

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DAIANE DE CINQUE MARIANO

Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem e evaporação da
água do solo em função de resíduos culturais de soja e trigo

Maringá

2013

DAIANE DE CINQUE MARIANO

Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem e evaporação da
água do solo em função de resíduos culturais de soja e trigo

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Agronomia do
Departamento de Agronomia, Centro de
Ciências Agrárias da Universidade Estadual de
Maringá, como requisito parcial para obtenção
do título de Doutora em Agronomia

Área de concentração: Produção
Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio
Lourenço de Freitas

Maringá

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

M333c	<p>Mariano, Daiane Cinque Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem e evaporação da água do solo em função de resíduos culturais de soja e trigo / Daiane Cinque Mariano. -- Maringá, 2013. 70 f. : il. algumas color.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2013.</p> <p>1. Balanço hídrico. 2. Resíduo de cultura - Evaporação da água. I. Freitas, Paulo Sérgio Lorengo de, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.</p> <p>CDD 22.ed. 631.432</p>
-------	--

DAIANE DE CINQUE MARIANO

**CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETROS DE BARRAS DE
PESAGEM E EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO EM FUNÇÃO DE
RESÍDUOS CULTURAIS DE SOJA E TRIGO**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, na área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 22 de abril de 2013.

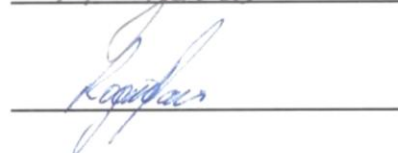
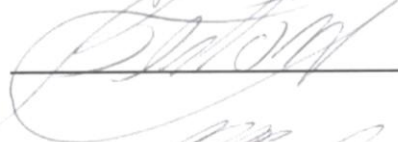
Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas
Presidente

Prof. Dr. Altair Bertonha
Membro

Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves
Membro

Prof. Dr. Roberto Rezende
Membro

Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria
Membro



DEDICATÓRIA

À minha família: Ademir Mariano (pai), Nair de Cinque (mãe) e Ariane de Cinque Mariano (irmã), por todo carinho nas horas mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem sou eternamente grata por mais esta jornada.

Aos meus pais, por estarem do meu lado nos momentos de dificuldade, por me ensinarem a importância do estudo, da dedicação, da compreensão, da amizade, em todos os momentos de minha vida.

Ao grande mestre, Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas, pela sua dedicação, orientação e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria, pela co-orientação e proposta da pesquisa, juntamente com o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), em Londrina, por disponibilizar a estrutura, os equipamentos, os funcionários e a paciência que resultaram na qualidade deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGA), pela atuação na construção do conhecimento profissional.

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), pela oportunidade oferecida para a realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da Bolsa de Estudo.

Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem e evaporação da água do solo em função de resíduos culturais soja e trigo

RESUMO

Resíduos vegetais influenciam o balanço de energia e o fluxo de vapor d'água na superfície do solo, afetando a evaporação. Lisímetros de pesagem possibilitam a medição da evaporação a fim de quantificar os efeitos decorrentes dos restos culturais em sistema de cultivo, tais como o sistema de plantio direto. Nos lisímetros tradicionais, o sistema de pesagem geralmente inclui uma célula de carga acoplada a uma balança com alavancas de redução de massa. O alto custo da matéria prima e de mão de obra dessas balanças, associado à grande oferta atual de componentes eletrônicos de coleta de dados de baixo custo, viabilizam a construção de novos equipamentos constituídos de barras de pesagem com quatro células de carga por lisímetro. Esse trabalho teve como objetivos: Construir e calibrar quatro novos lisímetros constituídos de tanques duplos retangulares, de aproximadamente 1,35 m² de superfície e 1,5 m de profundidade, apoiados sobre duas barras de pesagem e utilizar lisímetros para analisar o efeito da quantidade e distribuição de resíduos de culturas sobre a superfície do solo na evaporação da água do solo. Cada barra de pesagem utilizada para construção dos lisímetros continha duas células de carga de alta acuracidade, ligadas por cabo coaxial a uma caixa de junção e depois a um sistema de aquisição de dados. Calibrações de cada aparelho foram realizadas após a instalação dos equipamentos no campo, resultando em ajuste linear ($R^2 > 0,9999$) entre impulso elétrico (mV) e massa (kg), com mínima histerese. O erro absoluto médio da estimativa da massa (0,0245 a 0,2844 equivalente-mm), bem como o índice de Wilmott entre os valores observados e estimados ($d = 1,0000$), indicam a alta precisão das medidas do equipamento construído. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que os aparelhos construídos são apropriados para estimativas de evapotranspiração e demais componentes do balanço hídrico. A evaporação da água do solo em função da quantidade de resíduos de cultura (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), e também em função da distribuição de 4 t ha⁻¹ cobrindo 33, 66 e 100% do terreno, foi medida durante dois ciclos para cada período experimental, por oito lisímetros de pesagem, em Londrina, PR. Durante o período outono/inverno, utilizou-se resíduo da cultura da soja; e no período de primavera/verão, utilizou-se resíduo da cultura do trigo. No início de cada ciclo de medição, aplicou-se lâmina de irrigação de 50mm. As curvas de evaporação acumulada ao término de cada período de

secamento ajustaram-se ao polinômio de segundo grau, com decréscimos significativos em função da quantidade ($0,99 \geq R^2 \geq 0,86$) e distribuição de resíduo ($0,99 \geq R^2 \geq 0,74$). Foram observados decréscimos significativos da evaporação durante o outono com o aumento da quantidade de resíduo aplicado, destacando-se os tratamentos 4 e 6 t ha⁻¹, com 28 e 43%, respectivamente. A evaporação, em função da quantidade de resíduos culturais, ajustou-se ao polinômio de segundo grau. A evaporação da água do solo reduziu-se com o aumento da taxa de resíduo de soja, distribuída uniformemente sobre o lisímetro durante o período de outono/inverno. Destacaram-se nos dois ciclos avaliados, os tratamentos de 100%, com taxas de evaporação de 33 e 29% em relação ao solo descoberto. A quantidade e distribuição de resíduos culturais reduzem a evaporação e promovem uma maior retenção de água no solo, o que a torna disponível para as plantas por um período maior de tempo.

Palavras-chave: Balanço hídrico. Evapotranspiração. Resíduo de cultura.

Construction and calibration bars weight lysimeter and soil water evaporation as a function of crop residue soybean and wheat

ABSTRACT

Crop residues affects soil evaporation by changing energy balance and flux of water vapor on the soil surface. Weighing lysimeters enable the measurement of evaporation to quantify the effects arising from crop residues in cultivation system such as the no-tillage system. In the standard lysimeters, the weighing system generally includes a load cell attached to a weighing scale with levers of mass decrease. The high cost of the mechanical parts in the weighing scale, combined with wide offer of low cost electronics for data collection, makes viable to build weighing bar lysimeters with four load cells in each device. This study aimed to: construct and calibrate four new lysimeters built of rectangular double tanks of approximately 1.35 m² of surface and 1.50 m of depth, supported by two weighing bars and to use weighing lysimeters to analyze the effect of the quantity and distribution of soil surface crop residues on the soil water evaporation. Each lysimeter had two weighing bars supported by two loading cells of high accuracy, connected to a junction box by a coaxial cable and then to a datalogger. Calibration of each lysimeters was performed after field installation. The results showed linear response ($R^2 > 0.9999$) of electric signal (mV) to mass increase or decrease (kg), with minimum hysteresis. Mean absolute error of mass estimate (0.0245 a 0.2844 equivalent-mm) and Wilmott index between observed and estimated data ($d = 1.0000$) indicate a high precision of the new equipment. The results allow concluding that the lysimeters constructed are appropriate for estimation of evapotranspiration and on components of soil water balance. Soil water evaporation as a function of mulching (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹) and also as function of 4 t ha⁻¹ of soybean mulching applied to cover 33, 66, 100% was measured in two drying cycles for each trial, eight weighing lysimeters in Londrina, PR. For two experiments soybean residue was used during Fall/Winter wheat residue was used we used during spring/summer. At the beginning of each drying period, irrigation of 50 mm was applied. The cumulative evaporation curves at the end of each period of drying set the second degree polynomial, with significant decreases in the quantity ($0.99 \geq R^2 \geq 0.86$) and mulching distribution ($0.99 \geq R^2 \geq 0.74$). Significant decreases were observed of the evaporation during the autumn with the increase of quantity of applied residue, contrasting the treatments 4 and 6 t ha⁻¹, with 28 and 43%, respectively. Evaporation as a

function of the quantity of crop residue follow a second degree polynomial. Soil water evaporation decreased with increase of rate of soybean residue, distribution evenly about the lysimeter during of period of Autumn/Winter. Stood out in two cycles evaluated treatments 100%, with evaporation rates of 33 and 29%, compared to bare soil. The quantity and distribution crop residues decreases the evaporation and furthers a higher retention of water in the soil, what makes it available to the plants for a longer period of time.

Keywords: Water balance. Evapotranspiration. Crop residue.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1	Coefficiente angular (a), constante (b), coeficientes de determinação (R^2) erro absoluto médio (E) da regressão linear ($y = ax + b$) entre massa (y, equivalente em mm), voltagem (x em mV) obtidos para os quatro lisímetros testados.....	31
Tabela 2	Valores do erro Absoluto (Ea), erro do médio quadrático (EMQ), erro médio absoluto (EMA) e o índice de Wilmott (d), resultantes da regressão linear entre os valores de massa equivalente em mm observados e estimados.....	32

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1	Vista lateral (a) e superior do lisímetro (b) do lisímetros de barra de pesagem.....	25
Figura 2	Dreno de balança: a) vista frontal, b) vista lateral antes da drenagem e c) após a drenagem.....	27
Figura 3	Relação entre variação da massa equivalente-mm e voltagem dos quatro lisímetros analisados.....	32
Figura 4	Variação de massa entre os valores observados e estimados em equivalente-mm, para os ciclos de carga, descarga, com seus respectivos coeficientes angulares (a) e de determinação (R^2) nos quatro lisímetros analisados.....	33
Figura 5	Armazenamento de água no solo medido em um lisímetro cultivado com trigo de 6 a 12 de maio de 2011.....	34
Figura 6	Somatório da evapotranspiração da cultura do trigo (ET_c) e evapotranspiração de referência (ET_o) medidas em um lisímetro nos dias 06 de maio (a), 07 de maio (b) a 08 de maio (c) de 2011.....	35
Figura 7	Drenagem acumulada (a) e armazenamento de água no solo (b) medidos em um lisímetro cultivado com trigo durante 09 a 12 de junho de 2011.....	37

CAPÍTULO II

Figura 1	Lisímetro com solo descoberto (a) e com diferentes quantidades de resíduos culturais, 2 t ha ⁻¹ (b), 4 t ha ⁻¹ (c) e 6 t ha ⁻¹ (d).....	47
Figura 2	Lisímetro com solo descoberto (a) e com diferentes coberturas resíduos culturais da palha de soja, 33% (b), 66% (c) e 100% (d).....	50
Figura 3	Evaporação (E) e evapotranspiração de referência (ET_o) avaliadas durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera com resíduo de trigo.....	51

Figura 4	Evapotranspiração de referência (ET _o) e evaporação acumuladas avaliadas durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d), durante a primavera, com resíduo de trigo.....	53
Figura 5	Evaporação acumulada em função da quantidade de resíduo ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono com resíduos de cultura de soja (a) e primavera com resíduos de cultura de trigo (b).....	54
Figura 6	Redução de evaporação em função da quantidade de resíduos ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono com resíduos de cultura de soja (a) e primavera com resíduos de cultura de trigo (b).....	56
Figura 7	Valores diários do coeficiente de evaporação (K _e) avaliados durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera, com resíduo de trigo.....	57
Figura 8	Evapotranspiração de referência (ET _o) e evaporação (E) avaliados durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono/inverno, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera/verão, com resíduo de trigo.....	58
Figura 9	Evapotranspiração de referência (ET _o) e evaporação acumuladas avaliadas durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono/inverno, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera/verão, com resíduo de trigo.....	60
Figura 10	Evaporação acumulada em função da distribuição de resíduos de cultura ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono/inverno, com resíduos de cultura de soja (a); e primavera/verão, com resíduos de cultura de trigo (b).....	61
Figura 11	Redução de evaporação em função da distribuição resíduos de cultura ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono/inverno, com resíduos de cultura da soja (a); e primavera/verão, com resíduos de trigo (b).....	62
Figura 12	Valores diários do coeficiente de evaporação (K _e) avaliados durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono/inverno, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera/verão, com resíduo de trigo.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Sistema de plantio direto.....	3
2.2	Conservação do solo em sistema de plantio direto.....	4
2.3	Evaporação da água do solo em sistema de plantio direto.....	6
2.4	Lisímetros.....	9
2.5	Calibração dos lisímetros.....	11
	REFERÊNCIAS	12
	CAPÍTULO 1 – Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem.....	20
	RESUMO	21
	ABSTRACT	22
1	INTRODUÇÃO.....	23
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
2.1	Construção dos lisímetros	25
2.2	Calibração dos lisímetros	28
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS	39
	CAPÍTULO 2 – Evaporação da água do solo em função da quantidade e uniformidade de distribuição de resíduos de culturas na superfície do sol	42
	RESUMO	43
	ABSTRACT	44
1	INTRODUÇÃO.....	45
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
3.1	Experimento 1	51
3.2	Experimento 2	57
4	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO GERAL

A conservação da água no solo é de grande relevância para a produção agrícola, pois contribui para a preservação dos recursos naturais, além de ser uma alternativa para o incremento na produção de alimentos. Assim, existe a necessidade de novas tecnologias e de informações que contribuam para um adequado manejo do solo e da água, aumentando a adoção de sistemas de cultivo conservacionistas, como o sistema de plantio direto (SPD).

A prática de SPD tornou-se muito utilizada no Brasil. Nesse sistema de cultivo, os resíduos de culturas influenciam diretamente nas taxas de evaporação durante o período de pré-semeadura e durante o estágio inicial de desenvolvimento das plantas.

Para mensurar os impactos ambientais, mais especificamente as relações hídricas, necessita-se quantificar o consumo de água pelas culturas, por meio dos componentes hidrológicos, como a umidade do solo e a evapotranspiração. Porém, necessitam-se de testes com medidas realizadas em campo, sob o sistema de cultivo predominante, tais como o SPD.

A maior parte da evaporação do solo ocorre nos estádios inicial e final de desenvolvimento da cultura, devido à pequena fração de solo coberta pelas plantas. À medida que a planta se desenvolve, o processo de transpiração torna-se predominante e o consumo de água das plantas refere-se à água perdida pela transpiração das mesmas.

A determinação das necessidades hídricas das culturas, ou seja, evapotranspiração das culturas (ET_c), é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência (ET_o). A quantificação da ET_c é necessária para efetuar o balanço hídrico do solo e em aplicações que visam a aumentar a eficiência de uso de água pelos cultivos.

A complexidade do processo de ET_c exige a utilização de metodologias empíricas para sua estimativa, o que torna necessário calibrar os lisímetros e avaliar equações regionalmente, obtendo-se, desta forma, resultados com maior precisão.

Os lisímetros são usualmente utilizados para determinação de ET_c ou de ET_o ou, ainda, com superfície descoberta para determinação da evaporação. Esses equipamentos constituem-se reservatórios preenchidos com solo e são, geralmente, instalados no campo com superfície coberta por vegetação ou em pousio e podem ser de tipos, tamanhos e materiais variados. A alta precisão e sensibilidade dos lisímetros dependem de calibração adequada, de preferência *in situ*, nas mesmas condições de operação em que se realizam as medidas experimentais. No procedimento de calibração, faz-se adição e retirada de pesos previamente conhecidos para avaliar a precisão de medida e ocorrência de histerese.

O presente trabalho teve como objetivos: construir lisímetros de barras de pesagem, realizar sua calibração e testes quanto à capacidade de medir variações de armazenamento de água do solo em condições de campo, além de utilizar lisímetros de pesagem para estimar o efeito da quantidade e da distribuição de resíduos de culturas sobre o solo na evaporação da água do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de plantio direto

O sistema de plantio direto (SPD) surgiu, primeiramente, como meio de controlar ou reduzir a erosão do solo (SILVA et al., 2009). Este sistema possui como premissas básicas a manutenção dos resíduos (palha) das espécies antecessoras na superfície do solo e o estabelecimento das culturas mediante mobilização do solo exclusivamente na linha de semeadura (RIBERA; HONS; RICHARDSON, 2004). Assim, no SPD ocorre a substituição dos processos mecânicos adotados em sistema de plantio convencional do solo por processos biológicos, o que proporciona condições adequadas para o estabelecimento, crescimento e produção das plantas (VERHULST et al., 2011; FRANCHINI et al., 2012).

O SPD é um complexo ordenado de práticas agrícolas, interrelacionadas e interdependentes (HARRINGTON; ERENSTEIN, 2005). Esse sistema visa à diversificação de espécies cultivadas, por meio da rotação de culturas (SILVA et al., 2009), que atuam positivamente no aproveitamento dos nutrientes do solo (BALDÉ et al., 2011; RESTOVICH; ANDRIULO; PORTELA, 2012), como também nas características físicas do solo (RALISCH et al., 2008; CAVALIERI et al., 2009; VASCONCELOS et al., 2010), na diversificação da matéria orgânica adicionada ao sistema (BHATTACHARYYA et al., 2009) e no controle do processo de erosão (LAL, 2007; TRIPLETT JÚNIOR; DICK, 2008).

Um bom entendimento da dinâmica associada ao SPD é resultante do conhecimento em outras áreas, como o manejo das culturas (ADL; COLEMAN; READ, 2005), o controle fitossanitário (TRENTO; IRGANG; REIS, 2002; SWANTON et al., 2006) e as variáveis agrometeorológicas (CHEN et al., 2007; BIZARI et al., 2009).

O SPD influencia diretamente na manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo, devido ao revolvimento mínimo do solo que contribui para a redução nas perdas por erosão (LAL, 2007; TRIPLETT JÚNIOR; DICK, 2008), na diminuição do escoamento superficial (CASTRO; COGO; VOLK, 2006), na elevação da taxa de infiltração (ALVES SOBRINHO et al., 2003) e na redução da amplitude térmica do solo (TORRES et al., 2006), além de reter maior quantidade de água no solo (FREITAS et al., 2004), uma vez que os resíduos culturais na superfície do solo formam uma barreira física entre a atmosfera e o solo (STONE et al., 2006; SOUZA et al., 2008).

A participação da matéria orgânica adicionada à superfície do solo contribuiu para melhor estruturação física (ZHANG et al., 2007), química (HUNGRIA et al., 2009) e biológica do solo (BABUJIA et al., 2010; SILVA et al., 2010). A matéria orgânica aumenta capacidade retenção água do solo, mediante ao aumento na formação de agregados pelas substâncias húmicas (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010), aumentando a capacidade de hidratação e de retenção de água pelo solo (MODEL; LEVIEN; FROSI, 1995).

A matéria orgânica fresca, além de colaborar na estrutura física do solo, possui a capacidade de retenção de água em torno de 80% do seu peso e, à medida que vai sendo humificada, essa capacidade se eleva para valores médios de 160%. Quando bem humificada, a matéria orgânica, rica em colóides, como as turfas e os solos orgânicos, podem ter de 300 a 400% de capacidade de retenção, enquanto que as substâncias húmicas puras podem alcançar de 600 a 800% de capacidade de reter água, ou seja, de 6 a 8 vezes o seu peso (KIEHL, 1985).

Dessa forma, fica evidente a necessidade e a importância dos resíduos vegetais no balanço de energia e no fluxo de vapor d'água na superfície do solo, que afeta diretamente a evaporação.

2.2 Conservação do solo em sistema de plantio direto

A conservação do solo e da água está relacionada com a proteção da superfície do solo (SOUZA et al., 2008). Os resíduos vegetais presentes na superfície do solo atenuam o impacto das gotas de chuva, protegendo-o contra a compactação (CASTRO; COGO; VOLK, 2006; CASTRO et al., 2011), reduzindo a quantidade e a velocidade do escoamento, em razão do aumento do tempo e da capacidade de infiltração da água no solo (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003; SANTOS; MONTENEGRO; SILVA, 2011), dissipando a radiação solar que incide diretamente no solo, proporcionando redução na evaporação da água (NOVAK; CHEN; HARES, 2000), bem como atuando no regime hídrico e térmico do solo (TORRES et al., 2006).

Os resíduos culturais possibilitam melhores condições de conservação de umidade para o crescimento e o desenvolvimento das culturas, pois amenizam os efeitos adversos decorrentes da falta de chuva (DERPSCH et al., 1990; FREITAS et al., 2004). Portanto, a presença de resíduos culturais na superfície do solo provoca modificações, no ambiente do solo, que afeta o balanço hídrico das culturas (CHEN et al., 2007; BIZARI et al., 2009).

A degradação do resíduo cultural é dependente da cultura e do manejo utilizado, da região de cultivo, da temperatura, da umidade, das condições climáticas, da aeração, das

atividades macro e microbiológica do solo, da composição química do resíduo cultural e do tempo que estes resíduos permaneceram sob a superfície do solo (OLIVEIRA; CARVALHO; MORAES, 2002; PRIMAVERSI; PRIMAVERSI; ARMELIN, 2002).

A cobertura da palha (resíduos remanescentes no solo) tem grande importância a respeito da condição básica para o sucesso do SPD, e, também, como modificador dos fluxos hídricos no sistema resíduo de cultura-solo-planta-atmosfera, uma vez que minimiza a evaporação e reduz a evapotranspiração da cultura (CASTRO; COGO; VOLK, 2006; TORRES et al., 2006; CHEN et al., 2007; BIZARI et al., 2009; CASTRO et al., 2011; SANTOS; MONTENEGRO; SILVA, 2011). Para o sucesso do SPD, um fator muito importante é o aporte da cobertura vegetal, pois culturas que produzem grande produção de fitomassa de relação C/N alta colaboram para uma maior cobertura do solo, tanto em quantidade como em tempo de permanência na superfície (CARVALHO et al., 2008).

A quantidade de resíduo adequada promove maior retenção de água no solo, o que a torna disponível para as plantas por um período maior. Isto ameniza os efeitos da estiagem, uma vez que ocorrem menores perdas de água do solo, pelo efeito da diminuição da evaporação (DERPSCH et al., 1990).

Na implantação e condução do SPD, é indispensável que o esquema de rotação de culturas promova, na superfície do solo, a manutenção permanente de uma quantidade mínima de resíduo cultural, que deve ser maior que 4 t ha⁻¹ de fitomassa seca. A cultura do trigo pode contribuir com 8 a 11 t ha⁻¹ (HEINEMANN et al., 2006) e a de soja de 3,5 a 5,5 t ha⁻¹ (CONTE et al., 2009). Esses valores médios dependem de muitos fatores genéticos, edáficos, climáticos e das práticas culturais adotadas.

As gramíneas, como o milho, podem produzir grandes quantidades de restos culturais. Em condições de alta quantidade de resíduos de culturas há maior dificuldade no estabelecimento da densidade de plantio desejada, ocasionada pela elevada umidade do solo (SILVA et al., 2006).

A distribuição irregular de resíduos na superfície do terreno pode contribuir para a redução da densidade de semeadura devido à emergência desuniforme das plântulas, que pode ocasionar atrasos no crescimento inicial e na maturidade fisiológica das mesmas. Além disso, a uniformidade de distribuição dos resíduos culturais na superfície do solo facilita a semeadura mecânica das culturas (KUNZ et al., 2008).

Caso a distribuição do resíduo seja desuniforme, pode ocorrer o efeito de redução ou mesmo o aumento da evaporação da água da superfície do solo, de forma que a cultura poderá ser direta ou indiretamente afetada (HECKLER; SALTON, 2002). Portanto, a eficiência da

cobertura morta na redução dos estresses térmicos e hídricos dependem da quantidade de resíduos (FREITAS et al., 2004) e da sua uniformidade de distribuição (JI; UNGER, 2001).

2.3 Evaporação da água do solo em sistema de plantio direto

A evaporação da água é o processo de mudança da fase líquida para a fase gasosa e ocorre tanto em uma massa contínua (rio, lago e represa), como numa superfície úmida (solo) (SOARES et al., 2001), utilizando, como fonte de energia externa, a radiação solar (CAMARGO; CAMARGO, 2000; SCOPEL et al., 2004). O processo é condicionado pela temperatura e déficit de saturação do ar e pela velocidade do vento junto à superfície (LYRA et al., 2004). Por esta razão, o conjunto desses parâmetros climatológicos deve ser considerado quando se avalia a evaporação da água do solo (ALLEN et al., 2005).

De acordo com González e Alves (2005), a evaporação da água do solo é um fenômeno de superfície que depende das propriedades físicas da matéria umedecida, e é altamente limitado pela energia que incide à mesma (CAMARGO; CAMARGO, 2000), desde que não exista outro fator restritivo ao fluxo hídrico (STONE; MOREIRA, 2000), como resíduo cultural na superfície do solo.

A evaporação é a principal responsável pelas perdas da água do solo na fase inicial de desenvolvimento de uma cultura. À medida que as plantas se desenvolvem e aumentam sua área foliar, a evaporação direta reduz-se e a transpiração aumenta. Assim, a soma da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas é determinada de evapotranspiração, que pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície com vegetação, durante determinado período (BERNARDO; MANTOVANI; SOARES, 2006).

O modelo de Ritchie (1972) considera as fases de evaporação da água do solo conforme descritas por Philip (1957) e comprovadas, posteriormente, por Idso et al. (1974). Considerando um perfil de solo úmido, durante a fase 1 a evaporação processa-se na taxa potencial determinada pela energia disponível na superfície do solo. Na fase 2 a evaporação é limitada pela capacidade de fluxo de água para a superfície, a partir das camadas inferiores do solo. De forma que, durante a fase 1 a superfície do solo se mantém úmida sendo caracterizada por evaporação relativamente elevada e controlada pelas condições atmosféricas. A fase 2 inicia-se a partir do instante em que a água do solo não pode mais ser transmitida à superfície dele em velocidade suficiente para satisfazer a demanda atmosférica. Nesta fase, a superfície do solo encontra parcialmente seca, sendo a evaporação alimentada

pelos fluxos ascendentes de água do solo, influenciada pelo transporte de calor para o perfil do solo. Na fase 2 a evaporação da água do solo decresce à medida que a umidade do solo diminui, podendo assumir-se, como proporcional, a razão entre a quantidade de água remanescente na camada de solo, que produz a evaporação, e o total, que pode ser evaporado durante esta segunda fase. A terceira fase tem sido caracterizada por uma taxa de evaporação reduzida e constante (IDSO et al., 1974).

A quantificação do processo de evapotranspiração sob condições de disponibilidade hídrica adequada no solo define a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para manejo e o planejamento da irrigação (SEDIYAMA, 1996).

A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada pelo produto entre evapotranspiração de referência (ET_o), que corresponde à demanda evaporativa da atmosfera, e o coeficiente de cultura (K_c), que varia, predominantemente, de acordo com as características específicas de cada cultura, com o estágio fenológico, com a umidade do solo.

O K_c representa basicamente a fração da evapotranspiração presente na evapotranspiração de referência e constitui uma integração dos efeitos das principais características que distinguem as culturas hipotéticas de referência (grama ou alfafa), que são altura, albedo, resistência estomática e a evaporação do solo (ALLEN et al., 1998).

Os resíduos culturais modificam as características aerodinâmicas da camada limite próximo ao solo (SHEWN; TANNER, 1990). Por outro lado, o preparo do solo afeta diretamente a sua desagregação, incorporação e a manutenção dos restos vegetais na superfície (LAL; REICOSKY; HANSON, 2007; RAZAFIMBELO et al., 2008; FUENTES et al., 2009).

Em trabalhos desenvolvidos por Dahiya, Ingwersen e Streck (2007) e Stone e Moreira (2000), foram relatados que a presença de resíduos culturais na superfície do solo reduziu as perdas de água por evaporação, em comparação com os tratamentos sem palha, nos quais apesar de interceptar a água e perde-la em seguida para a atmosfera (SCOPEL et al., 2005), proporcionaram uma redução de até 20%, quando utilizou-se 100% de cobertura vegetal (FREITAS et al., 2004).

Andrade et al. (2002), pesquisando o efeito de níveis de cobertura de solo com resíduo da cultura do sorgo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro utilizando 0, 25, 50, 75 e 100% de resíduo, observaram que, aos 41 dias após a emergência, as relações entre a evapotranspiração da cultura do feijoeiro e a evapotranspiração de referência foram de 1,25,

1,24, 1,15, 1,12 e 1,01, o que possibilitou, de acordo com Pereira, Moreira e Klar (2002), economia de água a partir do nível de 50% de cobertura, pela diminuição das quantidades de rega na cultura.

Apesar de alguns autores relatarem o efeito do resíduo cultural na redução de perda de água por evaporação na superfície do solo (DAHIYA; INGWERSEN; STRECK, 2007; DALMAGO et al., 2009), estas inferências nem sempre são corretas, pois as avaliações da umidade do solo baseiam-se em medições diretas ou indiretas. Existem vários métodos de estimativa da ETo, sendo alguns com aceitação quase que unânime, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados (PEREIRA; ALLEN, 1997).

Dentre os métodos diretos, o gravimétrico é o mais utilizado, consistindo em amostrar o solo e, por meio de pesagens, determinar a sua umidade gravimétrica, enquanto os métodos indiretos baseiam-se em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo (HILLEL, 1973). Dentre os métodos diretos para a determinação da evapotranspiração, está a lisimetria, particularmente a de pesagem (MENDONÇA et al., 2003).

O armazenamento de água no solo disponível para determinada cultura em uma determinada época pode ser medido direta ou indiretamente pela umidade do solo ou ser estimado por meio de modelos que relacionam as propriedades físico-hídricas do solo com os componentes de entrada e saída de água no solo. O método de balanço hídrico mais conhecido foi proposto por Thornthwaite (1948) e, posteriormente, modificado e conhecido como Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather (1955).

De acordo com as condições do terreno e do solo, a água pode também entrar no volume ou dele sair lateralmente, abaixo da superfície do solo por deflúvio subsuperficial. Se a quantidade de água que entra no período de tempo considerado for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo. Tanto o saldo positivo como o negativo, pode ser medido pela variação da armazenagem de água no perfil do solo no período considerado (LIBARDI, 2005).

O balanço hídrico para a determinação da evapotranspiração, segundo Allen et al. (1998) e Howell (2004), é realizado por meio da técnica da lisimetria, medindo-se as variações do armazenamento da água no solo na zona explorada pelas raízes da planta em função da quantidade de água que entra e que sai do perfil (LOSS; GAYLER; PRIESACK, 2007; PUPPO; GARCÍA-PETILLO, 2010).

A complexidade dos processos envolvidos na evapotranspiração de cultivos exige a utilização de metodologias empíricas para sua estimativa. Assim, para se obterem resultados

precisos, torna-se necessário calibrar os lisímetros e avaliar as equações em cada local. Esses métodos geralmente requerem instrumentos sofisticados e mão de obra especializada que oneram os custos (ALLEN et al.,1998). Uma alternativa tem sido a utilização de medidas diretas para a obtenção da evapotranspiração, por meio de lisímetros.

2.4 Lisímetros

O lisímetro de pesagem é um equipamento composto por uma caixa com paredes impermeáveis, preenchido por solo, instalado no campo sob cultivo ou em pousio, realizando medidas de variação de massa com células de carga (YANG; LI; LIU, 2000; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Para Bernardo, Mantovani e Soares (2006), o método do lisímetro de pesagem permite calcular os coeficiente de correção, sendo considerado o instrumento padrão para a determinação da evapotranspiração de referência, uma vez que as medidas são realizadas em campo, resultando na forma mais apropriada de se testar modelos (ALLEN et al., 1998). Estes equipamentos possibilitam medidas automatizadas de evapotranspiração em espaço de tempo variável, chegando a intervalos de 10 minutos ou até menos (HOWELL; McCORMICK; PHENE, 1985; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; CARVALHO et al., 2007).

Conforme Howell, Schneider e Jensen (1991), os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração podem ser agrupados em três categorias, a saber: (1) com lençol freático de nível constante; (2) com drenagem livre; e (3) lisímetros de pesagem.

Dentre as categorias, os lisímetros de pesagem são os mais confiáveis devido à precisão de medida do equipamento que proporciona maior confiabilidade nos resultados. Porém, para operá-los e para analisar os dados coletados, necessita-se de pessoal especializado (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

Apesar da eficácia, as medições de evapotranspiração pela técnica da lisimetria podem ser afetadas por fatores ambientais, tais como o efeito de advecção, regime de umidade do solo no seu interior e diferenças de altura e densidade da vegetação dentro e fora do lisímetro (CAMPECHE et al., 2011), uma vez que as diferenças no crescimento das culturas no interior dos lisímetros, em relação à área externa, provocam uma perturbação maior no movimento horizontal do ar, o que acentua o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura implantada, provocando um aumento da transpiração da cultura e maior interceptação da radiação solar incidente (SEDIYAMA, 1996).

As dimensões dos lisímetros de pesagem, caracterizadas pela espessura das paredes, a distância entre elas e a altura de suas bordas, variam em função da intenção de uso e da resolução requerida do equipamento (PAYERO; IRMAK, 2008). Dessa forma, ao se construir um lisímetro, são necessários alguns cuidados para reduzir os efeitos negativos do fator de projeto, tais como utilizar paredes com menor espessura possível, assim como reduzir ao máximo a abertura existente entre as paredes interna e externa (HOWELL; McCORMICK; PHENE, 1985), de forma que o lisímetro encontre-se imperceptível visualmente no local instalado (SEDIYAMA, 1996).

Para Campeche et al. (2011), os equipamentos com área menor que 2 m² são facilmente utilizados em pesquisas de evapotranspiração, pois, além de serem mais facilmente construídos, possuem custos reduzidos. De acordo com Pereira et al. (2002), os lisímetros de pesagem se justificam apenas em condições experimentais, pois trata-se de um método trabalhoso e caro, o que inviabiliza sua utilização para o simples manejo de irrigação em pequenas propriedades rurais.

A técnica da lisimetria é de grande valia para a pesquisa, principalmente quando a instalação é realizada de forma adequada (LOSS; GAYLER; PRIESACK, 2007), e se as camadas de solo que preenchem o seu interior se assemelham o máximo possível das camadas de solo da área externa (YANG; LI; LIU, 2000).

Lisímetros do tipo dos desenvolvidos por Faria, Campeche e Chibana (2006) apresentaram-se precisos para detectar mudanças de massa de 0,1 mm, em intervalos iguais ou menores que 1h, o que é adequado para a maioria das aplicações de campo. A separação da evapotranspiração em transpiração e evaporação pode ser realizada pela combinação de microlisímetros com lisímetros de pesagem, em que a evaporação é determinada no primeiro equipamento; a evapotranspiração, no segundo; e a transpiração é determinada através da diferença entre a evapotranspiração e evaporação (FLUMIGNAN; FARIA; LENA, 2012).

Um dos passos mais importantes após a construção de um lisímetro no campo é a calibração. Esse procedimento tem a finalidade de estabelecer a relação entre o sinal de saída da célula de carga e a massa do sistema, visando verificar a linearidade e histerese das células de carga. É recomendado que os lisímetros sejam preferencialmente calibrados *in situ*, ou seja, nas mesmas condições do seu funcionamento em campo, por adição e retirada de pesos previamente conhecidos (CAMPECHE et al., 2011).

2.5 Calibração dos lisímetros

A qualidade principal de um instrumento é a de realizar medidas com erros reduzidos, uma vez que esses sempre os apresentarão, e quando caracterizados, resultam em uma medição mais segura (WHEELER; GANJI, 1996).

A calibração é uma ferramenta básica que visa a assegurar a confiabilidade de um instrumento de medição, garantindo a qualidade da fabricação de um determinado produto. A calibração de lisímetros é uma prática importante, pois calibrações realizadas inadequadamente ocasionam interpretações inconsistentes de valores de evapotranspiração, principalmente quando medidos em curtos períodos de tempo (CAMPECHE et al., 2011).

O procedimento de calibração visa a estabelecer relação entre o sinal elétrico de saída da célula de carga e a massa do sistema, assim como verificar a linearidade e a histerese do sistema de pesagem (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). Por esta razão, deve-se calibrar cada lisímetro instalado, obtendo-se equações próprias, pois podem ocorrer variações decorrentes das características específicas dos extensômetros elétricos de cada célula de carga, e do peso morto do lisímetro em estudo (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Na literatura existem diversos relatos da precisão das medidas obtidas por lisímetros, obtidos através da pesagem de massas-padrões adicionadas e retiradas do sistema durante a calibração (CAMPECHE et al., 2011; NASCIMENTO et al., 2011). Nesses estudos, os desvios variaram de 0,07 a 0,42 mm, e ocorreram respostas lineares entre as massas-padrões e leituras das células de carga, com coeficientes de determinação acima de 0,99, que comprovam a acuracidade do sistema.

A precisão dos lisímetros pode ser influenciada pelo posicionamento das células de carga no sistema, pois quando são instaladas mais próximas da superfície do solo pode ocorrer instabilidade no sinal elétrico devido à variação de temperatura, afetando diretamente os valores horários de evapotranspiração (ALLEN; FISCHER, 1991).

REFERÊNCIAS

- ADL, S. M.; COLEMAN, D. C.; READ, F. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 114, no. 2-4, p. 323-334, 2005.
- ALLEN, R. G.; FISCHER, D. K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTERS, I. A.; JENSEN, M. E. (Eds.). **Proceedings of the International Symposium on Lysimetry: Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 114-124.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, no. 1, p. 2-13, 2005.
- ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.
- ANDRADE, R. S.; MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; CARVALHO, J. A. Consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto, em função da porcentagem de cobertura morta do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 35-38, 2002.
- BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 42, no. 12, p. 2174-2181, 2010.
- BALDÉ, A. B.; SCOPEL, E.; AFFHOLDER, F.; CORBEELS, M.; SILVA, F. A. M.; XAVIER, J. H. V.; WERY, J. Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, no. 2, p. 240-251, 2011.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C. H.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 611 p.
- BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; SRIVASTVA, A. K.; GUPTA, H. S. Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas under different tillage and crop regimes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 132, no. 1-2, p. 126-134, 2009.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; ROQUE, M. W.; SOUZA, A. L. Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2073-2079, 2009.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; SOUSA JÚNIOR, J. G. A.; VIVALDI, L. J. Decomposição de resíduos vegetais em Latossolo sob cultivo de milho e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, número especial, p. 2831-2838, 2008.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 339-352, 2006.

CASTRO, N. E. A.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CARVALHO, G. J.; MARQUES, R. M.; GONTIJO NETO, G. F. Plantas de cobertura no controle da erosão hídrica sob chuvas naturais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 5, p. 775-785, 2011.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, no. 1, p. 158-164, 2009.

CHEN, L.; HUANG, Z.; GONG, J.; FU, B.; HUANG, Y. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. **Catena**, Amsterdam, v. 70, no. 2, p. 200-208, 2007.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por método de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; XAVIER, A. A. P.; DEBIASI, H. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n.10, p.1254-1261, 2009.

DAHIYA, R.; INGWERSEN, J.; STRECK, T. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loss soil: experimental findings and modeling. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, no. 1-2, p. 52-63, 2007.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 10, p. 855-864, 2009.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: GTZ; Londrina: Iapar, 1990. 268 p.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T.; LENA, B. P. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 80-90, 2012.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, no. 1, p. 178-185, 2012.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 85-91, 2004.

FUENTES, M.; GOVAERTS, B.; LEÓN, F.; HIDALGO, C.; DENDOOVEN, L.; SAYRE, K. D.; ETCHEVERS, J. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 30, no. 3, p. 228-237, 2009.

GONZÁLEZ, A. P.; ALVES, M. C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície em um Cambissolo Gleico de Lugo, Espanha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 45-50, 2005.

HARRINGTON, L.; ERENSTEIN, O. Conservation agriculture and resource conserving technologies – a global perspective. **Agromeridian**, New York, v. 1, no. 1, p. 32-43, 2005.

HECKLER, J. C.; SALTON, J.C. **Palha**: fundamento do sistema plantio direto. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 26 p.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigodecorrente da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 352-356, 2006.

HILLEL, D. **Soil and water**: physical principles and processes. 3. ed. New York: Academic Press, 1973. 288 p.

HOWELL, T. A. Lysimetry. In: HILLEL, D. (Ed.). **Encyclopedia of soils in the environment**. Oxford: Elsevier, 2004. p. 379-386.

HOWELL, T. A.; McCORMICK, R. L.; PHENE, C. J. Design and installation of large weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, no. 117, p. 106-112, 1985.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTERS, I. A.; JENSEN, M. E. (Eds.). **Proceedings of the International Symposium on Lysimetry: Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-19.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO JÚNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 42, no. 3, p. 288-296, 2009.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; JACKSON, R. D.; KIMBALL, B. A.; NAKAYAMA, F. S. The three stages of drying of a field soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 38, n. 5, p. 831-837, 1974.

Jl, S.; UNGER, P. W. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 65, no. 2, p. 442-448, 2001.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KUNZ, V. L.; FILHO, A. G.; PRIMO, M. A.; GURGACZ, F.; FEY, E. Distribuição de palha por colhedoras autopropelidas na colheita da soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 125-135, 2008.

LAL, R. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, no. 1, p. 1-3, 2007.

LAL, R.; REICOSKY, D. C.; HANSON, J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, no. 1, p. 1-12, 2007.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2005. 329 p.

LOSS, C.; GAYLER, S.; PRIESACK, E. Assessment of water balance simulations for large-scale weighing lysimeters. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 335, no. 3-4, p. 259-270, 2007.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MODEL, N. S.; LEVIEN, R.; FROSI, R. A. Água armazenada e temperatura do solo em oito sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 41-49, 1995.

NASCIMENTO, E. F.; CAMPECHE, L. F. S. M.; BASSOI, L. H.; SILVA, J. A.; LIMA, A. C. M.; PEREIRA, F. A. C. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. Syrah. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 271-287, 2011.

NOVAK, M.; CHEN, W.; HARES, M. Simulating the radiation distribution within a barley straw mulch. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 102, no. 2-3, p. 173-186, 2000.

OLIVEIRA, T. K.; CARVALHO, G. J.; MORAES, R. N. S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 8, p. 1079-1087, 2002.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 26, no. 2, p. 191-202, 2008.

PEREIRA, A. L.; MOREIRA, J. A. A.; KLAR, A. E. Efeito de níveis de cobertura do solo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 42-52, 2002.

PEREIRA, A. R.; SANTIAGO, A. V.; MAGGIOTO, S. R.; FOLEGATTI, M. V. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 51-56, 2002.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpiração)**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1997. 183 p.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Novas aproximações aos coeficientes de culturais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n. 4, p.118-143, 1997.

PHILIP, J. R. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. **Journal of Meteorology**, Wiltshire, v. 14, no. 4, p. 354-336, 1957.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C.; ARMELIN, M. J. A. Qualidade mineral e degradabilidade potencial de adubos verdes conduzidos sobre Latossolos, na região tropical de São Carlos, SP, Brasil. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 77, n. 1, p. 89-103, 2002.

PUPPO, L.; GARCÍA-PETILLO, M. Determinacion del consumo de agua del duraznero por lisimetría. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 25-31, 2010.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 381-384, 2008.

RAZAFIMBELO, T. M.; ALBRECHT, A.; OLIVER, R.; CHEVALLIER, T.; CHAPUIS-LARDY, L.; FELLER, C. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, no. 2, p. 140-149, 2008.

RESTOVICH, S. B.; ANDRIULO, A. E.; PORTELA, S. I. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: effect on nitrogen and water dynamics. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 128, no. 1, p. 62-70, 2012.

RIBERA, L. A.; HONS, F. M.; RICHARDSON, J. W. An economic comparison between conventional and no-tillage farming systems in Burleson County, Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, no. 2, p. 415-424, 2004.

RITCHIE, J. T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resource Research**, Canberra, v. 8, no. 5, p. 1204-1213, 1972.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

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

SCOPEL, E.; SILVA, F. A. M.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F.; MARAUX, F. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. **Agronomie**, Avignon, v. 24, no. 6-7, p. 383-395, 2004.

SCOPEL, E.; DOUZET, J. M.; SILVA, F. A. M.; CARDOSON, A.; FINDELING, A.; BERNOUX, M. Impactos do sistema de plantio direto com cobertura vegetal (SPDCV) sobre a dinâmica da água, do nitrogênio mineral e do carbono do solo do Cerrado brasileiro. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 22, n. 1, p. 169-183, 2005.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.

SHEWN, Y.; TANNER, C. B. Radiative and conductive transport of heat through flail-chopped corn residue. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, no. 3, p. 653-658, 1990.

SILVA, A. A.; GALON, L.; FERREIRA, F. A.; TIRONI, S. P.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. F.; ASPIAZÚ, I.; AGNES, E. L. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 4, p. 496-506, 2009.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under various soil and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 119, no. 1, p. 20-26, 2010.

SILVA, F. A. M.; PINTO, H. S.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e soja utilizadas em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 717-724, 2006.

SOARES, W. R.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. N. Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimento ($K_{c_{ini}}$) à lâmina de irrigação e textura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 23-27, 2001.

SOUZA, K. B.; PEDROTTI, A.; RESENDE, S. C.; SANTOS, H. M. T.; MENEZES, M. M. G.; SANTOS, L. A. M. Importância de novas espécies de plantas de cobertura do solo para os tabuleiros costeiros. **Revista da FAPES**, Aracaju, v. 4, n. 2, p. 131-140, 2008.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso de água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 4, p. 835-841, 2000.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

SWANTON, C. J.; CLEMENTS, D. R.; SHRESTHA, A.; BOOTH, B. D.; CHANDLER, K. Management in a modified no-tillage corn-soybean-wheat rotation influences weed population and community dynamics. **Weed Science**, Champaign, v. 54, no. 1, p. 47-58, 2006.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, no. 1, p.55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I. Influência de plantas de cobertura na temperatura e umidade do solo na rotação milho-soja em plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 1, p. 107-113, 2006.

TRENTO, S. M.; IRGANG, H. R. H.; REIS, E. M. Efeito da rotação de culturas, da monocultura e da densidade de plantas na incidência de grãos ardidos em milho. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, n. 6, p. 609-613, 2002.

TRIPLETT JÚNIOR, G. B.; DICK, W. A. No-tillage crop production: a revolution in agriculture! **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, no. 3, p. 153-165, 2008.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S.; COSTA, Y. D. J.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 309-316, 2010.

VERHULST, N.; GOVAERTS, B.; NELISSEN, V.; SAYRE, K.D.; CROSSA, J.; RAES, D.; DECKERS, J. The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, no. 1, p. 58-67, 2011.

WHEELER, A. J.; GANJI, A. R. **Introduction to engineering experimentation**. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 415 p.

YANG, J.; LI, B.; LIU, S. A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soil-water-groundwater exchange studies. **Hydrological Processes**, New York, v. 14, no. 10, p. 1887-1897, 2000.

ZHANG, G. S.; CHAN, K. Y.; OATES, A.; HEENAN, D. P.; HUANG, G. B. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, no. 1-2, p. 122-128, 2007.

CAPÍTULO 1

Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem

RESUMO

Nos lisímetros tradicionais, os sistemas de pesagem geralmente incluem uma célula de carga acoplada a uma balança com alavancas de redução de massa. O preço dessas balanças, associado à grande oferta atual de componentes eletrônicos de coleta de dados de baixo custo, viabilizam a construção de novos equipamentos constituídos de barras de pesagem com até quatro células de carga por lisímetro. Esse trabalho teve como objetivos construir e calibrar quatro lisímetros constituídos de tanques duplos retangulares, de 1,35 m² de superfície e 1,5 m de profundidade, apoiados sobre duas barras. Cada barra continha duas células de carga de alta precisão, ligadas por cabo coaxial a uma caixa de junção e depois a um sistema de aquisição de dados. A calibração de cada lisímetro foi realizada após a instalação dos equipamentos no campo, resultando em ajuste linear ($R^2 > 0,9999$) resultante da relação entre o impulso elétrico (mV) e massa (kg). A linearidade entre massa e impulso elétrico foi satisfatória para os equipamentos avaliados, havendo baixa ou quase nenhuma histerese. O erro absoluto médio foi de 0,0245 e 0,2844 equivalente-mm. O índice de Wilmott, dentre os valores observados e estimados ($d = 0,9997$), indicam a alta exatidão das medidas do equipamento construído. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que os lisímetros construídos são apropriados para estimativas dos componentes do balanço hídrico, tais como evapotranspiração e armazenamento de água no solo. Os lisímetros construídos possuem sensibilidade à variação de massa equivalente à lâmina de 0,15 mm.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Balanço hídrico. Água no solo.

ABSTRACT

In the standard lysimeters, the weighing system generally include a load cell attached in a weighing-machine with levers of mass decrease. The price of this weighing-machine, combined with the high offer current of electronics parts of data collection of low cost, makes viable the build of new equipment consisting of weighing bars until four load cells for each lysimeters. This work had as objectives to present constructand calibration of four weighting lysimeters built by two rectangular tanks of 1.35 m² surface and 1.5 depth, loaded on two weighting bars. Each bar had two loading cells of high precision, connected to a junction box by a coaxial cable and then to a datalogger. The calibration of each lysimeter was performed after field installation. The result showed linear response ($R^2 > 0.9997$) resulting from the relationship between electric pulse (mV) and mass (kg). The linearity between mass and electrical impulse was satisfactory for equipment assessed, when low or almost no hysteresis. Mean absolute error was 0.0245 and 0.2844 equivalent-mm. The Wilmott index between observed and estimated data ($d = 0,9999$) indicate a high precision of the new equipment. Based on the researchs obtained, conclude that the lysimeters built are re suitable for estimates of water balance components such as evapotranspiration and water storage in the soil. The lysimeters constructed to have varying sensitivity equivalent mass of the blade 0,15 mm.

Keywords: Evapotranspiration. Water balance. Soil water.

1 INTRODUÇÃO

A complexidade e a dificuldade para a determinação em campo da evapotranspiração têm sido contornadas com o avanço tecnológico de equipamentos eletrônicos de coleta de dados, que monitoram de forma direta ou indireta os diferentes processos envolvidos. As medidas diretas proporcionam maior confiabilidade e, usualmente, são realizadas por lisímetros (SILVA; CAMPOS; AZEVEDO, 2009).

O uso de lisímetros de pesagem em diferentes estudos de consumo de água pelas culturas, seja na determinação da evapotranspiração, seja no processo de calibração de modelos agrometeorológicos de estimativa, é considerado essencial para obtenção de resultados confiáveis (SILVA ; FOLEGATTI; MAGIOTTP, 1999; CAMPECHE, 2002). Para Silva (2003), quando bem instalados, os lisímetros possibilitam medidas precisas de evapotranspiração, principalmente se as camadas de solo que preencherão o seu interior assemelham-se o máximo possível às camadas de solo da área externa.

O lisímetro de pesagem é um equipamento composto por uma caixa com paredes impermeáveis, preenchida por solo, instalada no campo sob cultivo ou pousio, na qual células de carga realizam medições de variação de massa (VIANA, 2000).

A técnica da lisimetria tem sido utilizada para medir, de maneira precisa, eventos de precipitação, evaporação e drenagem (KIRKHAM; GEE; JONES, 1984; MENDONÇA et al., 2003), por meio da variação da massa de um bloco de solo, devido à entrada ou à saída de água, medida por uma célula de carga, que monitora a dinâmica da água no solo cultivado ou descoberto (CAMPECHE et al., 2011), o que possibilita a obtenção de medidas em escala horária, assim como resultados mais confiáveis (ALLEN et al., 1991).

Nos lisímetros tradicionais, o sistema de pesagem inclui, geralmente, uma célula de carga acoplada a uma balança com alavancas para ampliação da escala utilizada (CAMPECHE, 2002; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). Nos últimos anos, esse tipo de balança teve seu custo elevado em decorrência da elevação na matéria prima e da necessidade de mão de obra especializada para sua construção e instalação.

A indústria eletrônica, contudo, tem oferecido células de carga cada vez mais baratas, o que possibilita a construção de novos sistemas de pesagem de menor custo que os lisímetros tradicionais, através da minimização da estrutura metálica em barras de pesagem (BP). O conjunto de BP é formado por duas barras em aço portáteis e de fácil instalação, que permitem acoplar duas células de carga em cada barra.

Apesar de precisas, as medições de evapotranspiração pela técnica da lisimetria podem ser afetadas por fatores ambientais e de projeto, tais como: o efeito de advecção; as dimensões do lisímetro; o regime de umidade do solo no seu interior; a espessura das paredes do lisímetro e a distância entre elas; a altura de suas bordas e as diferenças de altura e densidade da vegetação dentro e fora do lisímetro (MIRANDA; YODER; SOUSA, 1999; CAMPECHE et al., 2011).

A calibração dos lisímetros é uma prática importante, pois calibrações realizadas inadequadamente ocasionam interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente quando medidos em curtos períodos de tempo (CAMPECHE, 2002). Segundo Faria, Campeche e Chibana (2006), o procedimento de calibração visa a estabelecer relação entre o sinal elétrico de saída da célula de carga e a massa, e também verificar a linearidade e a histerese do sistema de pesagem. O desvio da linearidade, incluindo a histerese, indica o desvio máximo do sinal de saída a partir da reta de referência e é importante, pois a curva característica é presumida em forma de reta.

Este trabalho teve como objetivo construir lisímetros de pesagem, calibrá-los e testá-los quanto à capacidade de medir variações de armazenamento de água do solo em condições de campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Construção dos lisímetros

Quatro lisímetros de pesagem foram construídos e instalados em fossos escavados com paredes retangulares na Fazenda Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), em Londrina, PR. Cada lisímetro constituiu-se de dois tanques retangulares. O tanque interno possuía dimensões de 1,35 m² de superfície (1 m por 1,35 m), 1,5 m de profundidade e paredes de 10 mm em fibra de vidro e resina reforçadas com vigas de aço de 2 mm nas bordas e ao centro (Figura 1).

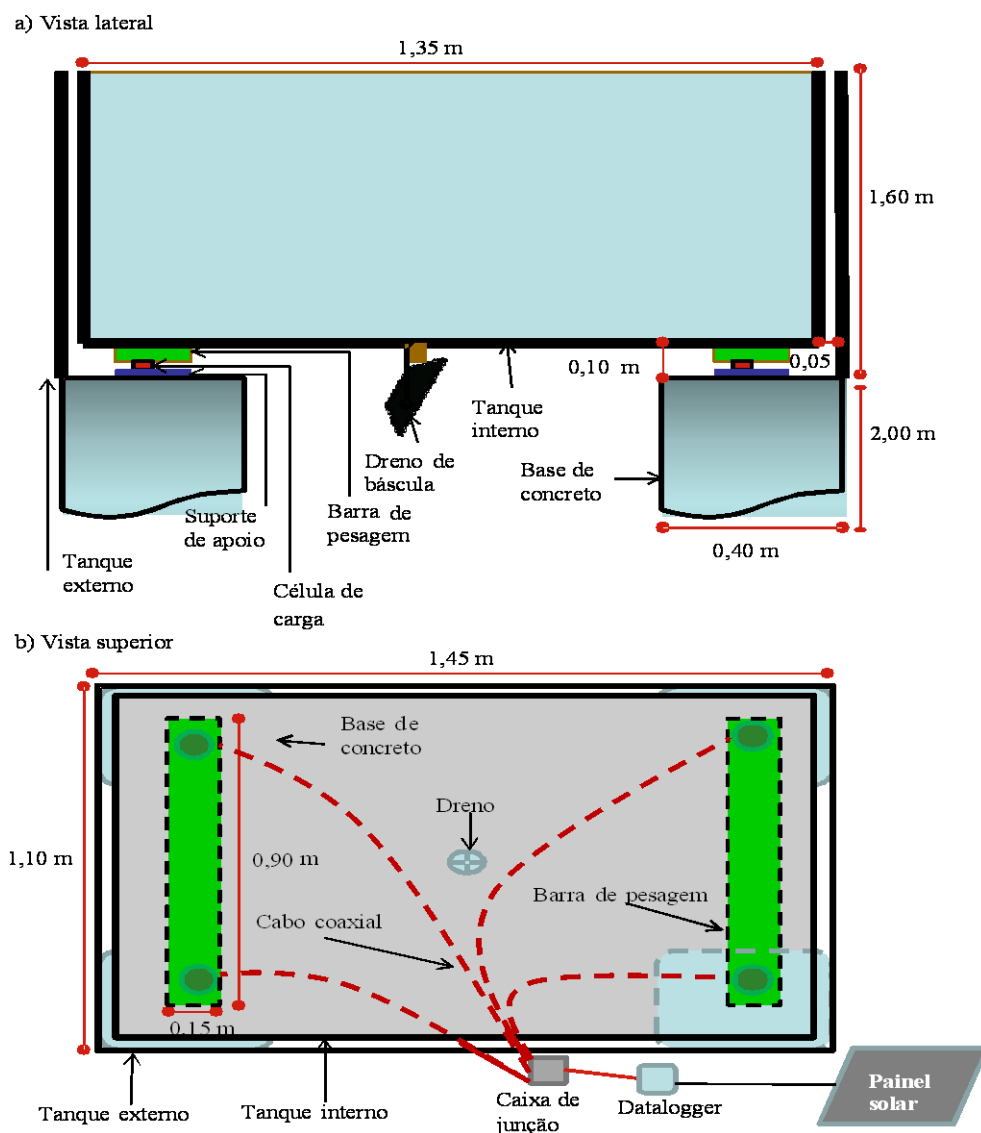


Figura 1. Vista lateral (a) e superior do lisímetro (b) do lisímetros de barra de pesagem.

O tanque externo foi construído com paredes do mesmo material, com dimensões de 1,1 m por 1,45 m de superfície e 1,6 m de profundidade, e separado do tanque interno em 0,05 m. O tanque interno foi apoiado no sentido da menor largura sobre duas barras de pesagem de aço carbono de 5 mm de espessura, em formato U, de 0,15 m de largura por 0,9 m de comprimento. Duas células de carga (modelo Z6FC3/1T, HBM measurement, São Paulo, SP), foram acopladas de um lado por parafusos de aço a 0,1 m das extremidades de cada barra de pesagem, e do outro lado colocaram-se os suportes de apoio de aço (modelo Z6FC4 Z6/1T/ZEL, HBM measurement, São Paulo, SP). As células de carga utilizadas foram do tipo cisalhamento ou Shear Beam com carta de calibração e certificação de funcionamento. Testes preliminares no laboratório com massas conhecidas foram realizados apenas para detectar possíveis erros.

No fundo dos fossos lisimétricos, foram instaladas quatro bases verticais de concreto de 0,4 m de largura e 2 m de comprimento para suportar o sistema de pesagem (Figura 1). Sobre as bases de concreto, foram apoiadas as duas barras de pesagem, que foram niveladas usando calços de lâminas de aço de 1 mm, indicados por medidas de carga em cada célula separadamente. Seguiu-se a instalação do tanque externo e depois do tanque interno e fez-se seu preenchimento. No fundo, colocou-se uma camada de brita de 0,05 m, e depois a mesma espessura de areia, seguida de manta geotêxtil (tipo Bidim) e, por fim, o solo, seguindo a sequência de cinco camadas de 0,30 m, previamente separadas durante a escavação do fosso, procedendo-se uma leve compactação, visando a reproduzir o perfil original do solo.

Em cada lisímetro, instalou-se um dispositivo de drenagem constituído de um tubo de PVC branco e rígido, de 0,05 m de comprimento e 32 mm de diâmetro para canalizar a água acumulada na camada de brita no fundo do tanque interno para um reservatório que se esvazia ao atingir a sua capacidade máxima de armazenamento (Figura 2). Este reservatório, denominado de dreno de báscula, foi construído com um tubo de PVC de cerca de 0,3 m de comprimento e de 100 mm de diâmetro, com o fundo fechado com um tampão do mesmo material e a abertura superior chanfrada em 45°.

O dreno de báscula encontrava-se sustentado por um eixo transpassado em orifícios perfurados paralelamente ao lado chanfrado do dreno de báscula, a cerca de 1/3 acima da sua base (Figura 2a). Esse eixo, construído de um bastão de PVC de 0,01 m de diâmetro e 0,18 m de comprimento, era conectado a dois suportes colocados a cerca de 0,07 m da base de uma estrutura metálica parafusada no fundo do tanque interno, construída em forma de um quadro com hastes de 0,2 m de comprimento, 0,04 m de largura e 0,005 m de espessura. Com o intuito de assegurar o enchimento completo do reservatório antes de ocorrer a basculação

(Figura 2b, 2c), foram colados no fundo do reservatório anéis metálicos para resistir à mudança do movimento até o momento da basculação.

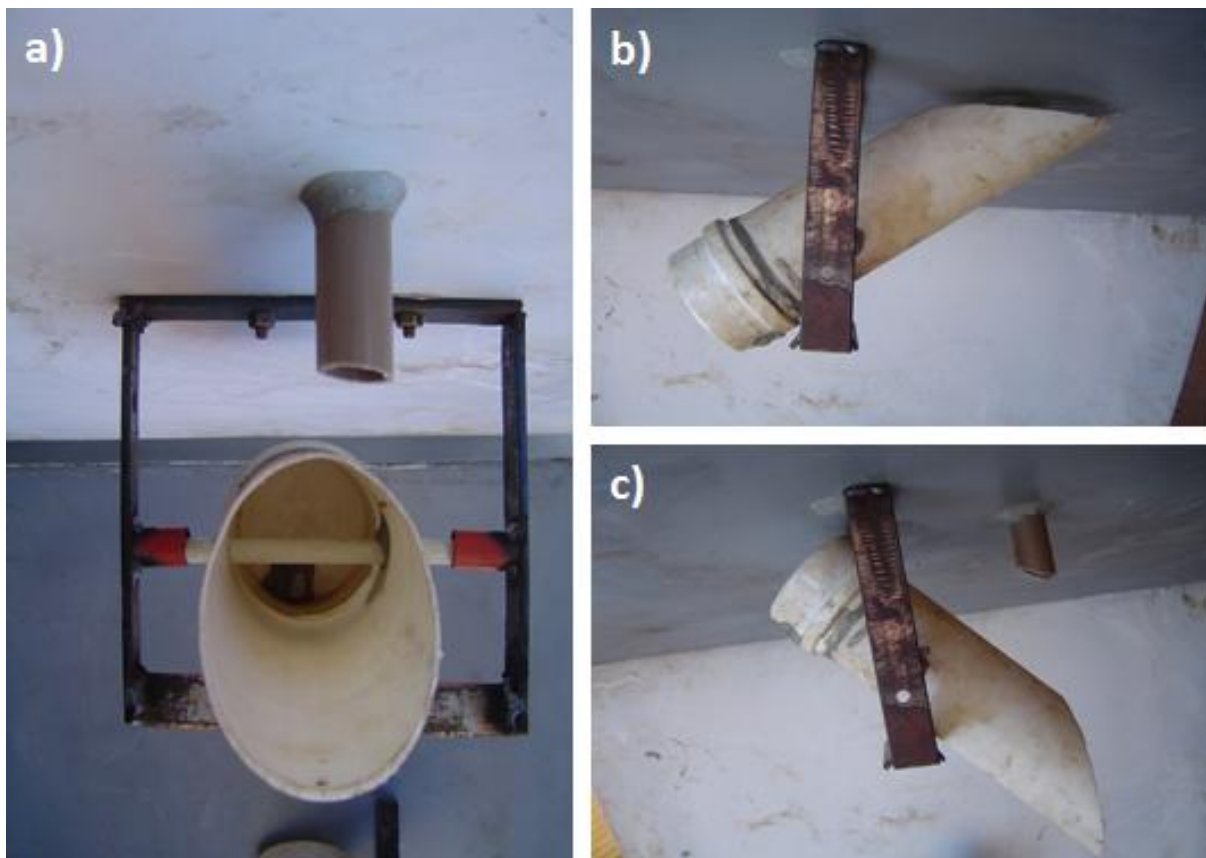


Figura 2. Dreno de báscula: a) vista frontal, b) vista lateral antes da drenagem e c) após a drenagem.

As quatro células de carga aderidas nas barras de pesagem de cada lisímetro foram ligadas por cabo coaxial até uma caixa de junção (modelo 4144, Alfa Instrumentos Eletrônicos LTDA, São Paulo, SP), instalada na superfície do solo, a fim de unificar os sinais elétricos resultantes do sistema de pesagem. Um cabo coaxial único foi usado para conduzir os sinais elétricos para o sistema de aquisição de dados (Datalogger CR10X Campbell Scientific, Logan, USA), alimentado por uma bateria externa de 12 V, suprida por um painel solar, responsável pelo fornecimento de energia, em caso de interrupção. Os dados armazenados no datalogger foram transferidos para um módulo de memória e depois para um computador, por intermédio do programa PC208W (Campbell Scientific, Logan, USA).

Os quatro lisímetros construídos foram devidamente aterrados com hastes de aterramento, visando-se a proteção dos equipamentos contra sobretensões induzidas pelo impacto de descargas atmosféricas, tanto diretas quanto indiretas.

Cada célula de carga apresentava capacidade de 1 t, à compressão, com grau de proteção IP68 e com ligação a quatro fios até as caixas de junção e com ligação a seis fios, com compensação do efeito da temperatura no cabo, entre a caixa de junção e o datalogger. Conforme o fabricante (HBM measurement, São Paulo, SP), a sensibilidade das células de carga é de $2 \pm 0,05\% \text{ mV V}^{-1}$ (24 mV) de tolerância, erro de linearidade de $\pm 0,0180\%$, erro de histerese de $\pm 0,0170\%$ e temperatura nominal de -10 a +40°C, grau de proteção IP67.

A capacidade dos reservatórios do dreno de balança construídos situou-se em torno de 1,23 mm, apresentando pequena variação entre os dispositivos ($\pm 0,2$ mm) devido às características de construção e contrapesos usados. Essas diferenças foram consideradas computando-se o valor para cada lisímetro, ao invés da média.

2.2 Calibração dos lisímetros

As calibrações dos lisímetros construídos foram realizadas em campo, para evitar a mudança de massa do sistema devido à evaporação da água do solo.

Inicialmente, as superfícies dos lisímetros foram cobertas com lona plástica para evitar a evaporação. O efeito do vento, que causa a oscilação das medidas de massa do conjunto de lisímetros, foi minimizado com a colocação de quebra-ventos feitos de lonas plásticas de aproximadamente 1 m de altura ao redor de cada lisímetro. Durante o período de calibração, a velocidade do vento registrada na Estação Meteorológica do IAPAR, variou entre 0,81 a 2,89 m s^{-1} (IAPAR, 2012).

Cada lisímetro foi calibrado separadamente, conforme procedimentos descritos em trabalhos anteriores (CAMPECHE, 2002; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). As leituras de massa foram realizadas a cada três segundos, em resposta às sequências de medições de voltagem com adição, e, posteriormente, com a retirada de massa contida em sacos plásticos hermeticamente fechados contendo areia, com 4,72 e 1,35 kg, previamente determinados em balança de precisão de 0,01 g. Após a medida de massa do lisímetro sem carga e devidamente coberto, dois sacos de areia de massa-equivalente a 4,72 kg, correspondente a 7 mm, foram colocados em sequência na superfície do lisímetro de 1,55 m^2 até alcançar 70 mm. Em seguida, foram acrescentadas massas de 1,35 kg, correspondentes a 1 mm, pela adição de um saco de areia de 1,35 kg, até atingir a massa equivalente a 80 mm. Finalmente, a carga completa de 150 mm foi obtida pela adição de dez cargas de 7 mm.

A sequência de descarga a partir de 150 mm foi realizada com a retirada dos sacos de areia, inicialmente de 7 mm até 80 mm, seguido de 1 mm até 70 mm e depois a descarga total

com a retirada de massas-equivalentes de 7 mm. As operações de carga e descarga foram repetidas quatro vezes. Assim, foram obtidos 60 pares de dados por sequência de medidas e o total de 240 pares de dados nas quatro repetições, que possibilitaram a calibração de cada lisímetro.

A carga total utilizada na calibração, de 150 mm, correspondente água armazenada na unidade correspondente a capacidade de campo (CC) do solo utilizado para preencher os lisímetros. As calibrações realizadas com massas de 9,44 kg (7 mm) e 1,35 kg (1 mm) basearam-se na literatura (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

As operações de carga e descarga foram repetidas quatro vezes. Assim, foram obtidos 60 pares de dados por sequência de medidas e o total de 240 pares de dados nas quatro repetições, que possibilitou o estabelecimento de relação linear entre o somatório da saída de sinal da célula de carga e da massa adicionada, com equivalência em milímetros de água (mm x mV).

Os resultados obtidos foram submetidos às análises de regressão, indicando sua repetibilidade e estabilidade de mensuração (NETER et al., 1996). A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação (R^2), que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à reta, ou seja, o erro aleatório.

A exatidão encontra-se relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, a exatidão foi determinada por índice denominado concordância ou ajuste “d”. As faixas de valores do índice “d” variam de 0 a 1, sendo que quanto maior for este valor, melhor a concordância (WILMOTT; CKLESON; DAVIS, 1985).

A eficiência dos lisímetros deveu-se aos menores erros padrão de estimativa, maiores índice “d” e maiores “ R^2 ”.

O índice “d” baseou-se pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i + O_i|) + (O_i - \bar{O})]^2}$$

Em que:

d - índice de concordância ou ajuste;

O_i - diferença de massa eq-mm obtida pelo método-padrão;

P_i - diferença de massa eq-mm obtida pelos demais métodos; e

\bar{O} - média dos valores de massa eq-mm obtida pelo método-padrão.

Para avaliar o ajuste do modelo com relação aos dados de campo, Willmott, Ckleson e Davis (1985) desenvolveram um teste que permite medir o erro médio absoluto (EMA) e o erro quadrático médio (EQM). O EMA é sensível à variabilidade do erro e o EMQ indica o desvio padrão em torno da reta de regressão.

A eficácia do lisímetro foi confirmada em outro experimento, por meio da comparação dos valores da evapotranspiração medida pelos lisímetros e estimada durante a determinação do coeficiente de cultura (K_c) do trigo em sistema de sequeiro e irrigado dois dias após a germinação. As determinações ocorreram nos dias 06, 07 e 08 de maio de 2011.

As condições de funcionamento do sistema de drenagem foram apresentadas por meio das variações de armazenamento que ocorreram em um lisímetro durante o período de floração da cultura do trigo. As avaliações compreenderam os dias 09, 10, 11 e 12 de junho de 2011.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A equação de regressão entre massa eq-mme a voltagem (mV) para os quatro lisímetros variaram de 1270,80 a 1322,40 mm mV⁻¹ (Tabela 1). Os coeficientes angulares (a) foram próximos, o que indica características similares nos sistemas de pesagem dos lisímetros. Os valores dos coeficientes (b), obtidos a partir da equação de regressão, variaram entre -2179,70 e -2015,40. Estas diferenças resultaram-se da massa estática (peso morto) de cada conjunto.

Tabela1. Coeficiente angular (a), constante (b), coeficientes de determinação (R²) erro absoluto médio (E) da regressão linear (y = ax + b) entre massa (y, equivalente em mm), voltagem (x em mV) obtidos para os quatro lisímetros testados

LISIMETRO	a	b	R ²	E (mm)
1	1322,40	-2179,70	9x10 ⁻⁴	0,28
2	1303,90	-2117,50	1,00	0,13
3	1270,80	-2021,50	1,00	0,15
4	1272,00	-2015,40	1,00	0,13

Observa-se que as respostas, tanto na adição quanto na subtração das massas-padrões, foram semelhantes, sendo as mesmas adequadamente descritas pela regressão linear, com coeficientes de determinação (R²) de: 0,9999, respectivamente.

A relação entre massa eq-mm e a voltagem foi comprovada pelos valores de erro absoluto de estimativa da regressão linear, que variaram de 0,13 a 0,28 mm (Tabela 1). Esses resultados situaram-se dentro dos valores de 0,08 a 0,42 mm, encontrados por Faria, Campeche e Chibana (2006), Carvalho et al. (2007) e Campeche et al. (2011). Os resultados satisfatórios das resoluções dos lisímetros de barra de pesagem indicam o bom funcionamento dos sistemas.

Os coeficientes de determinação (R²) maiores que 0,9999 indicam uma estreita relação entre a variação na quantidade de massa eq-mm adicionada e retirada do equipamento e a variação da voltagem na célula de carga. Os valores de R² encontrados assemelham-se aos obtidos por Santos et al. (2007) e Campeche (2002), ao avaliarem lisímetros de pesagem com células de carga hidráulica e de carga eletrônica, respectivamente.

A representação gráfica das relações entre variação de massa eq-mm e voltagem dos quatro lisímetros analisados produziram respostas lineares, com coeficientes de correlação superiores a 0,9999 e com histerese desprezível, o que indica uma estreita relação no processo

de carga e descarga e a voltagem da célula de carga (Figura 3). Os resultados obtidos corroboram os encontrados por Miranda, Yoder e Sousa (1999), Oliveira et al. (2008) e Fernandes et al. (2012). Santos et al. (2008) também observaram leituras da evapotranspiração de referência (Eto) consistentes em todos os ensaios de calibração de lisímetro, com respostas lineares e histerese desprezível.

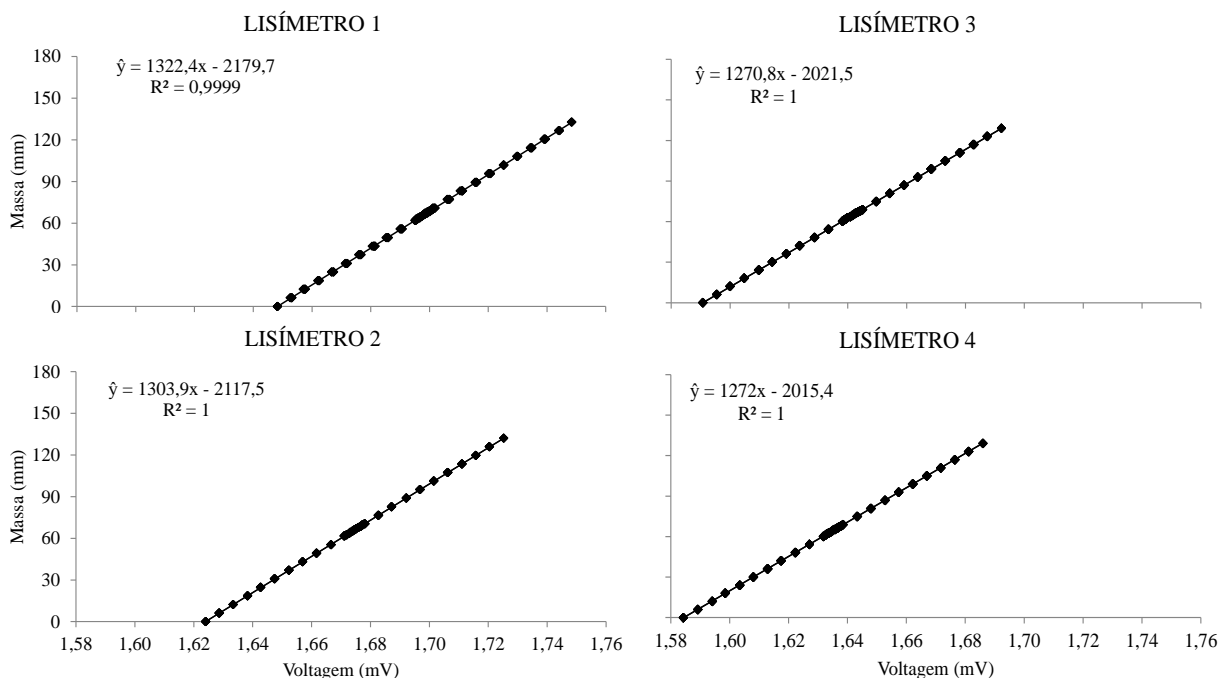


Figura 3. Relação entre variação da massa equivalente-mm e voltagem dos quatros lisímetros analisados.

Os baixos valores do erro absoluto (Ea), do erro quadrático médio (EQM) e do erro médio absoluto (EMA), resultantes da regressão linear, mostraram-se satisfatórios, confirmando a precisão dos equipamentos avaliados (Tabela 2).

Tabela 2. Valores do erro Absoluto (Ea), erro do médio quadrático (EMQ), erro médio absoluto (EMA) e o índice de Wilmott (d), resultantes da regressão linear entre os valores de massa equivalente em mm observados e estimados

Lisímetro	Ea	EMQ	EMA	d
		(mm)		
1	0,0117	0,1289	0,2844	$9,7 \times 10^{-4}$
2	0,0334	0,0268	0,0245	$9,0 \times 10^{-4}$
3	0,0985	0,0424	0,0329	$9,0 \times 10^{-4}$
4	0,0453	0,0232	0,0259	$9,0 \times 10^{-4}$

A precisão para determinação de variações de massa eq-mm foi comprovada pelos baixos valores de erro absoluto, que variaram entre 0,0117 e 0,0985 mm. A qualidade da estimativa do modelo foi analisada pelos indicadores estatísticos EMA, encontrando-se valores de 0,0245 e 0,2844 mm. O EQM variou de 0,0232 a 0,1289 mm, sendo que o menor erro está associado ao melhor ajuste.

O índice de concordância de Wilmott “d” apresentou-se próximo à unidade 1, indicando uma boa agregação entre os valores das massas eq-mm observadas em relação às estimadas, utilizadas durante o processo de calibração. Estes resultados asseguram a exatidão dos resultados obtidos pelos lisímetros de barras construídos. Santos et al. (2007), estudando um lisímetro com diafragma, confirmaram a sua capacidade de determinar com precisão a evapotranspiração de mudas cítricas, por meio do coeficiente de determinação de 0,9975 e índice de concordância “d” de 0,99926.

Na Figura 4, encontra-se a regressão simples entre massa estimada (eq-mm) pelo modelo e massa observada (eq-mm) no experimento, assim como o cálculo dos parâmetros da regressão (intercepto “a”, coeficiente angular “b” e determinação “R²”).

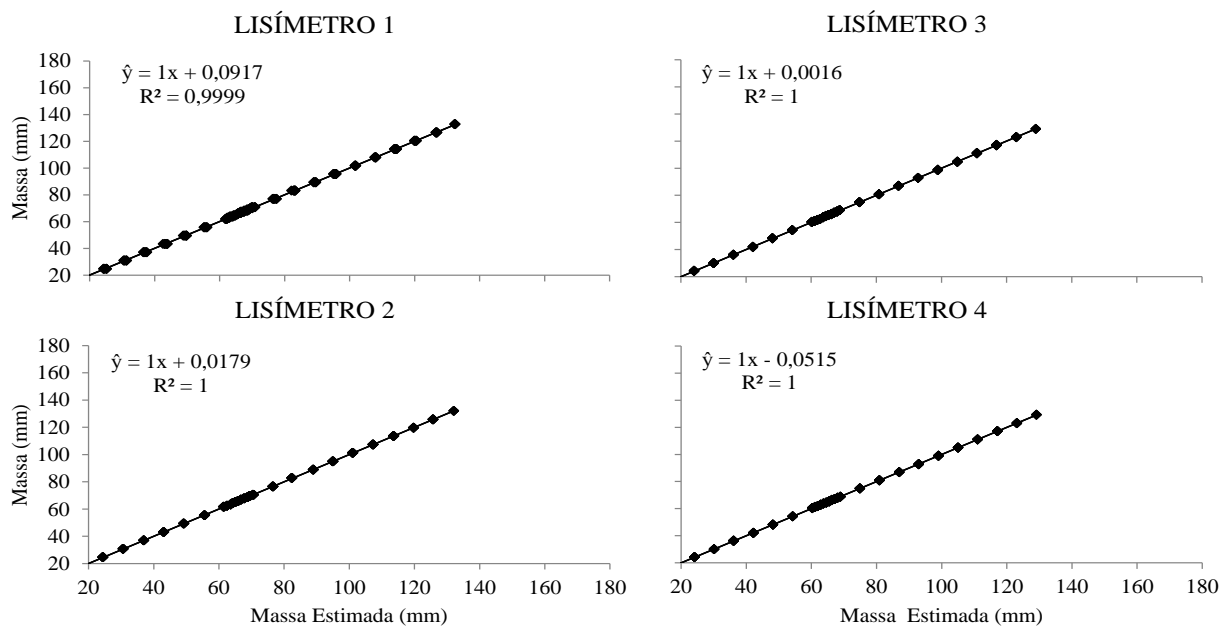


Figura 4. Variação de massa entre os valores observados e estimados em equivalente-mm, para os ciclos de carga, descarga, com seus respectivos coeficientes angulares (a) e de determinação (R²) nos quatro lisímetros analisados.

O modelo linear descreveu adequadamente a relação entre as medidas observadas e estimadas nos quatro lisímetros construídos, conferindo-lhe a capacidade de detectar diferenças de massa satisfatoriamente, com alta sensibilidade na determinação dos

componentes do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera. Estas respostas corroboram com os resultados encontrados por Carvalho et al. (2007), que, ao calibrarem um lisímetro de pesagem com uma célula de carga, encontraram respostas lineares tanto para adição quanto para subtração de massas, e obtendo coeficientes de correlação próximos da unidade.

As medidas de componentes hidrológicos, realizadas para comprovar a capacidade dos lisímetros em monitorar os componentes do balanço hídrico sob cultivo de trigo, foram tomadas durante sete dias, de 06 a 12 de maio de 2011 (Figura 5). Assim, a irrigação realizada de 29 mm no dia 06, em torno das 17 h, resultou no aumento da lâmina armazenada. A partir das 8 h do dia 07, e ao longo dos dias subsequentes, o armazenamento decresceu em decorrência das perdas por evapotranspiração da cultura (ETc).

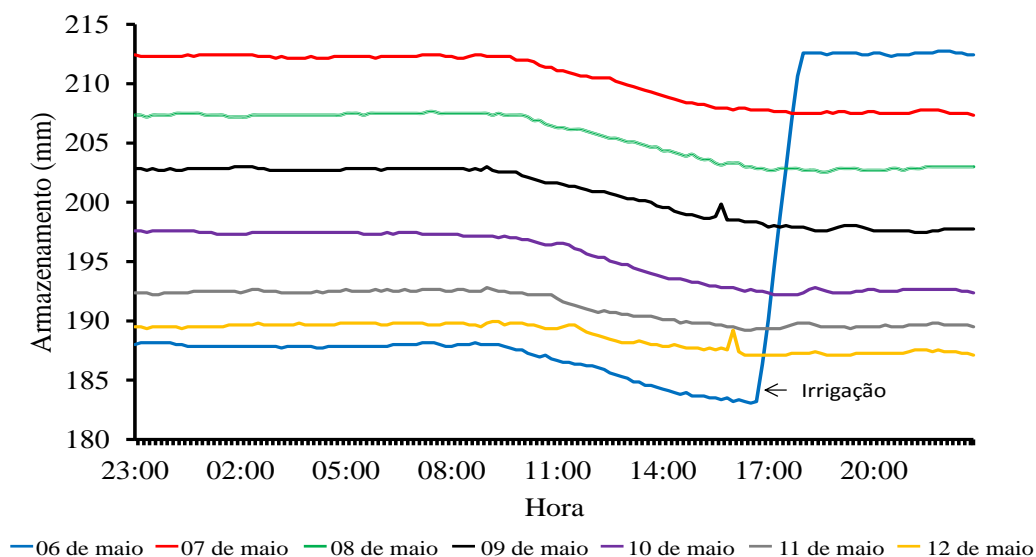


Figura 5. Armazenamento de água no solo medido em um lisímetro cultivado com trigo de 06 a 12 de maio de 2011.

A evapotranspiração do período variou de 2,40 a 5,25 mm d⁻¹, o que demonstrou a coerência entre a variação do armazenamento nos períodos de carga e recarga da água do solo.

A sensibilidade do equipamento em medir oscilações de armazenamento de água no solo pode ser demonstrada também pelos pequenos picos registrados nos dias 09 e 12, próximo das 16 h, que foram causados pelo acréscimo/decréscimo do armazenamento (mm) devido ao uso de uma sonda de nêutrons para monitoramento do conteúdo de água no solo (Figura 5).

Com objetivo de demonstrar a capacidade dos lisímetros em monitorar satisfatoriamente os componentes do balanço hídrico, calcularam-se a ET_o (mm d^{-1}) diária pelo método Penman-Monteith-FAO, utilizando do software CLIMA, desenvolvido pelo IAPAR (FARIA et al., 2003) e a ET_c da cultura do trigo (mm d^{-1}) foi mensurada em um dos lisímetros construídos (Figura 6).

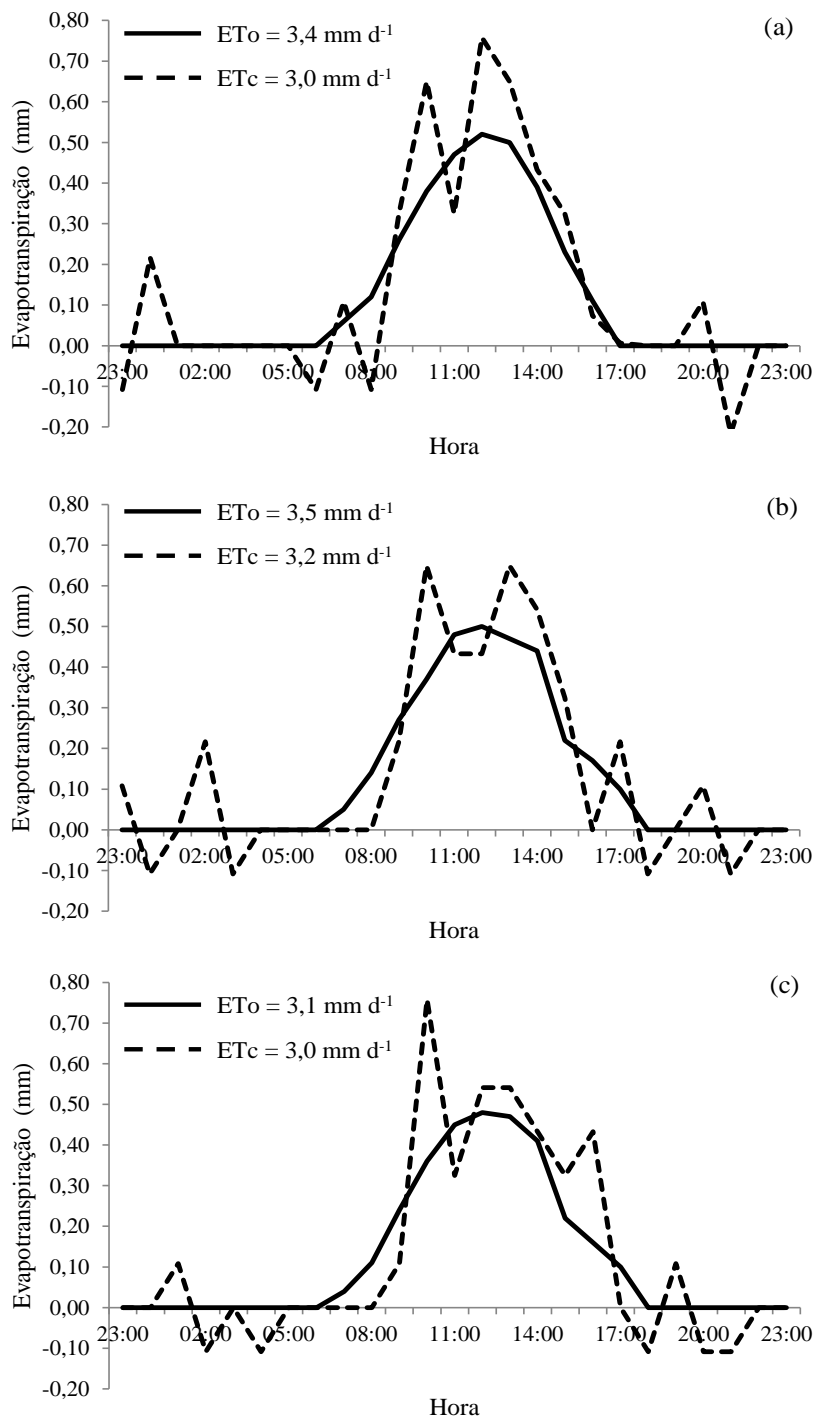


Figura 6. Somatório da evapotranspiração da cultura do trigo (ET_c) e evapotranspiração de referência (ET_o) medidas em um lisímetro nos dias 06 de maio (a), 07 de maio (b) a 08 de maio (c) de 2011.

Durante os dias avaliados, não ocorreram chuvas e nem tampouco drenagem no lisímetro, de forma que as variações ocorreram somente em virtude das perdas por ETc. A determinação da ETc ocorreu dois dias após a germinação da cultura. Silva et al. (2003) constataram que o método de Penman-Monteith estimou ETo diária de forma consistente e obtiveram boa correlação com os dados obtidos no lisímetro. O que corroborou Pereira et al. (2002), que também obtiveram resultados adequados de ETo medidos e estimados, assim como respostas às variações dos principais elementos meteorológicos que influenciam na ETo.

Pode-se visualizar a capacidade que o lisímetro de barra de pesagem possui em detectar mudanças de massa (eq-mm) na ordem de 0,15 mm, conferindo-lhe alta sensibilidade e habilitando o uso desse tipo de equipamento para determinação das necessidades hídricas das culturas.

Durante o período noturno, foram registradas medidas de ETc. Alguns autores recomendam que estas medidas não sejam descartadas no somatório da evapotranspiração diária, quando utiliza-se de modelos de estimativa da evapotranspiração (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; CAMPECHE et al., 2011).

A diferença de desenvolvimento das plantas, das cultivares, das variações climáticas ou da irrigação podem ocasionar diferenças nos valores de ETc medidos e podem ser facilmente confundidos com erros. Flumignan e Faria (2009), estudando a evapotranspiração e o Kc de cafeeiros em formação, a partir de lisímetros, obtiveram valores de evapotranspiração e Kc variáveis em função do método de fornecimento de água para a cultura (irrigação aspersão, gotejamento e não-irrigado), frequência de chuvas, demanda da atmosfera e evolução da área foliar. O tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou maiores valores médios anuais de evapotranspiração, 3,1 e 3,4 mm d⁻¹ e Kc de 0,99 e 1,03 para o primeiro e segundo ano avaliado. Os menores valores foram obtidos no tratamento por gotejamento.

As condições de funcionamento do sistema de drenagem foram apresentadas por meio das variações de armazenamento que ocorreram em um lisímetro ao longo de quatro dias após uma precipitação de 49 mm (Figura 7b). As curvas de drenagem resultantes nos dias subsequentes encontram-se exemplificadas na Figura 7a.

As reduções na lâmina armazenada (mm) deveram-se, preferencialmente, às drenagens ocorridas, principalmente no dia seguinte à precipitação. Os acréscimos sucessivos e graduais nos valores de drenagem acumulada se devem aos eventos de basculação do montante armazenado no dispositivo de drenagem instalado no fundo do lisímetro. A massa drenada em cada evento foi equivalente a 1,23 mm, conforme mostrado na Figura 7a.

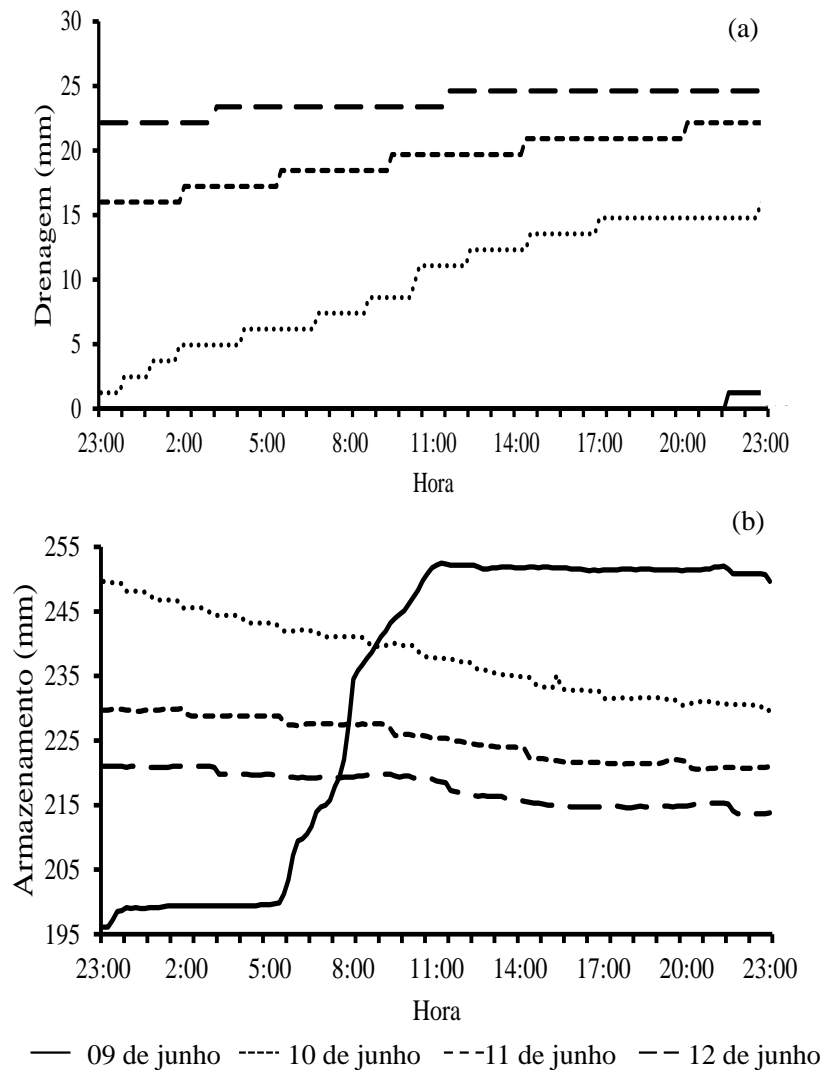


Figura 7. Drenagem acumulada (a) e armazenamento de água no solo (b) medidos em um lisímetro cultivado com trigo durante 09 a 12 de junho de 2011.

Durante os dias que ocorrem drenagem contínua, é aconselhável que os dados desse período sejam descartados. Pereira et al. (2002), recomendaram o descarte de dados de lisímetro de pesagem quando os valores de precipitação diários forem maior a 1 mm; enquanto que Santiago (2001) aconselhou o descarte dos dados devido à difícil separação entre evapotranspiração e a drenagem do sistema. O dreno de balança desenvolvido no projeto mostrou-se eficaz quanto à capacidade de drenagem após a infiltração da água no solo. Além disso, a metodologia de construção e a montagem do lisímetro de barra de pesagem apresentadas, podem ser empregadas com precisão para determinação da ETC.

4 CONCLUSÕES

Os lisímetros construídos, instalados e calibrados possuem elevada precisão e histerese desprezível.

As respostas das células de carga dos lisímetros às massas aplicadas durante o processo de calibração foram lineares, com coeficientes de determinação satisfatórios, apresentando sensibilidade à variação de massa equivalente à lâmina de 0,15 mm.

Os lisímetros de barra de pesagem são adequados para determinação das estimativas de evapotranspiração e demais componentes do balanço hídrico.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; JENSEN, M. E. Environment requirements of lysimeters. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTERS, I. A.; JENSEN, M. E. (Eds.). **Proceedings of the International Symposium on Lysimetry: Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 170-181.

CAMPECHE, L. F. M. S. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima-ácida ‘Tahiti’ (Citrus latifolia Tan.)**. 2002. 62 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)—Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FARIA, R. T.; CARAMORI, P. H.; CHIBANA, E. Y.; BRITO, L. R. S. CLIMA - Programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 372-387, 2003.

FERNANDES, C. N. V.; AZEVEDO, B. M.; VIANA, T. V. A.; BOMFIM, G. V.; MESQUITA, J. B. Instalação e calibração de um lisímetro de precisão com uma célula de carga. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 251-263, 2012.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 1, p. 268-279, 2009.

IAPAR. **Agrometeorologia**: médias históricas. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.html>. Acesso em: 16 fevereiro de 2012.

KIRKHAM, R. R.; GEE, G. W.; JONES, T. L. Weighing lysimeters for long-term water balance investigations at remote sites. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, no. 5, p. 1203-1205, 1984.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUSA, F. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 107-110, 1999.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. New York: McGraw-Hill, 1996. 1408 p.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; SANTOS, F. X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008.

PEREIRA, A. R.; SANTIAGO, A. V.; MAGGIOTO, S. R.; FOLEGATTI, M. V. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 51-56, 2002.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referencia medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial**. 2001. 51 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)–Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SANTOS, F. X.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO, A. A. A.; MOURA, R. F. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 115-124, 2008.

SANTOS, R. A. S.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; ATARASSI, R. T.; ALVES JÚNIOR, J. Projeto, construção e calibração de um lisímetro móvel de pesagem, com célula de carga hidráulica, para determinação da demanda hídrica de mudas cítricas em casa de vegetação. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 202-215, 2007.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria v. 7, n. 1, p. 53-58, 1999.

SILVA, L. D. B. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq) e grama-batatais (*Paspalum notatum* flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. 2003. 93 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)–Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SILVA, T. J. A.; MONTENEGRO, A. A.; RODRIGUES, J. J.; BONFIM, E. M. S. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina-PE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 511-520, 2003.

SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; AZEVEDO, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 120, no. 4, p. 467-472, 2009.

VIANA, T. V. A. **Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido**. 2000. 138 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)—Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 2000.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, no. 5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 2

Evaporação da água do solo em função da quantidade e uniformidade de distribuição de resíduos de culturas na superfície do solo

RESUMO

Os resíduos vegetais influenciam o balanço de energia e fluxo de vapor d'água na superfície do solo, amenizando as taxas de evaporação e possibilitando melhores condições de umidade para o crescimento e desenvolvimento das culturas. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da quantidade e da distribuição de resíduos de culturas sobre o solo na evaporação da água do solo. O estudo foi realizado no Instituto Agronômico do Paraná, em Londrina, PR. No experimento 1, determinou-se a evaporação da água do solo em função da quantidade de resíduos de culturas de soja e trigo (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), e no experimento 2, foi determinada a evaporação da água do solo em função da distribuição de 4 t ha⁻¹ de resíduos da cultura de soja e trigo, distribuindo-os em 33, 66 e 100% de cobertura do solo. Foram utilizados oito lisímetros de pesagem com duas repetições denominadas ciclos para cada período experimental. A evaporação acumulada ao término de cada período de secamento ajustou-se ao polinômio de segundo grau, com decréscimos significativos em função da quantidade ($0,86 \geq R^2 \geq 0,99$) e distribuição dos resíduos culturais ($0,74 \geq R^2 \geq 0,99$). Em relação ao solo descoberto, as reduções da evaporação ao final das avaliações foram de 17% para aplicação de 2 t ha⁻¹, 28% com 4 t ha⁻¹ e 25% para 6 t ha⁻¹ de resíduos culturais da soja, durante o ciclo 1 no outono. Na primavera as reduções da evaporação durante o ciclo 1, foram de 10, 12, 23% para 2, 4 e 6 t ha⁻¹, respectivamente. A evaporação da água do solo reduziu-se, em relação ao solo descoberto, com o aumento da taxa de resíduos culturais da soja e as maiores reduções (29 a 33%) ocorreram com resíduos distribuídos uniformemente sobre o lisímetros.

Palavras-chave: Lisímetro. Balanço hídrico. Resíduo de cultura.

ABSTRACT

Plant residues influence the energy balance and flow of water vapor on the surface of the soil, softening rates of evaporation and providing better moisture conditions for crop growth and development. This work had as an objective to quantify the effect of the amount and distribution of crop mulching on the soil evaporation of soil water. The study was conducted at the Instituto Agronômico do Paraná, in Londrina, PR. In experiment 1, it was determined the evaporation of ground water according to the quantity of waste soybean and wheat (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹), and in experiment 2 was determined evaporation of water soil due to the distribution of 4 t ha⁻¹ residue of soybean and wheat, distributing them in 33, 66 and 100% ground cover. They used eight weighing lysimeters with two replications called cycles for each trial. Evaporation accumulated at the end of each period of drying set the second degree polynomial, with significant decreases in the quantity ($R^2 \geq 0.86 \geq 0.99$) and distribution of crop residues ($R^2 \geq 0.74 \geq 0.99$). Compared to bare soil, reductions in evaporation at the end of the evaluations were 17% for application of 2 t ha⁻¹, 28% with 4 t ha⁻¹ and 25% for 6 t ha⁻¹ of residues of soybeans, during the first cycle in the fall. Reductions in spring evaporation during the cycle 1, were 10, 12, 23% for 2, 4 and 6 t ha⁻¹, respectively. Evaporation of water from the soil decreased, compared to bare ground, with an increased rate of residues of soy and the largest reductions (29 to 33%) occurred at residue distributed evenly over the lysimeters.

Keywords: Lysimeter. Water balance. Crop residue.

1 INTRODUÇÃO

O sistema de plantio direto (SPD), em decorrência da manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo e o seu mínimo revolvimento, pode ocasionar a redução das perdas do solo por erosão (LAL, 2007; TRIPLETT JÚNIOR; DICK, 2008), como também na diminuição do escoamento superficial (ALBUQUERQUE et al., 2002; CASTRO; COGO; VOLK, 2006), elevar a taxa de infiltração (ALVES SOBRINHO et al., 2003), diminuir a amplitude térmica do solo (CASTRO FILHO et al., 2002; TORRES et al., 2006) e reter maior quantidade de água (FREITAS et al., 2004a).

As velocidades de infiltração de água no solo mais altas ocorrem no sistema de plantio direto, quando comparado ao sistema convencional (DERPSCH; SIDIRAS; ROTH, 1986; CASTRO, 1995), devido a redução da cobertura no efeito da desagregação, evitando o selamento superficial provocado pela obstrução dos poros por partículas finas desagregadas (CASTRO; VIEIRA; MARIA, 1987).

A eficiência do SPD é garantida pelo resíduo deixado pela cultura antecessora antes do plantio. Esta contribui para a melhoria na estruturação física (ZHANG et al., 2007), química (HUNGRIA et al., 2009) e biológica do solo (BABUJIA et al., 2010; SILVA et al., 2010), assim como na elevação da umidade (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010), devido a sua maior capacidade de hidratação e de retenção de água, maior capacidade de reter cátions e de proporcionar um ambiente adequado para a fauna e flora do solo (MODEL; LEVIEN; FROSI, 1995).

Apesar de diversos efeitos positivos da palha na redução da evaporação da água na superfície do solo, estas inferências nem sempre representam a perda de água por este processo, uma vez que as avaliações são baseadas em medições gravimétricas da umidade do solo (HILLEL, 1973), nas quais são influenciadas pela disponibilidade da radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar (NOBRE, 2001; SOARES et al., 2001; LYRA et al., 2004), e pela quantidade (FREITAS et al., 2004b) e distribuição dos resíduos culturais no solo (DAMALGO, 2004).

As quantidades de matéria morta produzidas pelas culturas podem variar com a região, o tipo de cultura, o clima e com o solo. Áreas em SPD necessitam de manejo adequado dos restos culturais, que devem ser iniciados durante o manejo mecânico da palhada, ou seja, na operação de colheita, visto que o fracionamento e a distribuição do resíduo que passa no interior da colhedora são desuniformes.

A distribuição regular do resíduo cultural sobre o solo evita a ocorrência de locais de acúmulo, que causam problemas de embuchamento das semeadoras, emergência irregular de plântulas e, ainda, faixas com diferentes fertilidades de solo. O resíduo na superfície do solo atua como uma barreira física entre a atmosfera e o solo, podendo impedir um aumento na evaporação da água do solo, em condições de solo descoberto ou na fase inicial de uma cultura (STONE et al., 2006; SOUZA et al., 2008). Segundo Klocke, Martin e Todd (1990), a evaporação da água no solo é dependente, basicamente, da frequência de irrigação, da textura do solo e da porcentagem de cobertura do solo.

A irregularidade na distribuição da palha pelas colhedoras justifica a necessidade de quantificações precisas dos valores de evaporação e evapotranspiração, utilizando modelos de estimativa, que podem ser obtidos por meio de lisímetros.

Os lisímetros que utilizam sistema de pesagem possibilitam medidas em períodos menores que um dia (HOWELL et al., 1995) com maior precisão. Lisímetros do tipo dos desenvolvidos por Faria, Campeche e Chibana (2006) são precisos para detectar mudanças de massa de 0,1 mm, em intervalos iguais ou menores que 1 h, o que é adequado para a maioria das aplicações de campo.

Estimativas de evapotranspiração em lavouras com cobertura incompleta podem ser obtidas, também, por modelos de movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera, que separam evapotranspiração nos componentes evaporação e transpiração. Para estimar a evaporação do solo utiliza-se o coeficiente de evaporação (K_e).

O procedimento de cálculo do K_e fundamenta-se no balanço hídrico diário à camada superficial do solo, e requer, como variáveis de entrada, parâmetros físicos do solo, como capacidade de campo, ponto murcha permanente e água que pode ser evaporada (ALLEN, 2000).

O objetivo deste trabalho foi quantificar o efeito da quantidade e distribuição de resíduos de culturas sobre o solo na evaporação da água do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), localizado no município de Londrina, PR (latitude de 23°18'S, longitude de 51°09'W e altitude média de 585 m). O clima da região foi classificado como subtropical úmido (Cfa) de acordo com classificação de Köeppen, com temperatura média anual de 21°C. A estação chuvosa ocorre entre os meses de outubro e março, com precipitação média anual de 1.500 mm, e não há ocorrência de estação de seca definida (IAPAR, 2000). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (EMBRAPA, 2006).

As determinações de evaporação sobre diferentes níveis de resíduos culturais foram realizadas em oito lisímetros de pesagem instalados e mantidos em pousio. Os lisímetros constituem-se de tanques metálicos com dimensões de 1,4 m de largura, 1,9 m de comprimento e 1,3 m de profundidade e preenchidos com solo do local e colocados ao nível do terreno (Figura 1), conforme descrito em detalhe por Faria, Campeche e Chibana, (2006).

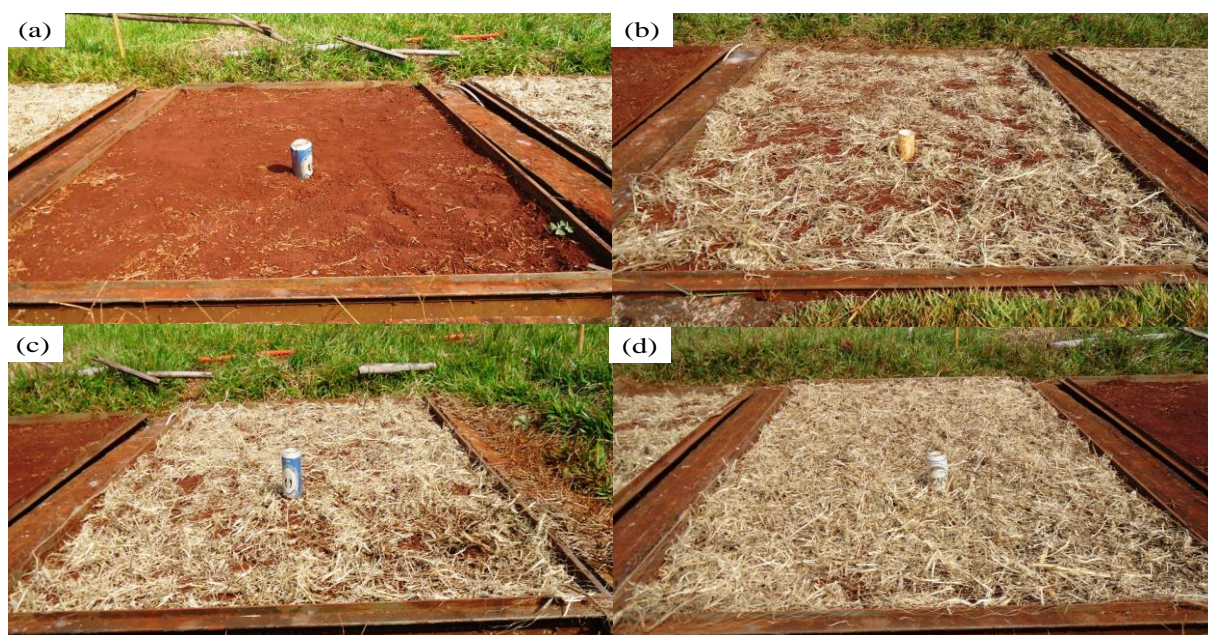


Figura 1. Lisímetro com solo descoberto (a) e com diferentes quantidades de resíduos culturais, 2 t ha⁻¹ (b), 4 t ha⁻¹ (c) e 6 t ha⁻¹ (d).

Cada tanque estava apoiado sobre uma balança constituída de um sistema de alavancas para redução de massa, capaz de detectar variações de massa equivalente a 0,1 mm em intervalos de até 1 h, medidas por uma célula de carga blindada tipo “S” que, conforme o

fabricante (Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda., São Paulo, SP), possui capacidade para 100 kgf de tensão, sensibilidade de $2 \pm 10\%$ mV V⁻¹ e índice de proteção IP67. As células de carga utilizadas possuíam carta de calibração e certificação de funcionamento. Testes preliminares no laboratório com massas conhecidas foram realizados apenas para detectar possíveis erros.

As leituras das variações de armazenamento ocorreram a cada três segundos e o sistema de aquisição de dados (Datalogger CR21X Campbell Scientific, Logan, USA), armazenava a média destes em intervalos de 10 minutos para cada célula de carga, evitando as oscilações instantâneas nas medidas ocasionadas pelo vento.

O sistema de aquisição de dados era alimentado por uma bateria externa de 12 V. Os dados armazenados no datalogger foram transferidos para um módulo de memória e para o computador, a partir do intermédio do programa PC208W para análise.

Antes de iniciar os ensaios, foram realizadas as calibrações de cada um dos oito lisímetros, conforme procedimento descrito por Faria, Campeche e Chibana (2006). Posteriormente, os dados foram convertidos para milímetros utilizando-se os valores obtidos na calibração inicial individual dos lisímetros.

A evaporação do solo foi determinada pela contabilidade das entradas, saídas e do armazenamento de água nos lisímetros, de acordo com a seguinte equação (1):

$$E = P + I - R - D \pm \Delta A \quad (1)$$

Em que:

E - evaporação da água do solo (mm);

P - precipitação (mm) medida na estação meteorológica do IAPAR, localizada ao lado do experimento;

I - irrigação (mm);

R - escoamento superficial, considerado zero devido à borda do tanque do lisímetro;

D - drenagem (mm);

ΔA é a variação de armazenamento dada pela diferença de peso no período.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada diariamente pelo método Penman-Monteith por meio do software CLIMA (FARIA et al., 2003).

Analisou-se o valor acumulado da evapotranspiração acumulada para determinar as taxas de reduções da evaporação de cada tratamento.

O valor de K_e foi calculado pela equação 2:

$$K_e = \frac{E}{ET_o} \quad (2)$$

O Experimento 1 consistiu na determinação de evaporação da água do solo com quatro quantidades de resíduos culturais (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹), em dois períodos, outono e primavera (Figura 1).

Para definição das taxas de resíduos utilizadas, considerou-se a produção média de resíduo da cultura de trigo de 8 a 11 t ha⁻¹ em uma densidade populacional de 350 sementes m⁻² (HEINEMANN et al., 2006) e de soja de 3,5 a 5,5 t ha⁻¹, com uma densidade populacional de 52 sementes m⁻² (CONTE et al., 2009). Esses valores médios dependem dos fatores genéticos, edáficos, climáticos e das práticas culturais adotadas.

As aplicações dos resíduos da cultura da soja ocorreram durante o outono e os dos resíduos de trigo durante a primavera, respectivamente. Foram realizadas duas repetições de cada um dos tratamentos experimentais, denominados de ciclos 1 e 2. Antes de iniciar cada ciclo, cobriram-se os lisímetros com rede fina de nylon para evitar possíveis remoções de resíduos pela ação do vento.

Os lisímetros foram calibrados com umidade na capacidade de campo. No início de cada ciclo de medição aplicou-se, com o auxílio de um regador, uma lâmina de água de 50 mm para obter uma melhor acomodação dos resíduos sobre a superfície. Durante o umedecimento, os tratamentos sem resíduos em sua superfície foram protegidos com discos de fibras naturais e sintéticas utilizados em enceradeiras High Speed, previamente saturados em um recipiente, para reduzir o impacto direto das gotas de água no solo.

Os períodos experimentais no outono foram de 13 a 22 de maio (11 dias) e de 28 de maio a 07 de junho de 2011 (13 dias). Na primavera, as medidas foram realizadas de 24 de setembro a 10 de outubro (26 dias) e de 21 de novembro a 09 de dezembro de 2011 (22 dias).

Os restos culturais da soja e do trigo foram secos em estufa de circulação forçada de ar, por 48 horas, à temperatura de 65°C, até alcançar massa constante, e, posteriormente, determinaram-se às quantidades de resíduos necessários em cada tratamento em relação à área dos lisímetros.

No Experimento 2, foram realizadas avaliações para determinar a evaporação do solo coberto com 4 t ha⁻¹ de resíduos de culturais da soja durante o outono/inverno e trigo durante a primavera/verão, com três uniformidades de distribuição (33, 66 e 100%), além de um

tratamento controle, sem resíduos. Como no Experimento 1, foram realizadas duas repetições de cada tratamento denominadas ciclos (Figura 2), e as medições de massa dos lisímetros também foram iniciadas após a irrigação de 50 mm.

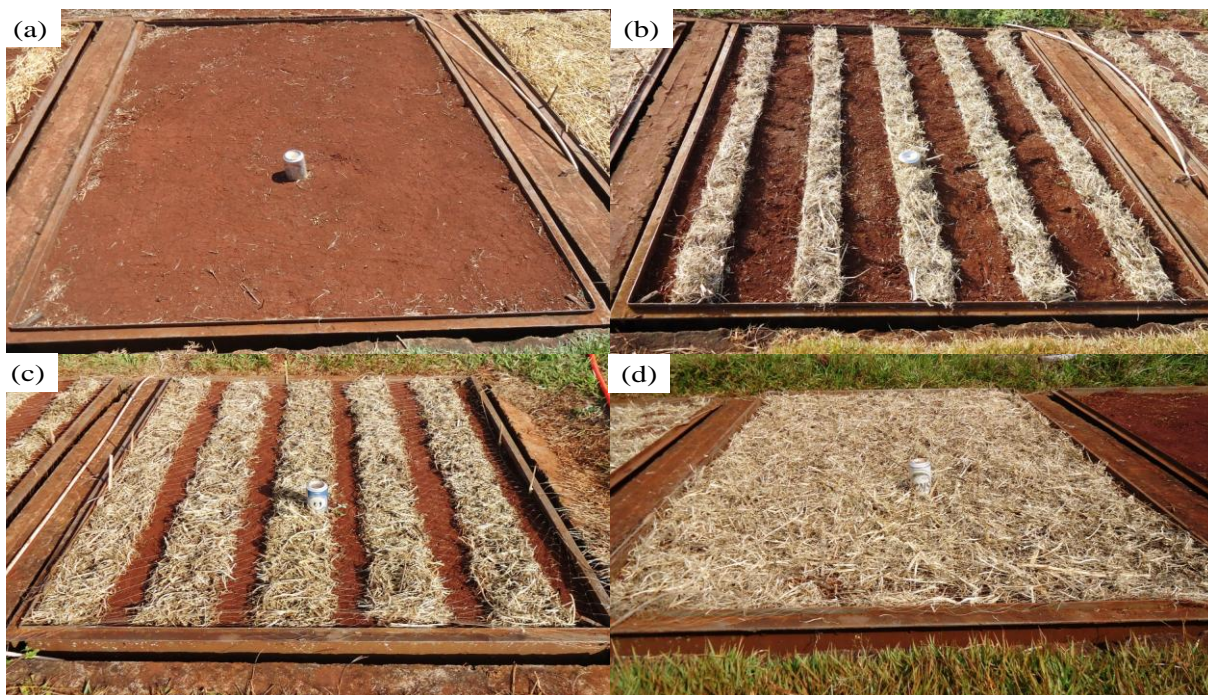


Figura 2. Lisímetro com solo descoberto (a) e com diferentes coberturas resíduos culturais da palha de soja, 33% (b), 66% (c) e 100% (d).

Os ciclos foram realizados nos períodos de 12 a 21 de junho (outono) e de 08 a 18 de julho de 2011 (inverno), totalizando 9 e 10 dias. Os ciclos do segundo período foram conduzidos de 21 a 29 de outubro (primavera) e de 16 dezembro de 2011 a 09 de janeiro de 2012 (verão), que totalizaram 8 e 24 dias, respectivamente.

Os restos culturais de soja e de trigo foram obtidos e manejados da mesma forma como no Experimento 1. Para determinação da quantidade de resíduos necessários na distribuição de 33 e 66%, dividiram-se os lisímetros em cinco faixas de 9,33 e 18,66 cm, conforme o modelo de distribuição proposto (Figura 2b, c), e procedeu-se o cálculo a partir da quantidade total de resíduos (4 t ha^{-1}) pela área do lisímetros.

Ao final de cada ciclo experimental, foram coletadas amostras de solo a 5 cm de profundidade em cada lisímetro utilizado, para determinação da umidade do solo. Durante as avaliações não foram realizadas drenagens nos lisímetros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Experimento 1

A determinação da evaporação em função de diferentes quantidades de resíduos de soja e trigo em dois ciclos avaliados durante o período de outono e dois ciclos durante a primavera encontra-se na Figura 3.

Durante os ciclos de avaliação de cada período, observou-se que a evaporação aumentou com a ocorrência de precipitações em todos os tratamentos. A demanda hídrica permaneceu aproximadamente constante durante os períodos de avaliação, com taxas médias de ETo de 2,5 e 2,3 mm d⁻¹ para os ciclos 1 e 2 de outono (Figuras 3a, b), sendo que o ciclo 2 apresentou um acumulado de precipitação de 15,4 mm, ocorrido no último dia de avaliação (07 de junho), o que não permitiu o início de um novo período de secamento (Figura 3b).

O mesmo comportamento foi observado durante o período da primavera, contudo as taxas médias de ETo foram maiores e variaram entre 3,8 e 4,9 mm d⁻¹ (Figuras 3c, d).

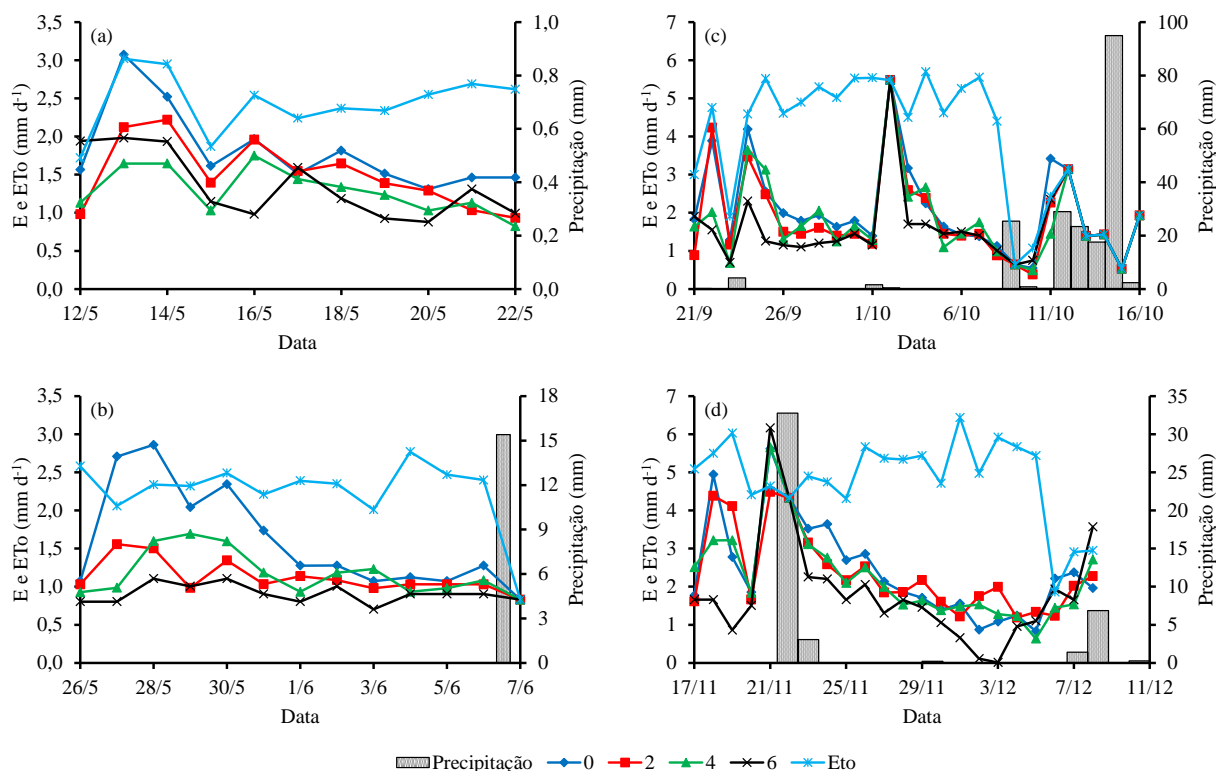


Figura 3. Evaporação (E) e evapotranspiração de referência (ETo) avaliadas durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera com resíduo de trigo.

Ao longo das avaliações foram registradas precipitações que elevaram a evaporação em todos os tratamentos. Observou-se, ainda, que a evaporação do solo descoberto foi superior a ETo, resultado das condições de alta umidade da superfície do solo que deixou a água praticamente livre para evaporar (Figura 3d).

Durante o ciclo 1 da primavera, registrou-se um acumulado de precipitações de 200 mm, iniciando com uma irrigação no dia 21 de setembro (Figura 3c). O volume pluviométrico registrado proporcionou uma taxa elevada de evaporação de todos os tratamentos. No ciclo 2, o total acumulado de precipitações foi de 45 mm, iniciando com uma irrigação no dia 17 de novembro (Figura 3d).

As reduções gradativas das taxas de evaporação em função do tempo após o início de cada ciclo avaliado ocorreram em decorrência do secamento da camada superficial do solo (Figura 3). Esse efeito foi mais pronunciado no tratamento sem cobertura de resíduos, no qual a taxa de evaporação de água do solo foi igual à ETo somente no primeiro dia de avaliação, após a irrigação inicial e após as precipitações que ocorreram ao longo dos dois ciclos, o que indica um curto período (< 1 dia) para a fase 1 de evaporação do modelo proposto por Ritchie (1972). O estágio 1 de evaporação pode durar de um a três dias, e a magnitude das taxas neste período pode chegar a 90%, dependendo da profundidade e das propriedades hidráulicas do solo (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990).

Nos tratamentos com resíduos, não se verificou a transição da fase 1 de evaporação para a fase 2, uma vez que as taxas de evaporação foram baixas desde os primeiros dias, ocorrendo ligeiros decréscimos com o tempo de secamento, até que as superfícies tornaram-se secas. Nos tratamentos avaliados, a evaporação da água do solo decresceu à medida que a umidade do solo diminuiu, caracterizando a fase 2 da evaporação, que iniciou-se próxima do 5º dia de secamento, durante os ciclos avaliados (Figura 3).

O efeito da quantidade de resíduos de cultura na redução da evaporação é apresentado pelas curvas de evaporação acumulada ao final do ciclo de secamento, durante o período de outono com resíduos de soja (Figura 4).

Os valores de ETo foram de 26,9 mm para o ciclo 1 e 29,2 mm para o ciclo 2. A evaporação acumulada para os tratamentos 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹ com resíduos de soja durante o ciclo 1 do outono foi de 19,8, 16,5, 14,2 e 14,9 mm, respectivamente (Figura 4a). Enquanto no ciclo 2 foram registrados valores de evaporação acumulada de 20,7, 14,6, 15,2 e 11,8 mm para os tratamentos 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 4b). Por meio da análise das Figuras 4a e 4b, verificou-se que a evaporação acumulada foi menor nas quantidades 4 e 6 t ha⁻¹.

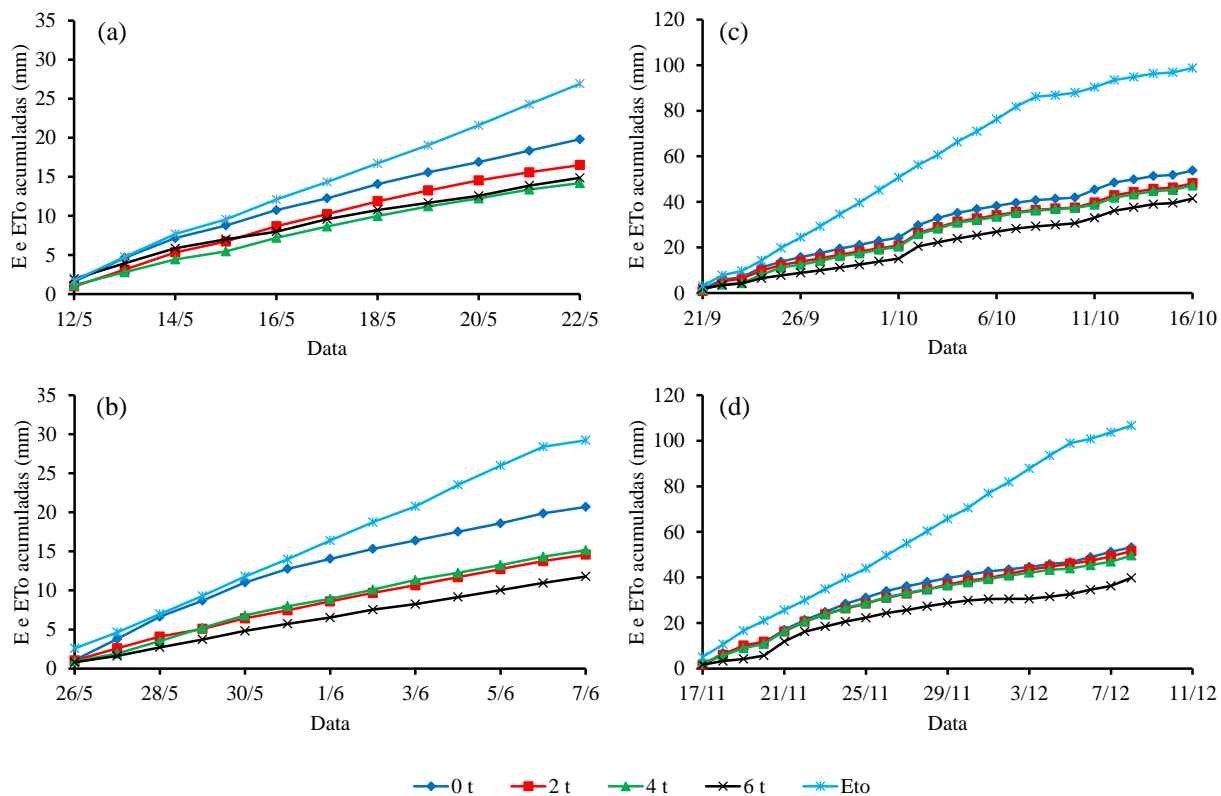


Figura 4. Evapotranspiração de referência (ETo) e evaporação acumuladas avaliadas durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d), durante a primavera, com resíduo de trigo.

Os ciclos de secamento avaliados no período da primavera apresentaram valores reduzidos de evaporação acumulada para a quantidade de 4 e 6 t ha⁻¹ de resíduos de trigo (Figuras 4c, d), o que reforça os resultados obtidos para os resíduos de soja (Figuras 4a, b).

Os valores de ETo acumulados nos dois ciclos durante a primavera foram de 98,8 e 106,7 mm (Figuras 4c, d), resultado de uma maior demanda evapotranspirativa. A evaporação acumulada avaliada durante o ciclo 1 para os tratamentos 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹ de resíduos de trigo foi de 53,7, 48,15, 47,1 e 41,4 mm, respectivamente (Figura 4c). Enquanto no ciclo 2 registrou-se valores de evaporação acumulada de 53,2, 51,4, 49,6 e 39,8 mm para 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹ de resíduo de trigo, respectivamente (Figura 4d). Dessa forma, observa-se que as evaporações acumuladas obtidas foram semelhantes, independente dos ciclos de condução ter sido diferentes.

À medida que a ETo diária aumentou, os valores de evaporação acumulada também aumentaram, contudo, a umidade do solo (quantidade de água presente no mesmo) determinou a evaporação de cada tratamento. De maneira geral, as coberturas foram determinantes até o quarto dia após o molhamento do solo e, posterior este período, não se verificou o efeito das diferentes coberturas no fenômeno de perda de água.

O efeito da quantidade de resíduos na redução da evaporação relacionado com o solo descoberto pode ser observado pela evaporação acumulada crescente ao final do ciclo de secamento durante os dois ciclos do período de outono (Figura 5a) e de primavera (Figura 5b). O ajuste da equação polinomial de grau quadrático ($0,99 \geq R^2 \geq 0,86$), representa os efeitos decrescentes na evaporação acumulada, à medida que ocorre acréscimos nas quantidades de resíduos, até atingir incrementos mínimos próximos de 4 e 6 $t\ ha^{-1}$, o que corrobora os resultado obtidos por Prevedello e Loyola (2005) que, ao simular o processo de evaporação, concluíram que areia colocada sobre a superfície do solo comportou-se como uma capa isolante, proporcionando uma forte resistência ao fluxo da água na superfície do solo.

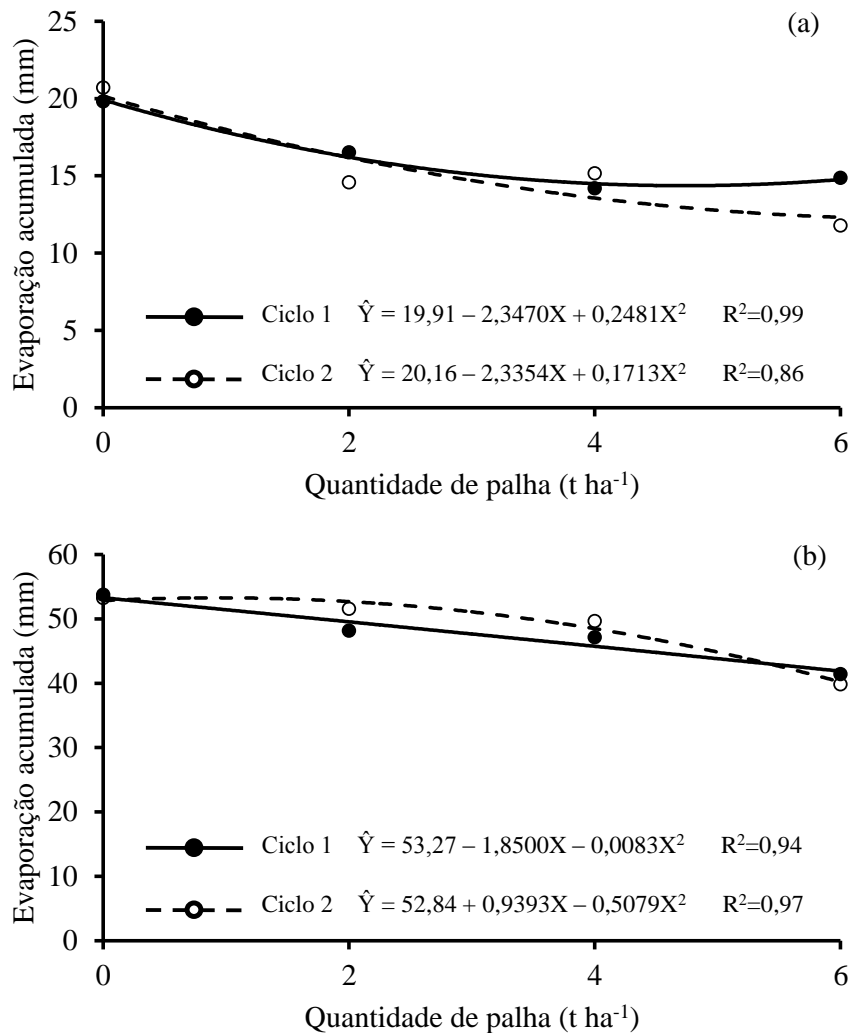


Figura 5. Evaporação acumulada em função da quantidade de resíduo ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono com resíduos de cultura de soja (a) e primavera com resíduos de cultura de trigo (b).

Durante o ensaio de outono, no qual foram utilizados resíduos culturais da soja, a evaporação acumulada foi de 19,8 mm no tratamento sem resíduos e 14,9 mm no tratamento com 6 t ha⁻¹ (Figura 5a). O mesmo comportamento foi observado para os resíduos de trigo, durante a primavera. A evaporação acumulada, contudo, decresceu 54, 48, 47 e 41 mm para coberturas de resíduos de 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 5b), o que é justificável devido à alta demanda evaporativa e a degradação dos resíduos, resultante de uma intensa decomposição microbiana da matéria orgânica (MO), em decorrência do aumento da pluviosidade e temperatura na primavera (ZINN; LAL; RESCK, 2005), uma vez que para cada 1 mm de suplementação hídrica eleva-se a taxa de degradação da MO, por meio do aumento na atividade microbiana do solo (BONA et al., 2006).

Os tratamentos avaliados durante o período de outono, que resultaram em maiores porcentagens de reduções de evaporação para os ciclos 1 e 2, foram de 4 e 6 t ha⁻¹, com 28 e 43%, respectivamente. Para os dois ciclos na primavera, destacaram-se os tratamentos de 6 t ha⁻¹, que apresentaram reduções de 23 e 25%. Os resultados durante o ciclo 1 corroboram os obtidos por Andrade et al. (2007) que, ao pesquisar perdas de água por evaporação em solo cultivado com milho, em sistema de plantio direto e convencional, encontraram reduções das perdas de água de 19 e 42% para 3 e 6 t ha⁻¹ de resíduos culturais da aveia, respectivamente, comparativamente com a semeadura em solo descoberto. Gonçalves, Fagnani e Peres (2005), avaliando o consumo de água da cultura da alface com o solo coberto com filme de polietileno, observaram que o consumo de água foi cerca de 34% menor quando comparada ao alface, cujo tratamento não teve o solo coberto com plástico.

Os dados acumulados nos dois ciclos avaliados mostram valores de evaporação no solo descoberto sempre acima dos demais tratamentos (Figura 5).

O modelo polinomial de segundo grau demonstrou reduções médias de evaporação de 23, 28 e 34% para as taxas de resíduos de soja de 2, 4 e 6 t ha⁻¹ nos dois ciclos durante o outono, em relação ao solo descoberto (Figura 6a). Para os dois ciclos do ensaio de primavera, as reduções médias de evaporação foram de 7, 10 e 24% com 2, 4 e 6 t ha⁻¹ de resíduos de trigo, respectivamente (Figura 6b). Os resultados obtidos corroboram os dados encontrados por Freitas et al. (2004a) e próximos aos relatados por Xie et al. (2006), que obtiveram reduções de 40,7% durante o ciclo da cultura de melancia para o tratamento sem cobertura e 17,8 a 25% para tratamento com cobertura de areia e cascalho, para condições de clima mais ameno com temperatura máxima anual de 20,7°C.

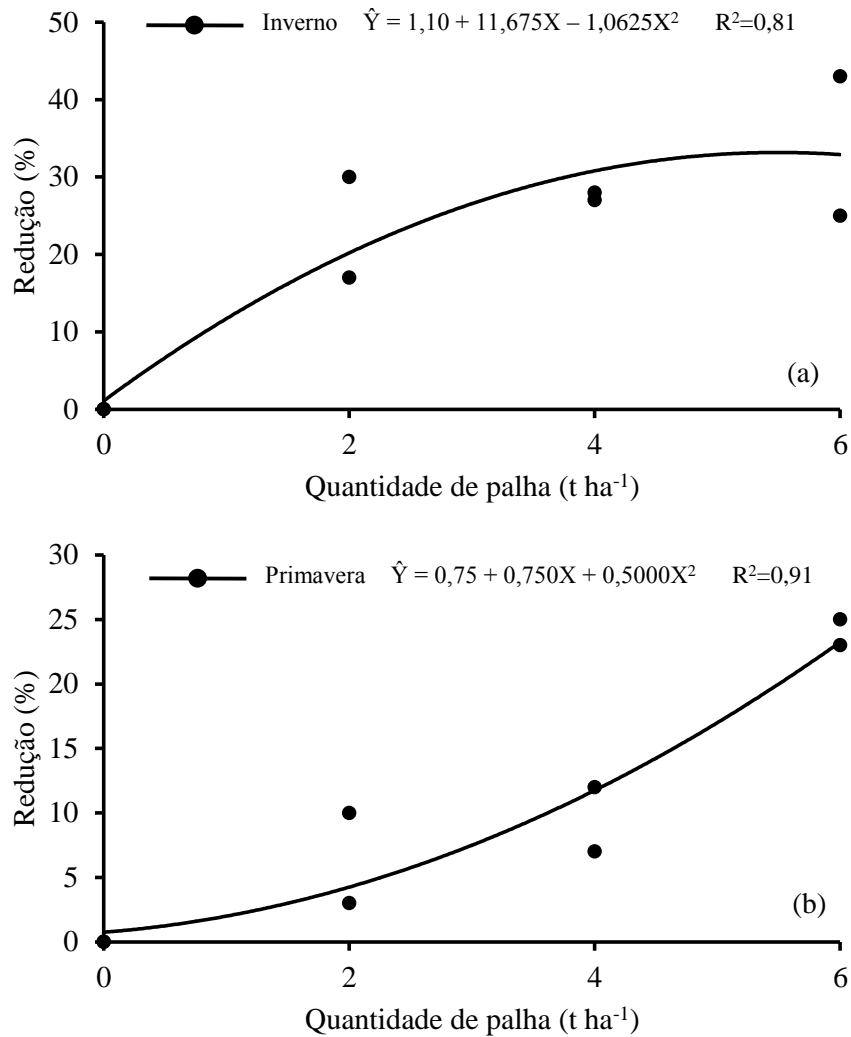


Figura 6. Redução de evaporação em função da quantidade de resíduos ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono com resíduos de cultura de soja (a) e primavera com resíduos de cultura de trigo (b).

A representação do Ke diário registrado pelas avaliações do período de outono durante os ciclos 1 e 2 podem ser observados nas Figuras 7a e 7b. No tratamento 0 t ha⁻¹, foram observados valores médios de Ke de 0,74 e 0,73 para os ciclos 1 e 2, respectivamente. No ciclo 1, o menor valor de Ke foi resultante do tratamento 4 t ha⁻¹, enquanto que no ciclo 2 foi o tratamento de 6 t ha⁻¹, com valores de 0,53 e 0,43, respectivamente.

O aumento do Ke, logo após a ocorrência da irrigação, foi atribuído à alta umidade superficial do solo, que colabora para o aumento da evaporação, o que reforça os resultados obtidos por Oliveira et al. (2003), que determinaram o coeficiente da cultura da cenoura pela metodologia proposta no Boletim FAO 56, e observaram valores de Ke superiores a 1,0 na fase inicial da cultura logo após uma chuva ou irrigação.

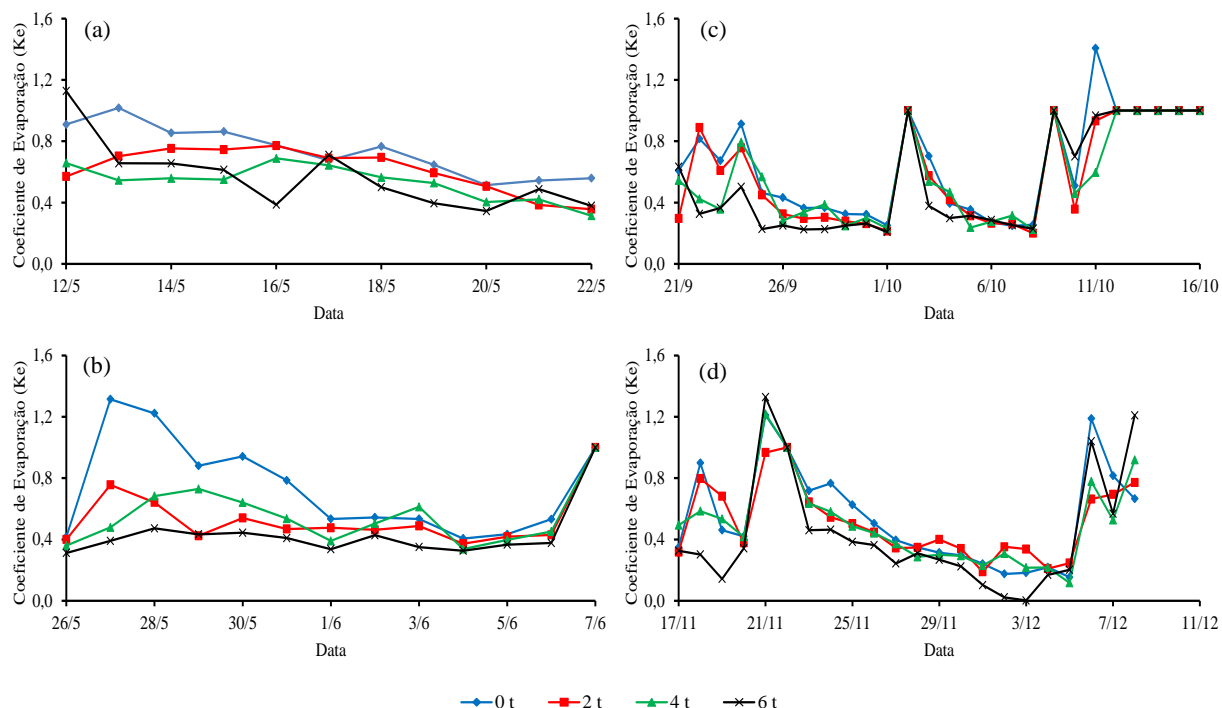


Figura 7. Valores diários do coeficiente de evaporação (Ke) avaliados durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1 (c) e ciclo 2 (d) durante a primavera, com resíduo de trigo.

Os valores de Ke obtidos pelas diferentes quantidades de resíduos durante a primavera, e nos dois ciclos avaliados, são representados nas Figuras 7c e 7d. Os maiores valores médios de Ke para os dois ciclos foram registrados pelos tratamentos 6 t ha⁻¹, com valores de 0,53 e 0,43, respectivamente.

O tratamento com solo descoberto apresentou Ke médio durante o período avaliado de 0,64 e 0,54. Desta forma, as variabilidades do Ke nos tratamentos avaliados foram diretamente influenciadas pelas coberturas do solo. Andrade et al. (2007), estudando a presença de palha em superfície, nos tratamentos com 3 e 6 t ha⁻¹ de resíduos de milho, encontraram que os valores máximos de Ke foram reduzidos para aproximadamente 50%, quando comparados com os tratamentos sem palha na superfície, atingindo Ke de 0,70 e 0,44, respectivamente.

3.2 Experimento 2

Os efeitos das distribuições de resíduos na evaporação e ETo em função do tempo, foram representados pelas curvas ao final dos dois ciclos de secamento com resíduos culturais da soja e do trigo (Figura 8). A porcentagem de evaporação no ciclo 1 do outono/inverno foi de 67%, em relação ao solo descoberto (Figura 8a). A demanda atmosférica do período

avaliado apresentou pequenas variações, com taxas de ETo de aproximadamente 2,4 e 2,5 mm d⁻¹ para os ciclos 1 e 2, respectivamente (Figuras 8a, b).

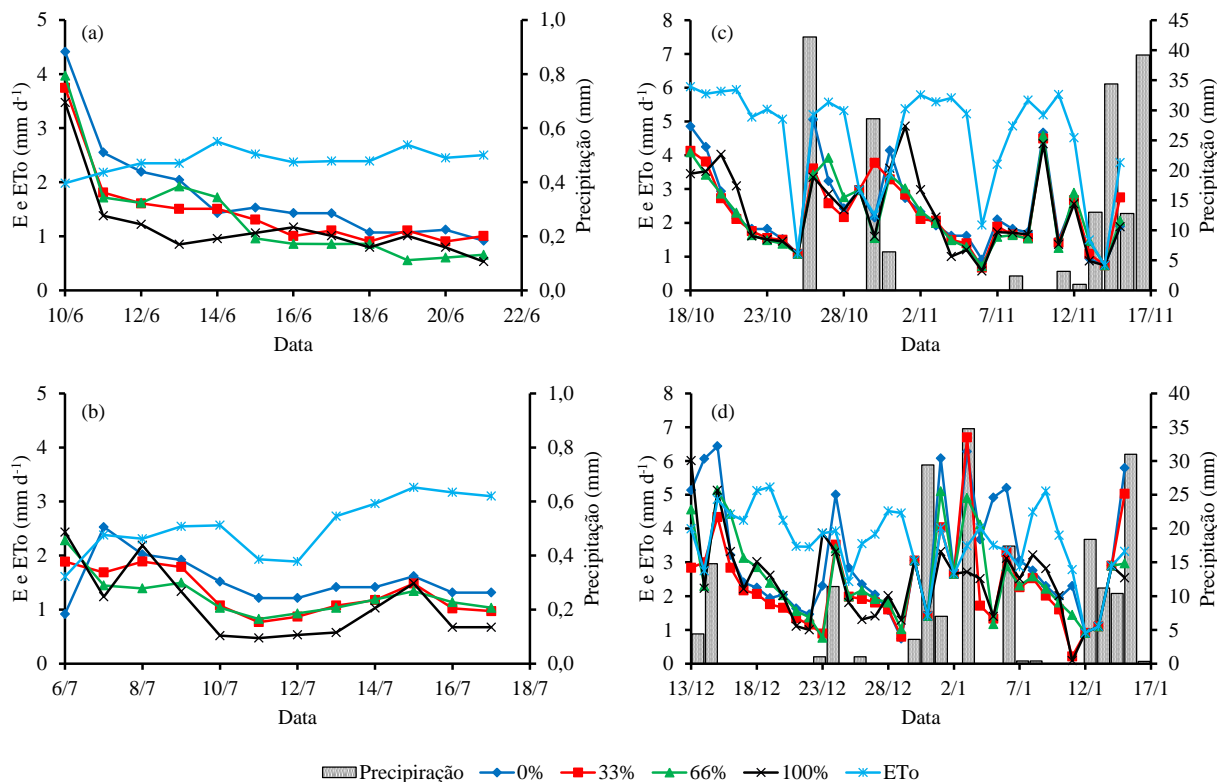


Figura 8. Evapotranspiração de referência (ETo) e evaporação (E) avaliados durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono/inverno, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera/verão, com resíduo de trigo.

No primeiro ciclo do período de primavera/verão, observaram-se taxas de evaporação de 95% para os tratamentos com 33% e 100% e evaporação de 93% para 66% de distribuição do resíduo de trigo (Figura 8c). Vale salientar que as menores taxas de evaporação ocorreram nos tratamentos que continham suas superfícies cobertas com resíduos de trigo. Para o ciclo 2, as taxas de evaporação foram de 74, 82, 77% para 33, 66 e 100% de distribuição (Figura 8d).

Quando a superfície do solo encontrava-se com alta umidade, a evaporação ultrapassou a ETo, uma vez que a água estava praticamente livre para evaporar. Nos dias 13, 14 e 24/11/2011 e 03, 05 e 15/01/2012, ocorreram precipitações que elevaram as taxas de evaporação no solo descoberto. Os tratamentos com resíduos, após as precipitações, apresentaram as maiores taxas de evaporação, pois conservaram a umidade por maior período de tempo e supriram a demanda atmosférica (Figura 8d). A ocorrência de maior evaporação no tratamento com maior quantidade de palha pode ser atribuída aos erros dos lisímetros

durante os períodos com precipitação, como evidenciado por Campeche (2002) e Faria, Campeche e Chibana (2006).

Durante os períodos avaliados referentes à primavera/verão, ocorreram precipitações que resultaram em taxas de ETo variáveis ao longo do período, com médias de 4,50 e 3,56 mm d⁻¹, respectivamente (Figuras 8c, d). As precipitações resultaram em uma frequência de curtos períodos (< 1 dia) dos estádios 1 de evaporação.

As reduções gradativas das taxas de evaporação em função do tempo, após o início de cada ciclo avaliado, ocorreram devido ao secamento das camadas superficiais dos solos dos lisímetros. Esses efeitos foram mais pronunciados nos tratamentos sem resíduos, nos quais as taxas de evaporação foram similares à ETo, somente no primeiro dia do ciclo, o que indica um curto período (< 1 dia) para a fase 1 de evaporação. Nos demais tratamentos, não ficaram evidenciadas as transições da fase de evaporação 1 para a fase 2, uma vez que as taxas de evaporação foram baixas desde os primeiros dias, ocorrendo ligeiros decréscimos com o tempo de secamento influenciados pela evaporação e pelas propriedades hidráulicas do solo.

Durante as avaliações, a evaporação da água do solo decresceu à medida que a umidade do solo diminuiu, caracterizando a fase 2 da evaporação, que iniciou-se próxima do 5º dia de secamento durante os ciclos avaliados (Figura 8).

Por meio da comparação, os ensaios de outono/inverno com resíduos de cultura da soja e primavera/verão com resíduos de trigo, observaram-se que os valores de evaporação foram próximos, provavelmente, pela menor cobertura do resíduo da soja. Nos períodos com condições atmosféricas mais intensas, obtiveram-se valores de evaporação próximos aos encontrados durante o período mais ameno, o que evidencia uma forte dependência entre a evaporação da água na superfície do solo e a demanda evaporativa da atmosfera, corroborando com Dalmago et al. (2010).

Os resíduos de soja são menos eficientes para proteger e armazenar água na superfície do solo, quando comparado com as gramíneas (DERPSCH; SIDIRAS; HEINZMANN, 1985), na qual uma quantidade de 3,5 t ha⁻¹ de resíduo de soja proporciona uma superfície do solo desprotegida de 35%, enquanto que as mesmas quantidades de resíduos de milho e de milho oferecem 25 e 20% de solos descobertos (SILVA et al., 2006).

O efeito da distribuição de resíduos de cultura na redução da evaporação é apresentado pelas curvas de evaporação acumulada ao final dos ciclos de secamento, durante o período de outono/inverno, com resíduos de cultura da soja (Figuras 9a, b).

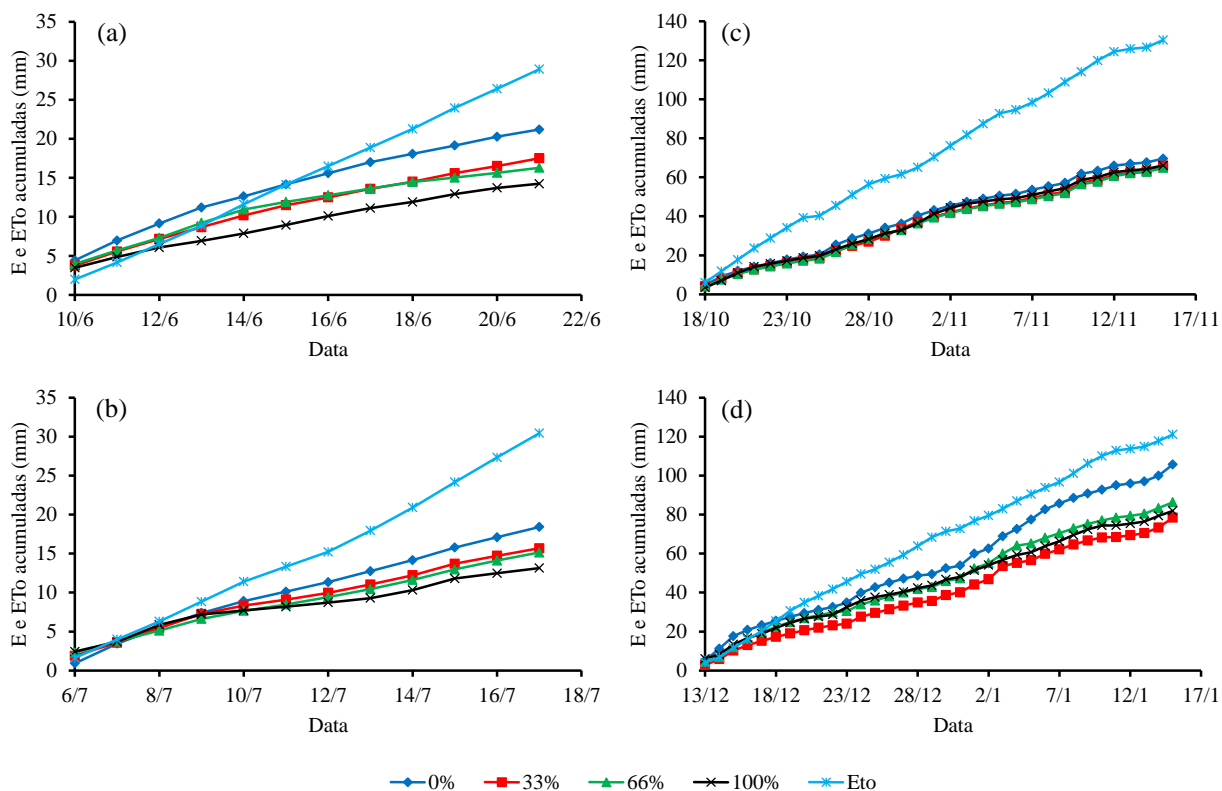


Figura 9. Evapotranspiração de referência (ETo) e evaporação acumuladas avaliadas durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono/inverno, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera/verão, com resíduo de trigo.

Verificaram-se decréscimos nas taxas de evaporação acumulada com o aumento da superfície do solo coberta por resíduos de soja (100%) em relação ao solo descoberto, durante os dois ciclos avaliados. As distribuições de 66 e 100% apresentaram menores incrementos de evaporação acumulada durante o ciclo 1, com 16,3 e 14,3 mm em relação aos 21,2 e 17,5 mm do tratamento com solo descoberto e do tratamento 33%, respectivamente (Figura 9a). Para o ciclo 2, os valores de evaporação acumulada foram próximos nos tratamentos 33 e 66% com valores de 15,7 e 15,1 mm, respectivamente. O tratamento 100% apresentou os menores resultados de evaporação acumulada, com 13,2 mm em relação aos 18,4 mm do tratamento com o solo descoberto (Figura 9b).

As reduções da evaporação devido à presença dos resíduos da cultura de trigo foram visíveis ao final de cada ciclo de secamento, no período de primavera/verão (Figuras 9c, d). Contudo, a cobertura de 66% apresentou menores incrementos de evaporação acumulada durante o ciclo 1, com 64,9 mm, em relação ao solo descoberto. As coberturas de 33 e 100% obtiveram menores resultados de evaporação acumulada, com 78,4 e 81,90 mm, comparados aos 105,8 mm do tratamento sem resíduos. Os valores de ETo acumulada foram de 130,43 e 121,13 mm, que resultaram em uma maior demanda evaporativa quando comparado com o

período de outono/inverno. As diferentes uniformidades de distribuição foram determinantes até o quarto dia após o molhamento do solo e, posterior este período, verificou-se similaridade entre os tratamentos e a quantidade de água perdida.

O efeito da distribuição dos resíduos de cultura na redução da evaporação pode ser observado na Figura 10.

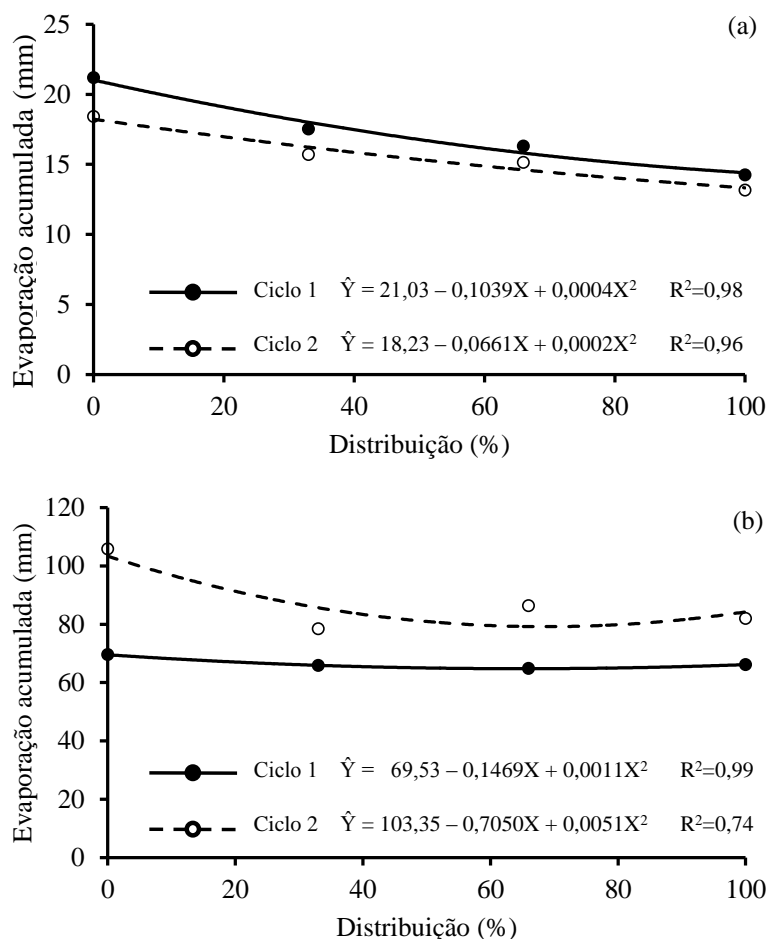


Figura 10. Evaporação acumulada em função da distribuição de resíduos de cultura ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono/inverno, com resíduos de cultura de soja (a); e primavera/verão, com resíduos de cultura de trigo (b).

O modelo apresentou ajuste polinomial de segundo grau ($0,99 \geq R^2 \geq 0,74$), o que representa os efeitos decrescentes na evaporação acumulada, à medida dos acréscimos na cobertura do solo, até atingir incrementos mínimos com 66 e 100% de cobertura. Pereira et al. (2002) obtiveram melhor proteção do solo com 0, 25, 50, 75 e 100% de cobertura do solo com 2,25, 4,50, 6,75 e 9,00 t ha⁻¹ de palhada de *Brachiaria decumbens*.

Na Figura 11a, observam-se reduções de evaporação de 17, 23 e 33% para as distribuições de resíduos de cultura da soja de 33, 66 e 100% durante o ciclo 1 do

outono/inverno, em relação ao solo descoberto. No ciclo 2, o modelo polinomial de segundo grau demonstrou reduções de evaporação de 15, 18 e 29% para as distribuições de 33, 66 e 100%, respectivamente (Figura 11a).

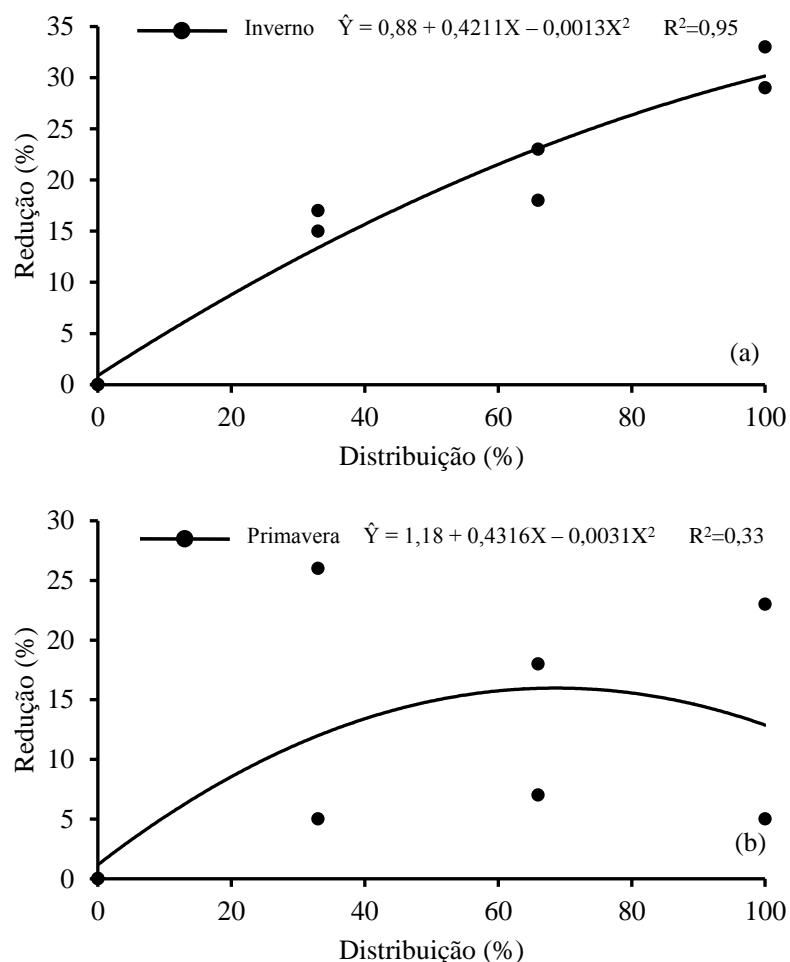


Figura 11. Redução de evaporação em função da distribuição resíduos de cultura ao final de dois ciclos de secamento durante o período de outono/inverno, com resíduos de cultura da soja (a); e primavera/verão, com resíduos de trigo (b).

Para o ciclo 1 do ensaio de primavera/verão, as reduções de evaporação foram de 5, 7 e 5% para coberturas de 33, 66 e 100% em relação ao solo descoberto (Figura 11b). No ciclo 2, as reduções de evaporação foram superiores ao ciclo 1, com valores de 26, 18 e 23% para as coberturas de 33, 66 e 100%, em relação ao tratamento sem resíduos. As reduções de evaporação foram menores no ciclo 2 para o tratamento de 33% de distribuição, em decorrência possivelmente à ação de ventos e precipitações registradas durante o período avaliado (197 mm).

A semelhança das reduções de evaporação entre o período de outono/inverno e primavera/verão pode ser resultado do resíduo cultural presente na superfície do solo. De

acordo com Freitas et al. (2004b), as taxas de resíduos de 100% de matéria seca para as culturas do milho e do trigo não foram influenciadas pela demanda evaporativa, contudo, para a cultura do feijão, a demanda evaporativa influenciou a taxa de evaporação da água do solo.

As reduções da evaporação da água do solo, ocasionadas pela presença de resíduos culturais, possibilitaram as modificações do regime térmico do solo, por meio da diminuição da entrada de energia solar, o que evita perda desnecessária de água. A conservação dos resíduos culturais no solo possibilita maior economia de água, o que corrobora os resultados obtidos por Stone e Moreira (2000) que, ao compararem o sistema de plantio direto (SPD) com outros sistemas de preparo, em duas densidades de resíduos de cultura, em duas cultivares de feijão, concluíram que o SPD com adequado teor de cobertura morta propiciou maior economia de água.

Os valores de K_e diários registrados pelas avaliações do período de outono/inverno durante os ciclo 1 e 2, encontram-se nas Figuras 12a e 12b. Durante o ciclo 1 e 2, o tratamento com solo descoberto apresentou maior valor de K_e médio (0,77 e 0,62) ao longo do período avaliado. O tratamento que apresentou menor valor médio de K_e durante o ciclo 1 e 2 foi o 100%, com valores de 0,52 e 0,47, respectivamente.

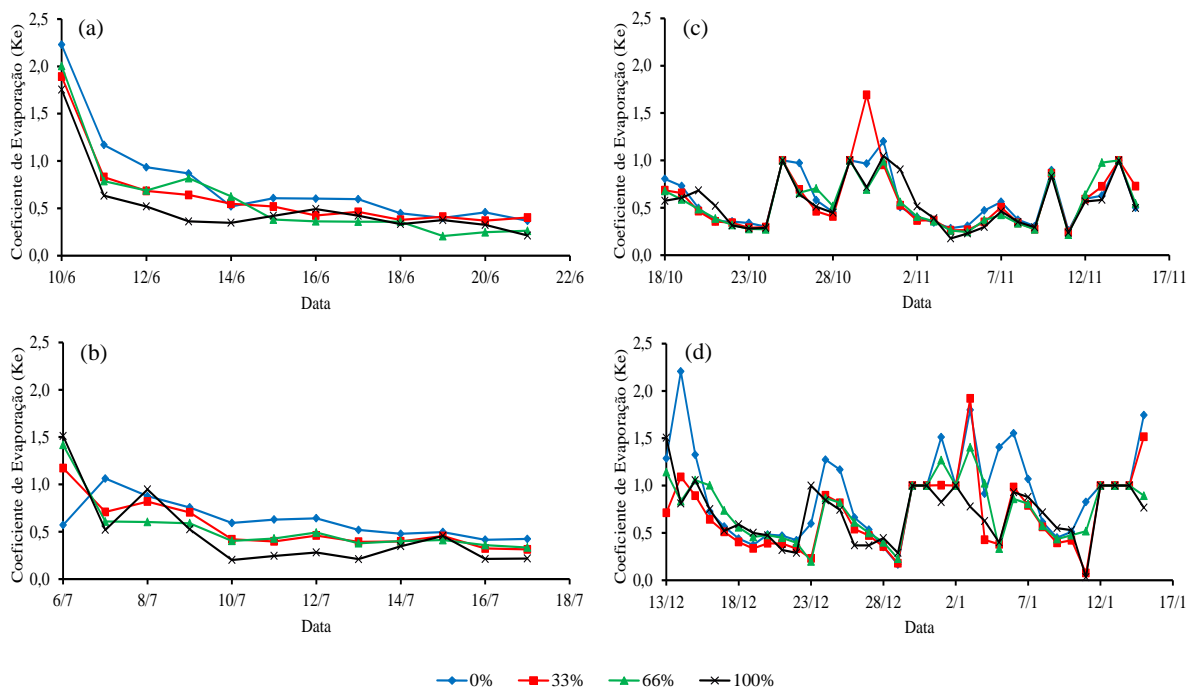


Figura 12. Valores diários do coeficiente de evaporação (K_e) avaliados durante o ciclo 1 (a) e ciclo 2 (b) no período de outono/inverno, utilizando-se resíduo de soja e ciclo 1(c) e ciclo 2(d) durante a primavera/verão, com resíduo de trigo.

Verificou-se um grande aumento do Ke em todos os tratamentos logo após a irrigação, realizada no início dos dois ciclos durante as avaliações de outono/inverno. Isto ocorreu devido à alta umidade superficial do solo que ocasionou um aumento das evaporações.

Os valores de Ke obtidos pelas diferentes distribuições de resíduos de cultura durante a primavera/verão estão representados nas Figuras 12c e 12d. Durante as avaliações de primavera/verão, verificou-se um grande aumento nos valores de Ke em todos os tratamentos logo após a irrigação, realizada no início de cada ciclo e posterior a ocorrência de chuvas ao longo das avaliações. Esta tendência foi verificada durante os dois ciclos avaliados, apresentando aumento logo após as chuvas, uma vez que a umidade encontrava-se elevada. O Ke, por expressar uma relação direta entre a evaporação e a ETo, sofreu os mesmos efeitos discutidos na evaporação.

Os tratamentos 0 e 33%, durante o ciclo 1, obtiveram valores médios próximos (0,59 e 0,58). No ciclo 2, os tratamentos 33 e 100% apresentaram valores de Ke médio de 0,70. O Ke referente ao tratamento sem resíduos foi de 0,92. Estes valores corroboram os valores encontrados por Andrade et al. (2002) ao avaliarem cinco porcentagens de cobertura morta de sorgo: 0, 25, 50, 75 e 100%.

No período de primavera/verão, após uma chuva, observaram-se valores de Ke superiores a 1,0. Também Mutziger et al. (2005), que comparando o modelo apresentado no boletim FAO-56 com valores de evaporação da água no solo medida em lisímetro, obtiveram valores de Ke superiores a 1,0.

4 CONCLUSÕES

Foram observados decréscimos significativos da evaporação com o aumento da quantidade de resíduos de cultura aplicados, destacando-se os tratamentos 4 e 6 t ha⁻¹, com reduções entre 20 e 43%, respectivamente.

Os decréscimos da evaporação em função da quantidade de resíduos de cultura seguem uma relação quadrática.

A evaporação da água do solo se reduz com o resíduo da cultura distribuído uniformemente sobre o solo, em taxas de 33 e 29%, em relação ao solo descoberto.

Em relação à distribuição de cobertura do solo, a evaporação diminui à medida que se aumenta a porcentagem de cobertura para o período de outono/inverno. No período de primavera/verão esta tendência não foi constatada.

A quantidade e a distribuição adequadas de resíduos de culturas minimizam a evaporação e promovem uma maior retenção de água no solo, o que a torna disponível para as plantas por um período maior de tempo.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 136-141, 2002.
- ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, no. 1, p. 27-41, 2000.
- ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.
- ANDRADE, J. G.; CARLESSO, R.; SEGUÍ, J. P.; MARTINS, J. D.; BROETTO, T. Perdas de água por evaporação de um solo cultivado em sistema de plantio direto e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.
- ANDRADE, R. S.; MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; CARVALHO, J. A. Consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto, em função da porcentagem de cobertura morta do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 35-38, 2002.
- BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 42, no. 12, p. 2174-2181, 2010.
- BONA, F. D.; BAYER, C.; BERGAMASHI, H.; DIECKOW, J. Carbono orgânico no solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 911-920, 2006.
- CAMPECHE, L. F. M. S. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima-ácida ‘Tahiti’ (Citrus latifolia Tan.)**. 2002. 62 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)–Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 339-352, 2006.

CASTRO, O. M. **Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1995. 174 f. Tese (Doutorado em Agronomia)—Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

CASTRO, O. M.; VIEIRA, S. R.; MARIA, I. C. Sistemas de preparo do solo e disponibilidade de água. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas. **Anais...** Campina: Fundação Cargill, 1987. p. 27-51.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the State of Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, no. 1, p. 45-51, 2002.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; XAVIER, A. A. P.; DEBIASI, H. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n.10, p.1254-1261, 2009.

DALMAGO, G. A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 245 f. Tese (Doutorado em Agronomia)—Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; KRÜGER, C. A. M. B.; BERGONCI, J. I.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 8, p. 780-790, 2010.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F. X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 7, p. 761-773, 1985.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, no. 1, p. 253-263, 1986.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FARIA, R. T.; CARAMORI, P. H.; CHIBANA, E. Y.; BRITO, L. R. S. CLIMA - Programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 372-387, 2003.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 85-91, 2004a.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Efeito da cobertura de resíduos de culturas na evaporação direta da água do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 193-201, 2004b.

GONÇALVES, A. O.; FAGNANI, M. A.; PERES, J. G. Efeitos da cobertura do solo com filme de polietileno azul no consumo de água da cultura da alface cultivada em estufa. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 622-631, 2005.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigodecorrente da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 352-356, 2006.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. 3. ed. New York: Academic Press, 1973. 288 p.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; DUSEK, D. A.; MAREK, T. H.; STEINER, J. L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, no. 4, p. 1019-1024, 1995.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO JÚNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 42, no. 3, p. 288-296, 2009.

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000 - versão 1.0. Londrina, 2000. CD-ROM

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. (Ed.). **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332 p. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 70).

KLOCKE, N. L.; MARTIN, D. L.; TODD, R. W. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, no. 5, p. 1590-1596, 1990.

LAL, R. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, no. 1, p. 1-3, 2007.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; LYRA, G. B.; SANTIAGO, A. V.; FOLEGATTI, M. V. Média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar e sua influência na evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith (FAO 56) em Piracicaba – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 328-337, 2004.

MODEL, N. S.; LEVIEN, R.; FROSI, R. A. Água armazenada e temperatura do solo em oito sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 41-49, 1995.

MUTZIGER, A. J.; BURT, C. M.; HOWES, D. J.; ALLEN, R. G. Comparison of Measured and FAO- 56 Modeled Evaporation from Bare Soil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.131, no.1, p. 59-72, 2005.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF, v. 12, n. 1, p. 239-258, 2001.

OLIVEIRA, R. A.; ROCHA, I. B.; SEDIYAMA, G. C.; PUIATTI, M.; CECON, P. R.; SILVEIRA, S. F. R. Coeficiente de cultura da cenoura irrigada nas condições edafoclimáticas do Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 280-284, 2003.

PREVEDELLO, C. L.; LOYOLA, J. M. T. R. Modelagem numérica para o processo da evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 669-675, 2005.

RITCHIE, J. T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resource Research**, Canberra, v. 8, no. 5, p. 1204-1213, 1972.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under various soil and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 119, no. 1, p. 20-26, 2010.

SILVA, F. A. M.; PINTO, H. S.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e soja utilizadas em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 717-724, 2006.

SOARES, W. R.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. N. Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimento ($K_{c_{ini}}$) à lâmina de irrigação e textura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 23-27, 2001.

SOUZA, K. B.; PEDROTTI, A.; RESENDE, S. C.; SANTOS, H. M. T.; MENEZES, M. M. G.; SANTOS, L. A. M. Importância de novas espécies de plantas de cobertura do solo para os tabuleiros costeiros. **Revista da FAPES**, Aracaju, v. 4, n. 2, p. 131-140, 2008.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso de água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 4, p. 835-841, 2000.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I. Influência de plantas de cobertura na temperatura e umidade do solo na rotação milho-soja em plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 1, p. 107-113, 2006.

TRIPLETT JÚNIOR, G. B.; DICK, W. A. No-tillage crop production: a revolution in agriculture! **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, no. 3, p. 153-165, 2008.

XIE, Z.; WANG, Y.; JIANG, W.; WEI, X. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, no. 1, p. 173-184, 2006.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, no. 1, p. 28-40, 2005.

ZHANG, G. S.; CHAN, K. Y.; OATES, A.; HEENAN, D. P.; HUANG, G. B. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, no. 1-2, p. 122-128, 2007.