas as análises foram realizadas com o software *R* (R CORE TEAM, 2013).

Após a análise exploratória de cada conjunto de dados, a estrutura de dependência temporal de cada uma das variáveis foi calculada por meio da função de autocorrelação (equação 2). A correlação temporal entre o armazenamento de água no solo e as variáveis climáticas foi avaliada por meio do cálculo da função de crosscorrelação (equação 5). A partir dessa função é possível elaborar o crosscorrelograma que permite identificar se existe ou não correlação temporal entre as variáveis envolvidas. Para verificar a significância do coeficiente de autocorrelação e de crosscorrelação, os limites do intervalo de confiança (IC) foram calculados pela equação 4, considerando a função de probabilidade acumulada p ($p = \pm 1,96$ para 95% confiança) com o número de observações $n=133$. Para o cálculo de ambas as funções foram usados scripts do software *R* (R CORE TEAM, 2013).

A partir da análise dos autocorrelogramas e dos crosscorrelogramas, foram selecionadas as variáveis para compor o modelo autorregressivo de espaço de estados no intuito de avaliar o relacionamento temporal entre os valores de S e as variáveis climáticas. Previamente a modelagem em espaço de estados, foi realizada uma transformação dos valores de cada variável para a mesma ordem de magnitude (equação 12), resultando em uma média de 0,5 e um desvio padrão de 0,25 para cada variável (HUI et al., 1998).

$$z_j(t_i) = \frac{[Z_j(t_i) - (m - 2.s)]}{4.s} \quad (12)$$

em que $z_j(t_i)$ é o valor transformado da variável original $Z_j(t_i)$, m é a média amostral dos dados $Z_j(t_i)$ e s o desvio padrão amostral de $Z_j(t_i)$.

A análise de espaço de estados foi realizada com o auxílio do software ASTSA (Applied Statistical Time Series Analysis) desenvolvido por Shumway (1988). A partir dos coeficientes de estados ϕ_{jj} (equação 7b) foram construídos os modelos autoregressivos. De posse dos valores estimados e observados da variável resposta S e dos desvios padrões das estimativas da variável foram elaborados gráficos de dispersão de S ao longo do tempo. A eficiência da estimativa de S utilizando a abordagem de espaço de estados foi expressa em termos do coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear simples entre os valores transformados estimados e observados da variável resposta. Também foi avaliado o potencial de uso do modelo de espaço de estados como ferramenta de interpolação temporal dos valores de S em função das variáveis climáticas.

5. Resultados e discussão

5.1 Estabilidade temporal da umidade do solo

O método proposto por Vachaud et al. (1985) foi aplicado aos dados de umidade do solo temporalmente monitorados em cada ponto experimental (camada de 0-0,20 m de profundidade) na safra de 2012/2013 (período de novembro de 2012 a março de 2013) de arroz irrigado por aspersão. A Figura 5 apresenta os valores das diferenças relativas médias e respectivos desvios-padrão dos dados de umidade do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) monitorados durante o período de estudo. Esta avaliação permite identificar o padrão de variabilidade temporal em cada ponto, agrupar os pontos amostrais que possuam comportamentos similares em termos de estabilidade temporal podendo demarcar os locais para um futuro monitoramento da umidade do solo, reduzindo desta forma o esforço amostral. Os valores de umidade do solo monitorados no ponto 32 (Figura 5) foram os que apresentaram a menor diferença relativa média, cujo valor δ_{ij} de 0,17% (desvio-padrão de $\pm 6,82\%$) é muito próximo a zero. A variação nos valores de δ_{ij} ficou entre -17,10% e 28,00%, o que é uma variação pequena que corrobora com os resultados de Souza et al. (2011) e difere da variação encontrada por Dongli et al. (2012), que encontraram uma alta variação de δ_{ij} atribuída principalmente à textura arenosa do solo estudado. Valores de desvio-padrão similares aos encontrados no presente estudo foram encontrados por Vachaud et al. (1985), Rocha et al. (2005) e Souza et al. (2011) no estudo da estabilidade temporal da umidade do solo. Ainda, Souza et al. (2011) comprovaram que diferentes manejos do solo podem afetar a estabilidade temporal da umidade do solo, visto que em seu estudo áreas com “mulching” apresentaram maior estabilidade da umidade do solo quando comparadas com áreas preparadas no

sistema convencional cultivadas com a cultura da cenoura em regiões semiáridas do Brasil.

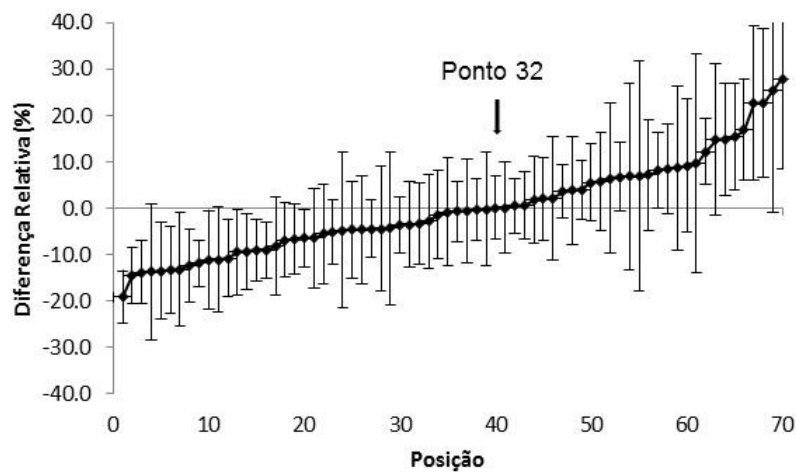


Figura 5. Diferenças relativas médias (%) e respectivos desvios-padrão dos dados de umidade do solo, camada de 0-0,20 m de profundidade, na safra agrícola de 2012/2013 (período de novembro de 2012 a março de 2013).

O comportamento da umidade média do solo durante o período do experimento foi comparado com o ponto representativo calculado pelas diferenças relativas (Fig. 6). Embora em alguns pontos os valores de umidade não corresponderam exatamente ao valor médio na área, pode-se notar, visualmente, que a diferença foi pequena.

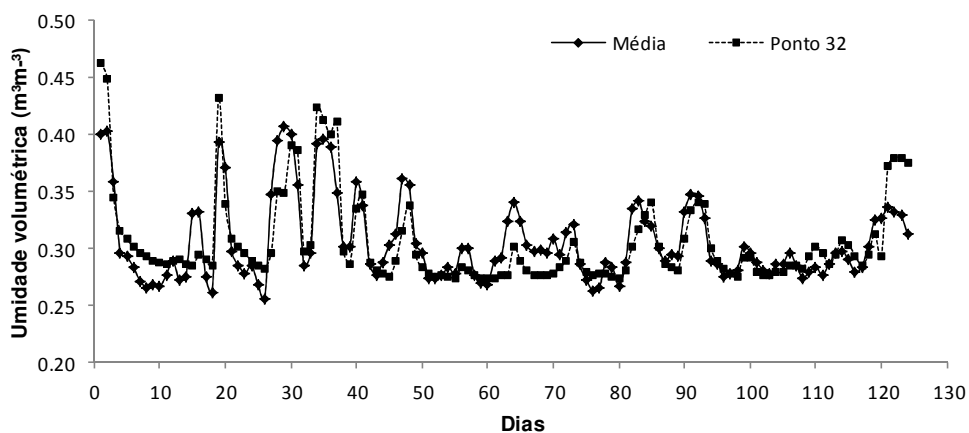


Figura 6. Comportamento da umidade média do solo na área experimental e da umidade do solo no ponto 32 na safra da cultura do arroz irrigado por aspersão de 2012/2013 referente ao período de 124 dias (23 novembro de 2012 a 26 de março de 2013).

5.2 Relação temporal entre o armazenamento de água no solo e variáveis climáticas por meio da abordagem em espaço de estados

Após a identificação do ponto 32 como o que apresentou a maior estabilidade espaço-temporal da umidade do solo na camada de 0-0,20 m, foram calculados os valores do armazenamento de água no solo (S, mm) pela equação 11. A estatística descritiva aplicada aos dados de S no ponto 32 e as variáveis climáticas chuva + irrigação (P+I), evapotranspiração potencial (ETp), umidade relativa do ar (UR), temperatura do ar (T) e radiação solar (Rsolar) é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Medidas de posição (média aritmética e mediana), de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], de formato da distribuição [coeficientes de assimetria (Ass.) e de curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov nas variáveis estudadas durante a safra do arroz irrigado por aspersão de 2012/2013

Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV (%)	Ass.	Cur.	p ²
----- Atributos do solo -----									
S (mm)	61,11	57,94	54,66	92,52	8,02	13,1	1,98	3,44	4,39E-07
----- Variáveis climáticas -----									
P+I (mm)	3,33	0,25	0,10	22,75	5,41	162,3	1,83	2,93	1,85E-11
ETp (mm dia ⁻¹)	5,12	5,35	0,40	8,30	1,85	36,1	-0,49	-0,42	0,537
UR (%)	79,29	79,33	58,11	94,84	6,83	8,6	-0,54	1,04	0,401
Tar (°C)	22,40	22,80	15,62	29,20	2,69	12,0	-0,25	-0,26	0,365
Rsolar (MJ/dia.m ²)	20,65	21,65	3,30	32,20	7,05	34,1	-0,51	-0,46	0,553

S = armazenamento de água no solo na camada de 0-0,20 m de profundidade; P+I = chuva + lâmina de irrigação; ETp = evapotranspiração potencial; UR = umidade relativa do ar; Tar = temperatura do ar; Rsolar = radiação solar.

²p – Probabilidade de não rejeitar a hipótese de distribuição normal dos dados pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,05$ - dados com distribuição normal a 5% de probabilidade).

Analisando a Tabela 1 verifica-se que a média e o coeficiente de variação (CV) dos valores de S foram de 61,11 mm e 13,1%, respectivamente, indicando uma baixa dispersão dos dados de S em torno da média nos 124 dias avaliados. Também pode ser observado que a distribuição dos valores de S não apresentou uma tendência de normalidade segundo o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$), o que é corroborado pelos valores de assimetria (1,98) e de curtose (3,44). Este comportamento diferiu dos resultados encontrados por Timm et al. (2011), onde os dados de S foram normalmente distribuídos durante o período

estudado pelos autores em uma área experimental cultivada com café em Piracicaba/SP.

Da Tabela 1 também se constata que a distribuição dos dados da variável P+I não seguiu uma tendência de normalidade e ainda apresentaram uma alta dispersão em relação à média (CV = 162,3%) quando comparada as demais distribuições. De maneira geral, este comportamento já era esperado visto que há um grande número de dias sem chuva e dias com alta precipitação durante o período avaliado. Por outro lado, a distribuição dos valores de UR foi a que apresentou o menor CV (8,6%) quando comparada as demais variáveis (Tab. 1). A distribuição dos dados de ETp, UR, Tar e Rsolar tenderam a seguir a distribuição normal pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

A Figura 7 apresenta os autocorrelogramas das variáveis S, P+I, ETp, UR, Tar e Rsolar, calculados a partir da função de autocorrelação, com o objetivo de avaliar a estrutura de autocorrelação temporal das observações de cada uma dessas variáveis, ou seja, se elas foram monitoradas em um tempo suficiente para identificar sua representatividade temporal. Cabe ressaltar que 1 lag corresponde a um período de 1 dia.

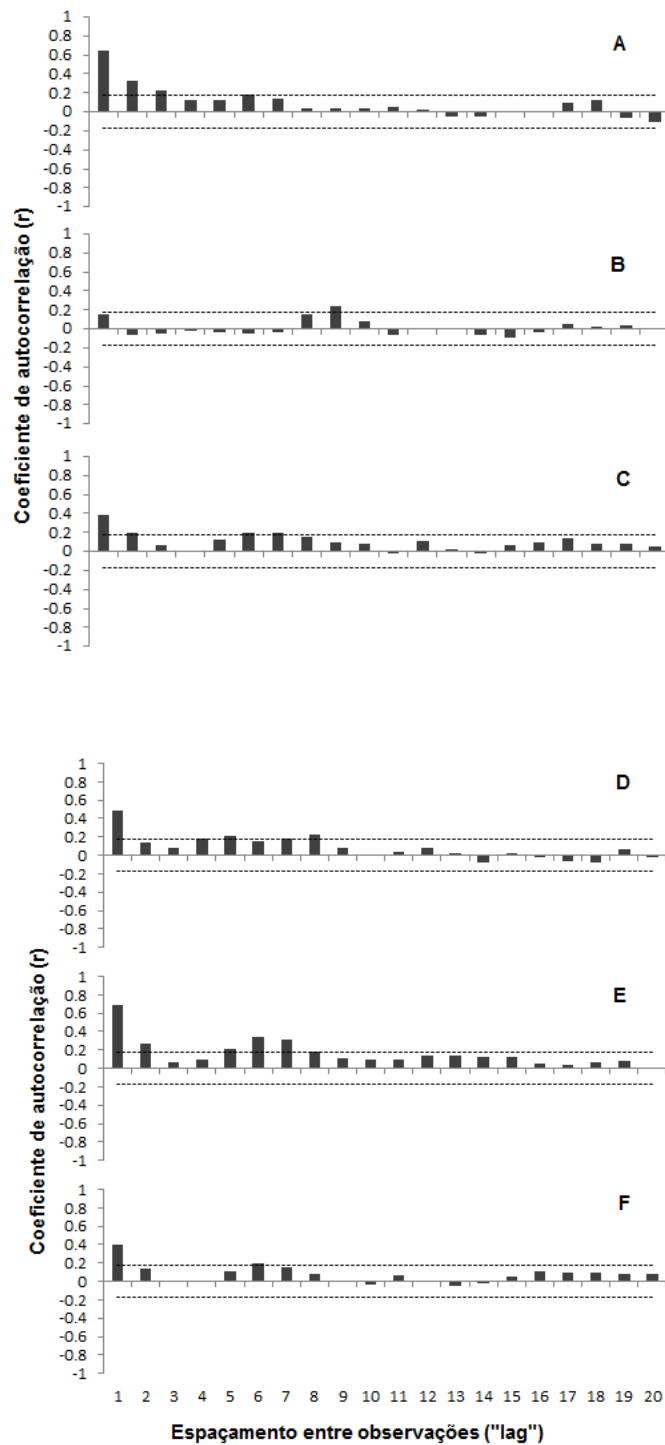


Figura 7. Autocorrelogramas da variável armazenamento de água no solo no ponto 32 (A), chuva + irrigação (B), evapotranspiração potencial (C), umidade relativa do ar (D), temperatura do ar (E) e radiação solar (F) para o período avaliado.

Ainda que a distribuição dos dados de S e da variável climática P+I não tenham apresentado tendência de normalidade (Tab. 1), as funções de

autocorrelação foram calculadas, visto que o principal interesse do estudo se justifica na abordagem do espaço de estados, ferramenta essa que pode ser aplicada para dados não estacionários que são na maioria das vezes não normalmente distribuídos. Nota-se na Figura 7A que os valores de armazenamento de água no solo apresentaram uma auto-dependência temporal de 3 lags aplicando o teste t ao nível de 5% de significância, o que representa uma autocorrelação temporal de 3 dias entre as observações adjacentes de S. No que se refere ao comportamento dos autocorrelogramas das variáveis climáticas, exceto o da variável P+I (Fig. 7B), todos os demais expressaram uma auto-dependência temporal das observações adjacentes de cada variável: valores de ETp apresentaram dependência temporal de 2 dias (Fig. 7C); de UR de 1 dia (Fig. 7D); de Tar de 2 dias (Fig. 7E); e de Rsolar 1 dia (Fig. 7F). Embora o autocorrelograma da variável P+I não tenha indicado uma dependência temporal entre as suas observações adjacentes dentro da escala temporal avaliada, ao nível de 5% de significância pelo teste t, pode ser observado que o valor do coeficiente de autocorrelação para 1 lag dessa variável ficou bem próximo do limite superior do intervalo de confiança calculado. Visto que essa variável representa a principal entrada de água na superfície do solo e por isso tem influência direta no comportamento temporal do armazenamento de água no solo em um determinado elemento de volume, ela foi levada em consideração no posterior estudo das correlações temporais via espaço de estados. Timm et al. (2011) também não encontraram auto-dependência temporal entre as observações adjacentes dessa variável, justificando a natureza sazonal da variável, que não repetiu sua relativa magnitude no período avaliado (duas em duas semanas) mas ainda assim foi usada para o estudo da relações temporais via espaço de estados.

A Figura 8 apresenta os crosscorrelogramas temporais entre a variável S e as variáveis climáticas P+I (Fig. 8A), ETp (Fig. 8B), UR (Fig. 8C), Tar (Fig. 8D) e Rsolar (Fig. 8E).

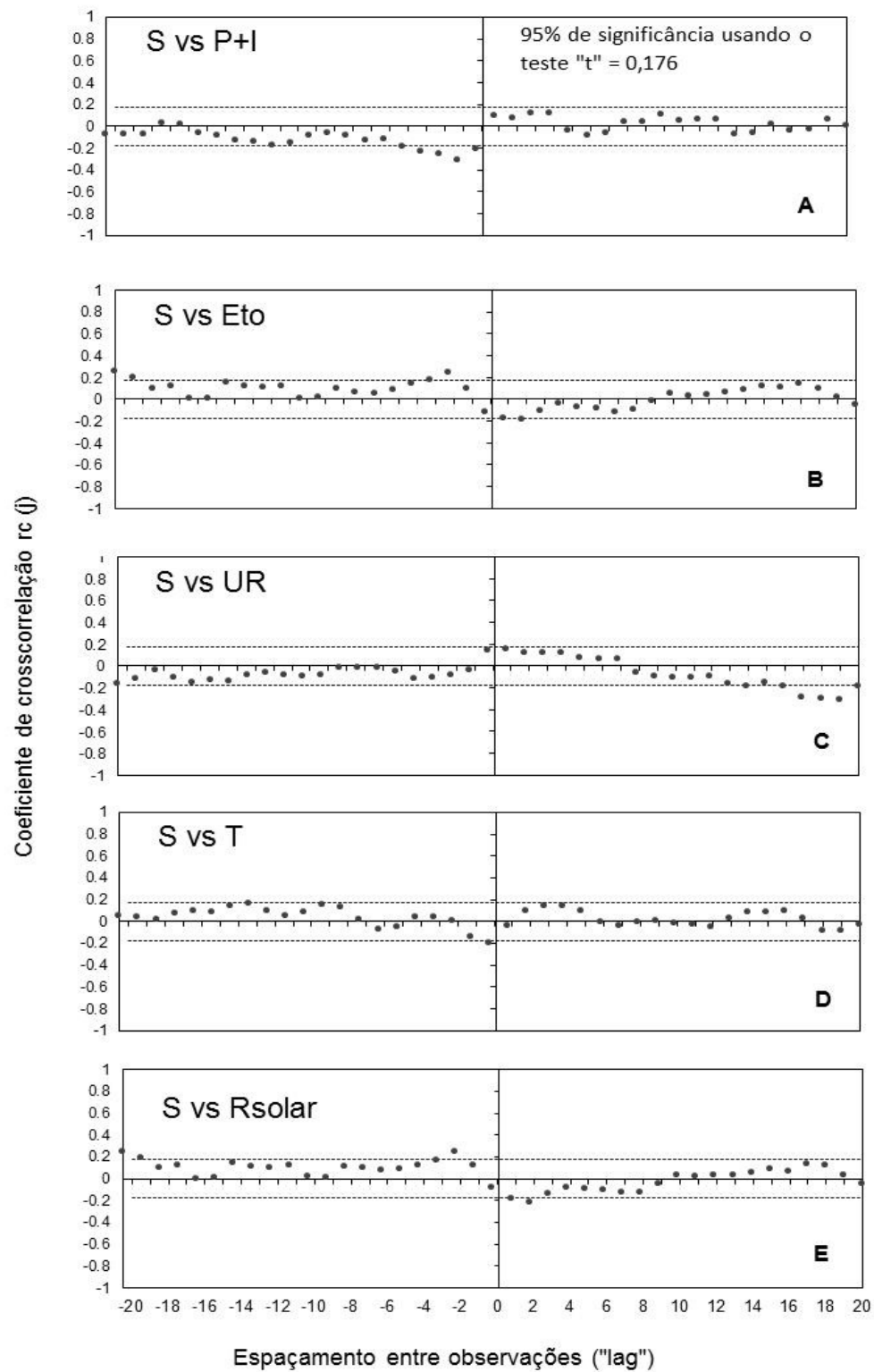


Figura 8. Crosscorrelogramas entre a variável armazenamento de água no solo (S) e as variáveis climáticas: (A) S e chuva + Irrigação; (B) S e evapotranspiração potencial (ETp); (C) S e umidade relativa do ar (UR); (D) S e temperatura do ar (Tar); e (E) S e radiação solar (Rsolar).

Analisando a Figura 8, nota-se que houve correlação temporal entre as observações de S e de todas as variáveis climáticas estudadas de no mínimo 1 lag em uma direção, exceto com a variável UR (Fig. 8C) que apresentou correlação com S em ambas as direções quando usado o teste t ao nível de 5% de significância no cálculo do intervalo de confiança. A partir deste resultado e considerando a complexa natureza da relação entre as variáveis ligadas ao sistema solo-planta-atmosfera envolvidas no presente estudo, bem como o fato de que no cálculo da evapotranspiração potencial (ETp) são levados em consideração os valores da umidade relativa do ar, da temperatura do ar e da radiação solar, foi avaliado o relacionamento temporal entre as variáveis S, P+I e ETp via aplicação da abordagem de espaço de estados.

Para estudar o relacionamento temporal entre as variáveis S, P+I e ETp foram construídos três cenários: 1. as três variáveis foram usadas no modelo de espaço de estados; 2. as variáveis S e P+I foram usadas no modelo; e 3. somente as variáveis S e ETp foram usadas no modelo. A Figura 9 mostra o comportamento da variável S medida no tempo t em função das variáveis S, P+I e ETp medidas no tempo t-1 por meio de um modelo autoregressivo de espaço de estados.

$$S_t = 0,740 * S_{t-1} + 0,351 * (P + I)_{t-1} - 0,099 * ETp_{t-1} + u_{st}$$

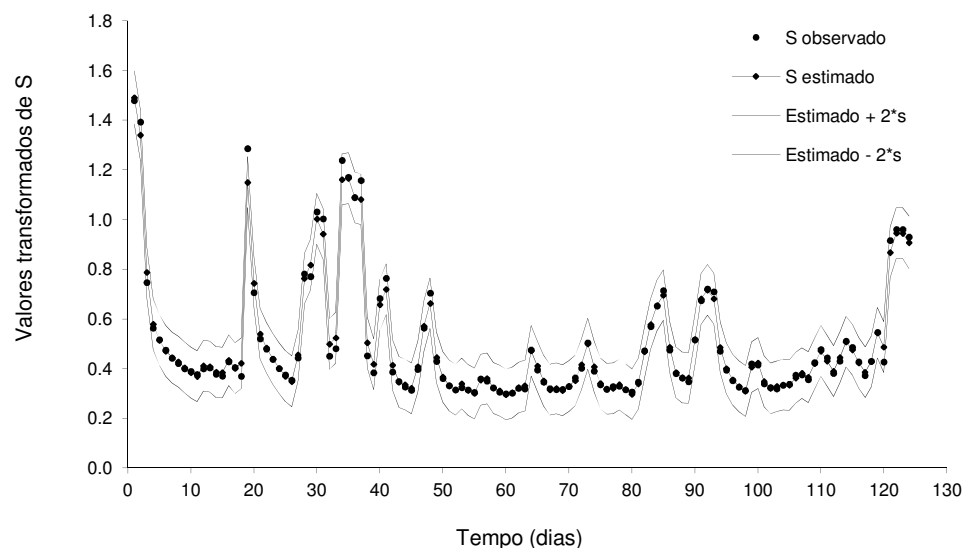


Figura 9. Análise de espaço de estados aplicada a variável armazenamento de água no solo (S) no tempo t em função da variável armazenamento de água no solo, precipitação mais irrigação (P+I) e evapotranspiração potencial (ETp) no tempo t-1.

Analisando a Figura 9, pode ser observado que a variável S medida no tempo t-1 foi a que teve a maior contribuição na estimativa de S no tempo t (74%) quando comparada com a contribuição das variáveis P+I (35%) e ETp (9,9%). Pode ser verificado também que as variações temporais de P+I no tempo t-1 possuem uma contribuição cerca de três vezes maior na estimativa de S do que as variações de ETp. Timm et al. (2011) quando avaliaram o comportamento de S em função da precipitação e evapotranspiração por meio de um modelo autoregressivo de espaço de estados também encontraram uma maior contribuição dos valores de precipitação (52%) quando comparado aos de evapotranspiração (28%) medidos no tempo t-1. Os autores encontraram uma menor contribuição dos valores de S medidos no t-1 (20%) para a estimativa de S no tempo t. O desempenho do modelo em estimar os valores de S em função de P+I e ETp foi avaliado por uma regressão linear em termos do coeficiente de determinação R^2 (Fig. 10). Da Figura 10 nota-se que os valores de S foram adequadamente estimados pelo modelo com um valor de R^2 de 0,992.

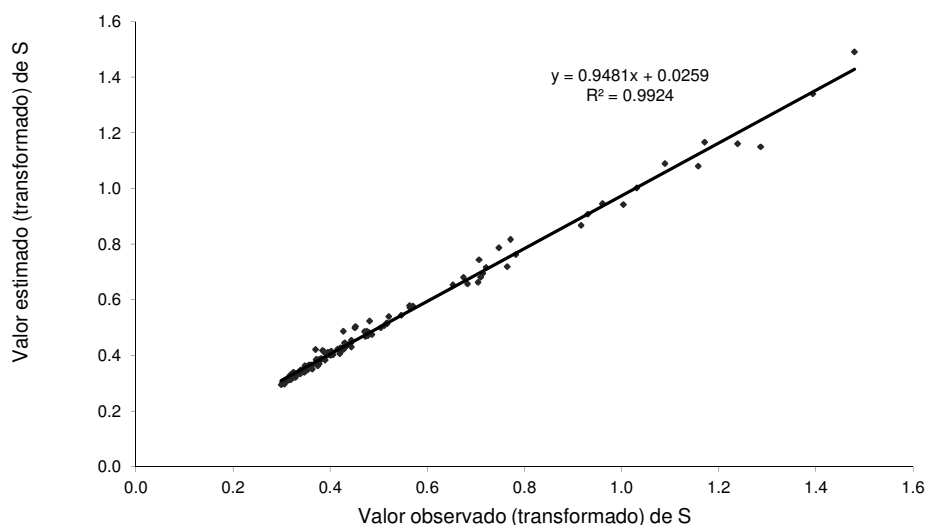


Figura 10. Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados do armazenamento de água no solo (S) a partir dos resultados da Figura 9.

A Figura 9 mostra que um número relativamente pequeno de valores observados de S cai fora dos limites de confiança calculados para cada estimativa,

indicando que o modelo foi capaz de detectar as variações temporais de S em função das variações temporais de P+I e ETp.

A Figura 11 apresenta o comportamento do modelo de espaço de estados para estimar os valores de S no tempo t em função dos valores de S e P+I no tempo t-1, mostrando que a contribuição de S medido no tempo t-1 nas estimativas de S no tempo t foi ligeiramente menor (70,7%) quando comparada com os resultados da Figura 9. Por outro lado, o desempenho do modelo, expresso em termos de magnitude do coeficiente R^2 , foi ligeiramente superior (aumentou de 0,992 para 0,996) (Fig. 12).

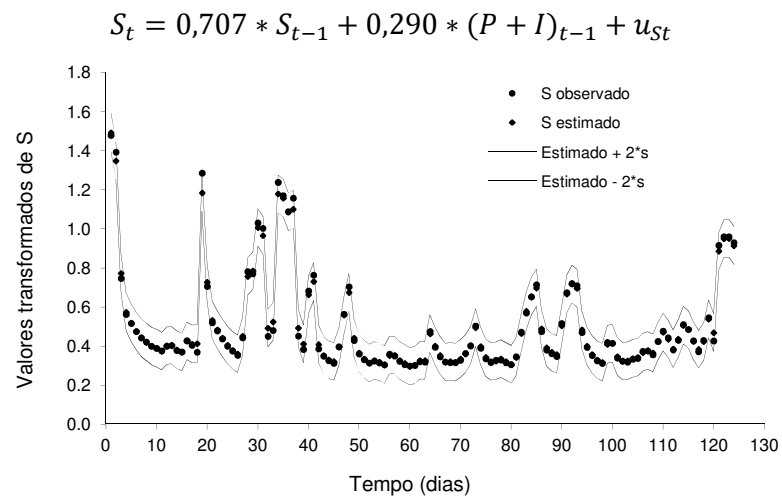


Figura 11. Análise de espaço de estados aplicada a variável armazenamento de água no solo (S) no tempo t em função da variável armazenamento de água no solo e precipitação mais irrigação (P+I) medidas no tempo t-1.

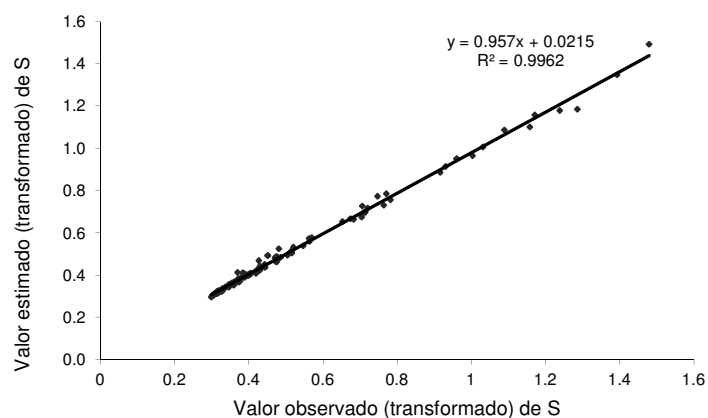


Figura 11. Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados do armazenamento de água no solo (S) a partir dos resultados da Figura 11.

Os valores de armazenamento de água no solo estimados pelo modelo de espaço de estados no tempo t em função dos seus valores e dos valores de ETp medidos no tempo $t-1$ bem como os intervalos superiores e inferiores das estimativas de S são apresentados na Figura 13. Pode ser notado que a maior contribuição dos valores de S medidos no tempo $t-1$ nas estimativas de S no tempo t é alcançada nesse caso (86,7%), enquanto que a contribuição de ETp foi praticamente a mesma (9,8%) já encontrada na Figura 9. Já o desempenho do modelo de espaço de estados foi o menor encontrado em termos de R^2 (Fig. 14, $R^2 = 0,949$).

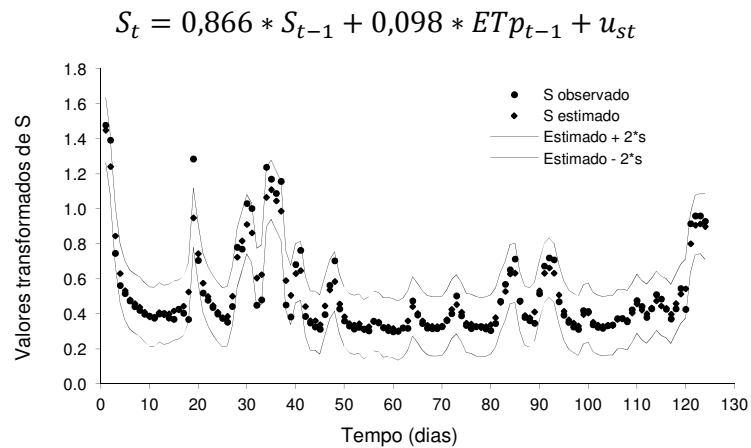


Figura 12. Análise de espaço de estados aplicada a variável armazenamento de água no solo (S) no tempo t em função da variável armazenamento de água no solo e evapotranspiração potencial (ETp) medidas no tempo $t-1$.

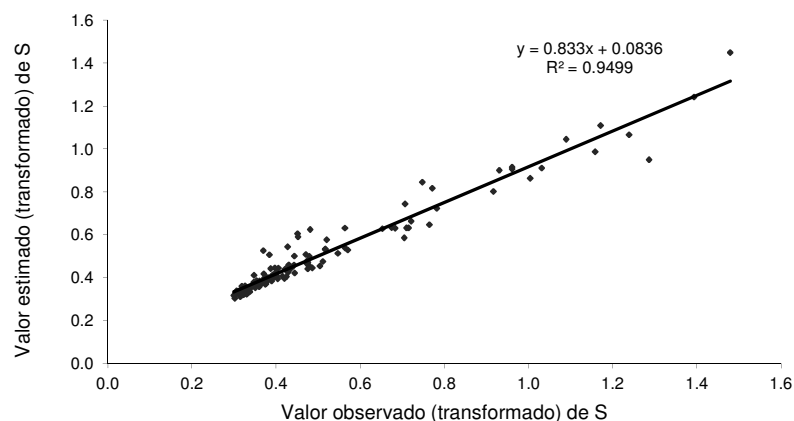


Figura 13. Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados do armazenamento de água no solo (S) a partir dos resultados da Figura 13.

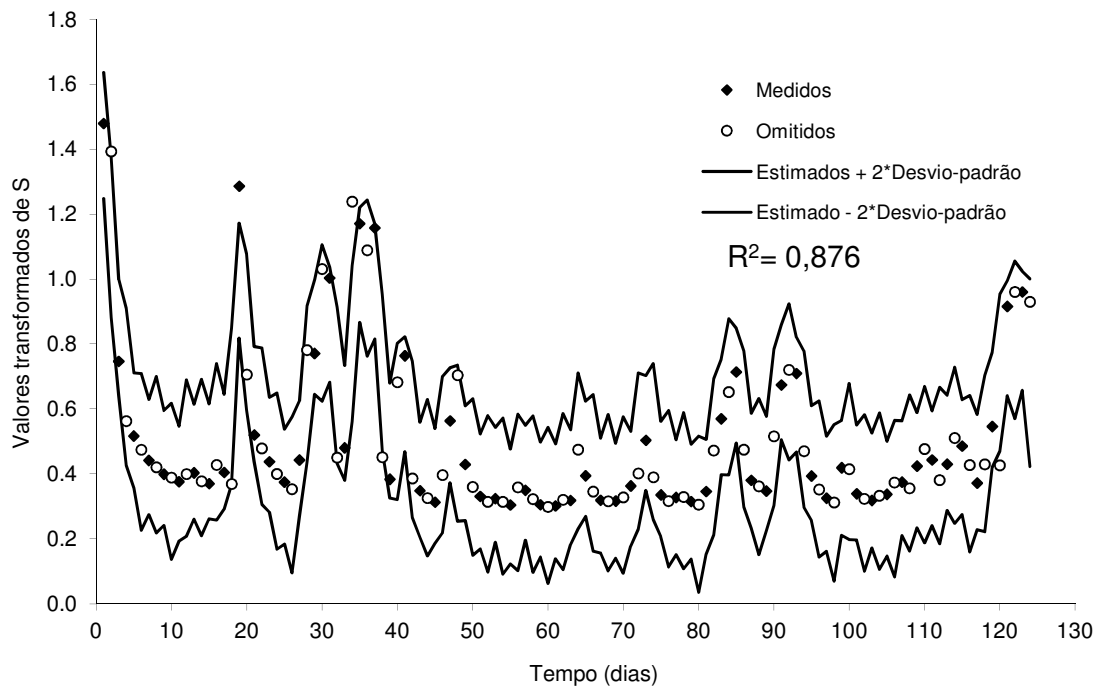


Figura 145. Análise de espaço de estados aplicada a variável armazenamento de água no solo (S) no tempo t em função da variável armazenamento de água no solo, precipitação mais irrigação (P+I) e evapotranspiração potencial (ETp) no tempo t-1. 50% das observações de S disponíveis e as demais séries completas.

Como dito anteriormente, a abordagem de espaço de estados pode ser usada na interpolação espacial ou temporal de dados. O modelo de espaço de estados descrito pelas equações 6b e 7b foi usado na interpolação temporal dos dados de S quando duas das quatro observações de S não foram consideradas na estimativa, ou seja, somente usando 50% das observações de S e todas as séries completas de P+I e ETp (133 observações cada uma) (Fig. 15). Segundo Wendroth et al. (2001), isso acarreta troca no peso de contribuição das diferentes variáveis para a estimativa de S devido à dependência do número de dados disponíveis para a atualização via FK. Quando 50% das observações de S estão disponíveis, o passo de atualização torna-se possível apenas nas posições em que o valor de S está disponível, ou seja, de duas em duas datas. Essa é a razão pela qual a largura do intervalo de confiança é maior quanto menor o número de dados disponíveis para a estimativa de S (Fig. 15).

Devido aos elevados volumes de água utilizados na irrigação por inundação do arroz em todo o mundo, estudos têm sido conduzidos para avaliar a adaptação da cultura do arroz às condições aeróbicas do solo, bem como a utilização de outros sistemas de irrigação. Uma alternativa de produção com significativa economia de água no cultivo do arroz é o método de irrigação por aspersão (PINTO, 2015).

Na década de 90 a irrigação por aspersão começou a ser considerada no cultivo de arroz nos Estados Unidos, no intuito de reduzir o uso da água e oferecer alternativas de cultivo nas áreas onde a irrigação por inundação era predominante (WESTCOTT; VINES, 1986). A manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície do solo influencia tanto a fisiologia das plantas de arroz, como provoca alterações em atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Em sua maioria, esses efeitos são benéficos à planta de arroz (GOMES et al., 1999). A alta disponibilidade de água no solo saturado possibilita que a planta de arroz mantenha um potencial de água nas folhas consideravelmente maior do que conseguiria no solo em condições de sequeiro. Isso favorece a taxa fotossintética nas folhas e conseqüentemente a acumulação de massa e a produção de carboidratos. É importante frisar que esse efeito não depende da presença de lâmina sobre a superfície do solo, basta que o solo esteja saturado (GOMES et al., 1985).

A produção de arroz em sistema irrigado por aspersão requer, porém, atenção especial quanto a alguns atributos químicos e físicos do solo, uma vez que em ambiente aeróbico não ocorrem várias modificações causadas pela inundação do solo, que beneficiam a cultura do arroz. Quando o arroz é irrigado por inundação, os atributos físicos do solo não são limitantes ao cultivo, pois o solo encontra-se em forma "fluida". No entanto, conforme Bamberg et al. (2009), quando solos de arroz são drenados para o cultivos de sequeiro, devido às suas condições físicas naturalmente desfavoráveis, há dificuldade para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

O monitoramento e estimativa dos valores de armazenamento de água no solo é uma tarefa difícil de ser executada devido a variabilidade espacial e temporal da umidade do solo no campo. Este trabalho teve como foco o monitoramento e quantificação da umidade na camada superficial de um solo de uma área cultivada com arroz irrigado por aspersão (sistema lateral de deslocamento linear) medido em intervalos de tempo diários e em diferentes posições na área experimental. O manejo de irrigação na área foi baseado no trabalho de Pinto (2015) que adotou

quatro manejos baseados em leituras de tensão de água no solo, onde foram instalados 14 sensores Watermark® em cada parcela experimental, correspondendo a: a) 10kPa – irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 10 kPa, durante todo o ciclo da cultura; b) 20kPa – irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 20 kPa, durante todo o ciclo da cultura; c) 40kPa- irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura; d) 40/10kPa – irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo foi de 40kPa, durante a fase vegetativa, ou seja da emergência até a diferenciação da panícula (R1) e quando a média da tensão foi de 10kPa durante a fase reprodutiva, ou seja, a partir de R1. Essa estratégia de irrigação assim como várias outras que têm sido adotadas ao longo dos últimos anos não leva em consideração a distância entre as posições de monitoramento do armazenamento de água no solo bem como a possível correlação temporal entre as suas observações na área experimental. Ao contrário, todas procuram e se baseiam na habilidade de se encontrar um “bom valor médio” do armazenamento de água no solo para determinar o momento de irrigar a cultura.

Ao longo das últimas três décadas, o conceito de agricultura de precisão tem sido aplicado com ênfase de que a qualidade e a quantidade da produção de uma dada cultura podem ser melhoradas pelo manejo diferenciado das práticas culturais que afetam a cultura durante o seu crescimento. Em outras palavras, uma área cultivada com uma cultura não é considerada uma unidade a ser manejada ou tratada uniformemente. Ao contrário disso, baseando-se nas condições locais do solo e na natureza dos processos biológicos e físicos, ela é manejada como um conjunto de distintos domínios espaciais, cada um monitorado nas escalas de tempo e espaço apropriados. Muitos métodos de análises estatísticas (geoestatística, análise de séries temporais, etc.) estão disponíveis para examinar conjuntos de dados observados no tempo e no espaço no intuito de descrever e entender os processos no sistema solo-planta-atmosfera.

Os modelos de espaço de estados são considerados de ajuste local, fornecendo oportunidade para descrever a associação temporal entre diferentes variáveis medidas ao longo do tempo e podem, dessa forma, se adequar melhor ao estudo das complexas relações do sistema solo—planta-atmosfera. Por outro lado, os modelos de regressão estáticos comumente usados são modelos de ajuste global, ou seja, seus coeficientes de regressão são valores médios que não variam

ao longo do tempo. Além disso, a resposta de uma variável não é única ao longo de uma área, sendo que a aplicação dos modelos estáticos de regressão múltipla freqüentemente fornece valores baixos do coeficiente de determinação. Pelo fato desses tipos de análises fornecerem estimativas globais dos coeficientes de regressão, eles não representam as variações no tempo das variáveis e podem induzir a procedimentos inadequados de manejo. Já os modelos de espaço de estados são mais adequados para o estudo das relações solo-planta-atmosfera, sobretudo porque levam em consideração o caráter local espacial e temporal dos processos agrônômicos.

Na natureza os processos podem ser físicos, químicos e/ou biológicos, como infiltração, absorção de nutrientes pela planta etc. Esses tipos de modelos são também valiosos quando equações determinísticas, baseadas em um processo físico, são usadas em combinação com observações que são correlacionadas no tempo ou no espaço, desde que a equação seja transformada em uma formulação de espaço de estados e seus parâmetros sejam teoricamente bem conhecidos (ver, p.ex., Katul et al., 1993). Daí, o modelo de espaço de estados pode fornecer as incertezas associadas às observações devido, por exemplo, à heterogeneidade do solo, à calibração do instrumento etc.

A representação de modelos em espaço de estados na área agrônômica tem sido recente e tudo indica que são ferramentas potencialmente valiosas para estudar o relacionamento de diversas variáveis que envolvem o sistema dinâmico solo-planta-atmosfera. Um caso é sua aplicação no desenvolvimento da chamada agricultura de precisão. Este conceito moderno de agricultura caracteriza-se pela aplicação diferenciada de práticas agrícolas (como adubação, calagem, profundidade de aração, aplicação de defensivos) em cada parcela de um campo de cultivo, atendendo as suas exigências específicas.

6. Conclusões

- A metodologia de Vachaud et al. (1985) indicou o ponto de monitoramento 32 como o que apresentou a maior estabilidade temporal da umidade do solo, na camada de 0-0,20 m, na área cultivada com arroz irrigado por aspersão no período de estudo.
- O desempenho do modelo de espaço de estados construído para estudar o relacionamento temporal entre a variável armazenamento de água no solo e chuva + irrigação foi ligeiramente superior aos demais envolvendo as variáveis armazenamento de água no solo, chuva + irrigação e evapotranspiração potencial.
- A abordagem em espaço de estados pode potencialmente ser usada como interpolador temporal dos dados de armazenamento de água no solo em função das variáveis chuva + irrigação e evapotranspiração potencial.

7. Referências bibliográficas

AHUJA, L.R.; NIELSEN, D.R. Field soil-water relations. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. (eds.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, p. 143-190, 1990.

AQUINO, L.S.; TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; BARBOSA, E.P.; PARFITT, J.M.B.; NEBEL, A.L.C.; PENNING, L.H. State-space approach to evaluate effects of land levelling on the spatial relationships of soil properties of a lowland area. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 135-147, 2015.

ALEMI, M.H.; SHAHRIARI, M.R.; NIELSEN, D.R. Kriging and cokriging of soil water properties. **Soil Technology**, v. 1, p. 117-132, 1988.

ALLETTO, L.; COQUET, Y.; ESTRADE, J. R. Two-dimensional spatial variation of soil physical properties in two tillage systems. **Soil Use and Management**, v. 26, p. 432-444, 2010.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 35, p. 1801-1810, 2011.

AWE, G.O.; REICHERT, J.M.; TIMM, L.C.; WENDROTH, O. Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. **Plant and Soil**, v. 387, p. 395-411, 2015. DOI: 10.1007/s11104-014-2304-5.

BAGARELLO, V.; SGROI, A. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, v. 76, p. 13-24, 2004.

BAMBERG, A.L.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TIMM, L.C.; PINTO, L.F.S.; LIMA, A.C.R.; SILVA, T.R. Densidade de um planossolo sob sistema de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.1079-1086, 2009.

BISWAS, A.; SI, B.C. Identifying scale specific controls of soil water storage in a hummocky landscape using wavelet coherency. **Geoderma**, v. 165, p. 50-59, 2011a.

BISWAS, A.; SI, B.C. Scales and locations of time stability of soil water storage in a hummocky landscape. **Journal of Hydrology**, v. 408, p. 100-112, 2011b.

BISWAS, A.; SI, B.C. Application of continuous wavelet transform in examining soil spatial variation: a review. **Mathematical Geosciences**, v. 43, p. 379-396, 2011c.

BISWAS, A.; SI, B.C. Revealing the controls of soil water storage at different scales in a hummocky landscape. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n° 4, p. 1295-1306, 2011d.

BISWAS, A.; SI, B. C. Scale Dependence and Time Stability of Nonstationary Soil Water Storage in a Hummocky Landscape Using Global Wavelet Coherency. **Advances in Agrophysical Research**. <http://dx.doi.org/10.5772/52340>, 2013.

BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELL, R. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. **Geoderma**, v. 148, p. 364–374, 2009.

CHOW, L.; XING, Z.; REES, H. W.; MENG, F.; MONTEITH, J.; STEVENS, L. Field Performance of Nine Soil Water Content Sensors on a Sandy Loam Soil in New Brunswick, Maritime Region, Canada. **Sensors**, v. 9, p. 9398-9413; doi: 10.3390/s91109398, 2009.

CICHOTA, R.; HURTADO, A. L. B.; VAN LIER Q. J. Spatio-temporal variability of soil water tension in a tropical soil in Brazil. **Geoderma**, v. 133, p. 231–243, 2006.

CONCENÇO, G.; BATALHA, B.R.; LARUE, J.L.; GALON, L.; TIRONI, S.P.; MANTOVANI, E.C.; ROLFES, C.R.; SILVA, A.A. Eficiência do uso da água na produção de arroz sob irrigação mecanizada ou inundação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO , 6 REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 28, 2009, Porto Alegre, RS. Anais.Porto Alegre; IRGA, 2009. CD-ROM.

CORBANE, C.; ANDRIEUX, P.; VOLTZ, M.; CHADOEUF, J.; ALBERGEL, J.; ROBBEZ-MASSON, J. M.; ZANTE, P. Assessing the variability of soil surface characteristics in row-cropped fields: The case of Mediterranean vineyards in Southern France. **Catena**, v. 72, p. 79–90, 2008.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 646p.

DEMPSTER, A.P.; LAIRD, N.M.; RUBIN, D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. **Journal Royal Statistical Society**, Series B, v. 39, p. 1-38, 1977.

DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A.G. GSLIB. **Geostatistical software library and user's guide**. Nova York, Oxford University Press, 1992.

DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CASSARO, F.A.M. State-space approach for the analysis

of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola**, v. 56, nº 4, p. 1215-1221, 1999.

EMBRAPA. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil**. Embrapa Clima Temperado. Pelotas, Sistemas de Produção 3. 2005.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2° ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa solos, 2011 (Documento 132).

GELB, A. Applied optimal estimation. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology Press, p. 374, 1974.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 155-164, 1999.

HEUVELINK, G. B. M.; WEBSTER, R. Modelling soil variation: past, present, and future. **Geoderma**, v. 100 (3-4), p. 269–301, 2001.

HUANG, X.; SHI, Z.H.; ZHU, H.D.; ZHANG, H.Y.; AI, L.; YIN, W. Soil moisture dynamics within soil profiles and associated environmental controls. **Catena**, v. 136, p. 189–196, 2016.

HUI, S.; WENDROTH, O.; PARLANGE, M.B.; NIELSEN, D.R. Soil variability – Infiltration relationships of agroecosystems. **Journal of Balkan Ecology**, v. 1, p. 21-40, 1998.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), 2015. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/prevsaf>.

IQBAL, J.; THOMASSON, J. A.; JENKINS, J. N.; OWENS, P. R.; WHISLER, F. D. Spatial variability analysis of soil physical properties of Alluvial soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1338-1350, 2005.

JIA, X.; SHAO, M.; WEI, X. State-space prediction of soil respiration time series in temperate, semi-arid grassland in northern China. **Soil Research**, v. 50, p. 293-303, 2012.

JIA, X.; SHAO, M.; WEI, X.; HORTON, R.; LI, X. Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space modeling approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. **Geoderma**, v. 160, p. 281-291, 2011.

JOHNSTON, S.G.; HIRST, P.; SLAVICH, P.G.; BUSH, R.T.; AASO, T. Saturated hydraulic conductivity of sulphuric horizons in coastal floodplain acid sulphate soils: variability and implications. **Geoderma**, v. 151, p. 387–394, 2009.

JOSCHKO, M.; GEBBERS, R.; BARKUSKY, D.; ROGASIK, J.; HÖHN, W.; HIEROLD, W.; FOX, C. A.; TIMMER, J. Location-dependency of earthworm response to reduce tillage on sandy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 55-66, 2009.

KALMAN, R.E. A new approach to linear filtering and prediction theory. **Transactions ASME Journal of Basic Engineering**, v. 8, p. 35-45, 1960.

KATUL, G.G.; WENDROTH, O.; PARLANGE, M.B.; PUENTE, C.E.; FOLEGATTI, M.V.; NIELSEN, D.R. Estimation of in situ hydraulic conductivity function from nonlinear filtering theory. **Water Resources Research**, v. 29, p. 1063-1070, 1993.

LEIB, B.G.; HATTENDORF, M.; ELLIOTT, T.; MATTEWS, G. Adoption and adaptation of scientific irrigation scheduling: Trends from Washington, USA as of 1998. **Agricultural Water Management**, 55: 105- 120. DOI: 10.1016/S0378-3774(01)00191-3, 2002.

LIU, Z.P.; SHAO, M.A.; WANG, Y.Q. Estimating soil organic carbon across a large-scale region: a state-space modeling approach. **Soil Science**, v. 177, p. 607-618, 2012.

MCGRAW, T. Soil test level variability in Southern Minnesota. **Better crops, Potash & Phosphate Institute**, v. 78, nº 4, p. 24-25, 1994.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Previsão de séries temporais**. 2ª ed. São Paulo, Atual, p. 436, 1987.

MOTTA, A. C. O.; HOTTA, L. K. **Utilização do filtro de Kalman em modelos estatísticos**. Campinas, UNICAMP, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, p. 71, 1998.

NIELSEN, D.R.; ALEMI, M.H. Statistical opportunities for analyzing spatial and temporal heterogeneity of field soils. **Plant and Soil**, v. 115, p. 285-296, 1989.

NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation**. Reiskirchen: Catena-Verlag, 2003. 398p.

NORONHA, C.L. Com boa gestão, não faltará água. Tempo das Águas, Rio Grande do Sul, 13 p. 2006. Disponível em: <http://www.lasercom.jor.br/tempo_aguas/01_gestao.htm>. Acesso em: 27 ago. 2013.

OGUNWOLE, J.O.; TIMM, L.C.; UGWU-OBIDIKE, E.O.; GABRIELS, D.M. State-space estimation of soil organic carbon stock. **International Agrophysics**, v. 28, p. 185-194, 2014.

ZGÖZ, E. Long term conventional tillage effect on spatial variability of some soil physical properties. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 33, p. 142–160, 2009.

PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S.; SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 189-195, 1999.

PARFITT, J.M.B. Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológico em solos de várzea. Pelotas, 2009. 92f. Tese (Doutorado em Solos) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2009.

PEREIRA, R.A.D. Modelagem do potencial perturbador com base em *wavelets* aplicada à conexão de redes verticais. Curitiba, p. 175, 2013. Tese (Doutoramento) - Universidade Federal do Paraná.

PINTO, Marília Alves Brito Pinto. Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo. 2015. 68p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

R CORE TEAM. 2013 R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org/>.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2° ed. São Paulo: Manole, 2012. 500 p.

ROLSTON, D. E.; BIGGAR, J. W.; NIGHTINGALE, H. I. Temporal persistence of spatial soil-water patterns under trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 12, p. 181–186, 1991.

SALDANÑA A.; STEIN, A.; ZINCK, J.A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River/Spain. **Catena**, v. 33, p. 139–153, 1998.

SHE, D.; XUEMEI, G.; JINGRU, S.; TIMM, L.C.; HU, W. Soil organic carbon estimation with topographic properties in artificial grassland using a state-space modeling approach. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 94, p. 503-514, 2014.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm. **Journal of Time Series Analysis**, v. 3, p. 253-264, 1982.

SHUMWAY, R.H. Time series in soil science: is there life after kriging? In: NIELSEN, D.R.; BOUMA, J. (eds.) **Soil spatial variability**. Las Vegas, Proceedings – Workshop – ISSS/SSSA, 1985.

SHUMWAY, R. H. **Applied statistical time series analyses**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1988. 379p.

SHUMWAY, R. H.; BIGGAR, J. W.; MORKOC, F.; BAZZA, M.; NIELSEN, D. R. Time- and frequency-domain analyses of field observations. **Soil Science**, v. 147, nº 4, p. 286-298, 1989.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time series analysis and its applications**. New York, Springer, p. 549, 2000.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time series analysis and its applications with R examples**. 3^a ed. New York, Springer, p. 596, 2011.

SI, B.C. Spatial scaling analyses of soil physical properties: a review of spectral and wavelet methods. **Vadose Zone Journal**, v. 7, nº 2, p. 547-562, 2008.

SILVA, A. P.; NADLER, A.; KAY, B.D. Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of water content in the tillage zone. **Soil and Tillage Research**, v. 58, p. 207-218, 2001.

SILVA, C.A.S.; PARFITT, J.M.B. **Drenagem superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. 10p. (Circular Técnica 40).

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Bento Gonçalves: SOSBAI, 2010. 188p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Itajaí, SC: SOSBAI, 2012. 179p.

SOUZA, R.C. **Modelos estruturais para previsão de séries temporais: abordagens clássica e bayesiana**. Rio de Janeiro, 17^o Colóquio Brasileiro de Matemática, Instituto de Matemática Pura e Aplicada do CNPq, p. 171, 1989.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004.

SØVIK, A. K.; AAGAARD, P. Spatial variability of a solid porous framework with regard to chemical and physical properties. **Geoderma**, v. 113, p. 47– 76, 2003.

STARR, G.C. Assessing temporal stability and spatial variability of soil water patterns with implication for precision water management. **Agricultural Water Management**, v. 72, p. 223–243, 2005.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. (Eds.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 45-74.

STEVENSON, F.C.; KNIGHT, J.D.; WENDROTH, O.; VAN KESSEL, C.; NIELSEN, D.R. 2001. A comparison of two methods to predict the landscape-scale variation of crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 58, p. 163-181, 2001.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M. **Cultivo do arroz de terras altas no Estado do Mato Grosso**. Embrapa Arroz e Feijão, 2006. (Sistemas de Produção 7).

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2^a ed. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia/UFRGS, 1995. 174p.

TESFAHUNEGB, G. B.; TAMENE, L.; VLEK, P.L.G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 124–139, 2011.

THOMPSON, R.B.; GALLARDO, M.; AGUERA, T.; VALDEZ L.C.; FERNANDE, M.D. Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. **Irrigation Science**, v. 24, p. 185 - 202. DOI 10.1007/s00271-005-0009-5, 2006.

TIMM, L.C.; FANTE JÚNIOR, L.; BARBOSA, E.P.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Interação solo-planta avaliada por modelagem estatística de espaço de estados. **Scientia Agricola**, v. 57, nº 4, p. 751-760, 2000.

TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; CÁSSARO, F.A.M.; TOMINAGA, T.T.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO-NETO, D. Sugarcane production evaluated by the state–space approach. **Journal of Hydrology**, v. 272, p. 226-237, 2003a.

TIMM, L.C.; BARBOSA, E.P.; SOUZA, M.D.; DYNIA, J.F.; REICHARDT, K. State-space analysis of soil data: an approach based on space-warying regression models. **Scientia Agricola**, v. 60, nº 2, p. 371-376, 2003b.

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.

TIMM, L.C.; GOMES, D.T.; BARBOSA, E.P.; REICHARDT, K.; SOUZA, M.D.; DYNIA, J.F. Neural network and state-space models for studying relationships among soil properties. **Scientia Agricola**, v. 63, p. 386-395, 2006.

TIMM, L.C.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O.O.S.; HU, W.; BORTOLOTTI, R.P.; SILVA, A.L.; BRUNO, I.P.; REICHARDT, K. Temporal variability of soil water storage evaluated for a coffee field. **Soil Research**, v. 49, p. 77–86, 2011.

TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; LIMA, C.L.R. de; AQUINO, L.A.; PENNING, L.H.; DOURADO-NETO, D. State-space approach to understand Soil-Plant-Atmosphere relationships. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMA, G.K. (Eds.). **Application of Soil Physics in Environmental Analysis: measuring, modelling and data integration**. New York: Springer, 2014. chapter 5, p. 91-129.

TOESCHER, C. F.; KOPP, L. M.; ANCINELO, A. G.; COLETTI, L. S. Lâmina de água aplicada no arroz, via pivô central, em Uruguaiana-RS. Disponível em <http://www.cnpaf.embrapa.br/publicacao/seriedocumentos/>. 2005.

TUKEY, J.W. "Can we predict where 'Time Series' should go next?". In: BRILLINGER, D.R.; TIAO, G.C. (eds.) **Directions in Time Series**. Hayward, Institute of Mathematical Statistics, p. 1-31, 1980.

VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 822-827, 1985.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p. 892-898, 1980.

VAN PELT, R.S.; WIERENGA, P.J. Temporal stability of spatially measured soil matric potential probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 668-677, 2001.

WANG, T.; ZLOTNIK, V.; ŠIMUNEK, J.; SCHAAP, M. Using pedotransfer functions in vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions. **Water Resources Research**, v. 45, W04412, 2009.

WARRICK, A.W.; MYERS, D.E.; NIELSEN, D.R. Geostatistical methods applied to soil science. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, cap. 3, p. 53-82, 1986.

WARRICK, A. W. Spatial variability. In: Hillel, D. (Ed.), **Environmental Soil Physics**. Academic Press, London, pp. 655-675, 1998.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: Stewart, B.A. (Ed.), **Advances in Soil Science**, Vol. 3. **Springer-Verlag**, New York, 1985. p. 1-70.

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey**. Oxford University Press, Oxford, UK, 1990.

WENDROTH, O.; AL OMRAN, A.M.; KIRDA, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. State-space approach to spatial variability of crop yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 801-807, 1992.

WENDROTH, O.; JÜRSCHIK, P.; KERSEBAUM, K.C.; REUTER, H.; VAN KESSEL, C.; NIELSEN, D.R. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes – four case studies. **Soil and Tillage Research**, v. 58, p. 113-127, 2001.

WENDROTH, O.; REYNOLDS, W.D.; VIEIRA, S.R.; REICHARDT, K.; WIRTH, S. Statistical approaches to the analysis of soil quality data. In: GREGORICH, E.G. & CARTER, M.R. (eds.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam, Elsevier Science, p. 247-276, 1997.

WENDROTH, O.; KOSZINSKI, S.; PENA-YEWTUKHIV, E. Spatial Association among Soil Hydraulic Properties, Soil Texture, and Geoelectrical Resistivity. **Vadose Zone Journal**, v. 5, p. 341–355, 2006.

WENDROTH, O.; YANG, Y.; TIMM, L.C. State-space analysis in Soil Physics. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMA, G.K. (Eds.). **Application of Soil Physics in Environmental Analysis: measuring, modelling and data integration**. New York: Springer, 2014. chapter 3, p. 53-74.

WEST, M.; HARRISON, J. **Bayesian forecasting and dynamic models**. 1^a ed. Londres, Springer-Verlag, p. 704, 1989.

WEST, M.; HARRISON, J. **Bayesian forecasting and dynamic models**. 2^a ed. Londres, Springer-Verlag, p. 681, 1997.

WESTERN, A. W.; ZHOUA S.; GRAYSONA, R. B.; MCMAHONA, T.A.; GU"NTER, B.; WILSON, D.J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. **Journal of Hydrology**, v. 286, p. 113–134, 2004.

ZHANG, M.; LI, M.; WANG, W.; LIU, C.; GAO, H. Temporal and spatial variability of soil moisture based on WSN. **Mathematical and Computer Modelling**. doi:10.1016/j.mcm.2012.12.019,2012

ZUCCO, G.; BROCCA, L.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. Influence of land use on soil moisture spatial–temporal variability and monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 193–199, 2014.

YANG, Y.; WENDROTH, O.; WALTON, R.J. Field-scale bromide leaching as affected by land use and rain characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n^o 4, p. 1157-1167, 2013.