

## MEDIÇÃO CONTÍNUA DE FLUXOS, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO EM UMA CULTURA DE SOJA

N. L. Dias<sup>1</sup>, Cristhiane M. P. Okawa<sup>2</sup>, Celso L. Prevedello<sup>3</sup> e Leonardo S. Rocha<sup>4</sup>

**Resumo** - Neste trabalho descrevemos os primeiros 5 meses de operação de uma estação especial do SIMEPAR que é capaz de monitorar continuamente diversas grandezas que não são usualmente medidas nas estações meteorológicas convencionais, tais como umidade e temperatura do solo em três níveis (2, 20 e 40 cm), fluxos superficiais, radiação líquida e radiação solar refletida, sobre uma cultura de soja em uma fazenda em Santa Terezinha do Itaipu. As medições realizadas até agora mostram que a maioria das variáveis “especiais” que nos propusemos a monitorar são de fato passíveis de medição contínua sem grandes esforços adicionais. Analisando a umidade do solo medida em resposta à precipitação ocorrida no mesmo período, percebemos a dependência das condições antecedentes de umidade e, provavelmente, do estado da cobertura vegetal. É interessante analisar os fluxos superficiais antes e após a colheita da soja, onde percebe-se a influência da cobertura vegetal na partição de energia na superfície entre os fluxos de calor sensível, latente e de calor no solo. Ao contrário da simplificação muitas vezes adotada de fluxo de calor no solo médio diário nulo, verificamos que existem relações lineares diárias genéricas com a radiação líquida média diária, e estabelecemos as equações correspondentes para este estudo.

**Abstract** - The first 5 months of operation of a special automated meteorological station able to measure surface fluxes and soil moisture continuously are reported. Besides the usual meteorological parameters, the station measures soil temperature and soil humidity at three levels (2, 20 and 40 cm), surface energy fluxes, net radiation and reflected solar radiation. Most of these variables have turned out to be measureable without significant additional effort in comparison with the usual set of air temperature, humidity, wind speed and direction, precipitation and downwelling solar radiation. The response of soil moisture to precipitation shows a large dependence on antecedent conditions, as expected, and probably on vegetation cover as well. The influence of the growing culture on surface fluxes and soil state variables is remarkable, and a sharp change in their

---

<sup>1</sup> SIMEPAR, Caixa postal 19100, CEP 81531-990, Curitiba, PR, tel.: (041) 366-2020-R.6354, fax: (041) 366-2122, nldias@simepar.br

<sup>2</sup> SIMEPAR, Caixa postal 19100, CEP 81531-990, Curitiba, PR, tel.: (041) 366-2020-R.6351, fax: (041) 366-2122, cris@simepar.br

<sup>3</sup> UFPR, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos, CEP 80001-970, Curitiba, PR, tel.: (041) 350-5648, fax: (041) 252-3689, clpreve@agrarias.ufpr.br

<sup>4</sup> SIMEPAR, Caixa postal 19100, CEP 81531-990, Curitiba, PR, tel.: (041) 366-2020-R.6377, fax: (041) 366-2122, lsrocha@simepar.br

pattern can be identified immediately after harvest. Contrary to the common assumption of zero mean daily soil heat flux, it shows linear relationships with mean daily net radiation, which however exhibit a large variability on the monthly time scale.

**Palavras-chave** – fluxos superficiais, umidade do solo.

## INTRODUÇÃO

O número de variáveis monitoradas rotineiramente em hidrologia é bem menor do que o que seria necessário para quantificar completamente o ciclo hidrológico. Ao final do século XX, a maior parte das redes hidrológicas continua a medir apenas duas variáveis (chuva e vazão) da mesma forma que se fazia há cem ou duzentos anos atrás, exceto naturalmente pela introdução de sistemas de aquisição e transmissão de dados automáticos.

Entre as variáveis que *não* são monitoradas normalmente incluem-se a evaporação (usada aqui com o sentido do fluxo *total* de vapor d'água entre a superfície e a atmosfera, incluindo a evaporação direta e a transpiração vegetal), a umidade do solo e outras características físicas importantes tais como sua temperatura, os níveis do lençol freático, etc. Esta falta de informação podia ser atribuída até recentemente à ausência de tecnologias suficientemente práticas e robustas para permitir o monitoramento dessas variáveis. Novas tecnologias estão surgindo, entretanto, que já permitem um monitoramento prático e contínuo de umidade do solo e, com algum esforço adicional, da evapotranspiração.

Informações sobre umidade e evapotranspiração são na verdade fundamentais para a compreensão do ciclo hidrológico e das interações superfície-atmosfera. Beljaars et al. (1996) mostraram que o estado de umidade do solo e a evaporação subsequente são fundamentais na dinâmica de precipitação convectiva do modelo global do Centro Europeu (ECMWF); uma versão do modelo global do ECMWF com um esquema de transferência solo-vegetação-atmosfera mais realista e corretamente inicializada com valores de umidade do solo foi capaz de simular muito melhor as chuvas intensas que ocorreram sobre os Estados Unidos em julho de 1993. Os mecanismos de retroalimentação (*feedback*) entre a superfície da terra e atmosfera também tem sido objeto de estudos tanto com modelos matemáticos (Brubaker e Entekhabi, 1996) como com dados medidos de umidade do solo (Findell e Eltahir, 1997); neste último caso, a partir de uma longa série de dados de umidade do solo (14 anos) foi possível relacioná-la estatisticamente com a precipitação subsequente durante o verão em Illinois, EUA.

Num artigo deste mesmo Congresso (Okawa et al., 1999), descreve-se a instalação de uma estação especial de monitoramento (Estação São Lourenço) em Santa Terezinha do Itaipu, PR, todos os seus sensores, e um experimento micrometeorológico simultâneo. Neste trabalho, nosso interesse é o acompanhamento contínuo, de 30 em 30 minutos, de diversas variáveis “não-convencionais” tais como a temperatura e a umidade do solo a 2, 20 e 40 cm de profundidade ( $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$  e  $T_{s3}$ ;  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_3$ , respectivamente), a radiação líquida  $R_l$ , o albedo  $\alpha$  e os fluxos de calor no solo  $G$ , calor sensível  $H$  e calor latente  $LE$ . Os dados foram medidos ao longo de 5 meses (1 de dezembro de 1998 a 30 de abril de 1999) e continuam sendo monitorados até a presente data.

## APARATO EXPERIMENTAL

A instalação da estação de São Lourenço foi realizada simultaneamente com o experimento micrometeorológico descrito em Okawa et al. (1999); a partir de então, a estação passou a funcionar automaticamente, com dois sistemas de aquisição de dados (devido ao grande volume de canais necessários), e coleta quinzenal de dados. Desde então, os sensores de temperatura e umidade do ar, temperatura do solo, umidade do solo, fluxo de calor no solo, radiação solar incidente e radiação solar refletida têm funcionado ininterruptamente sem apresentar qualquer defeito.

Pouco depois do fim do experimento micrometeorológico e do início da operação rotineira da estação, o sensor de resposta rápida de temperatura do ar (um termopar), parou de funcionar. Este sensor é formado por um termopar de diâmetro muito fino (0,076 mm), e está sujeito a ser danificado até mesmo por pingos de chuva ou ventos muito fortes. Note que o objetivo deste sensor *não* é medir a temperatura absoluta do ar, mas sim funcionar como um sistema simples de medição de covariâncias turbulentas juntamente com um anemômetro vertical de hélice de poliestireno (“isopor”), para medir o fluxo de calor sensível  $H$  (Blanford e Gay, 1992; Kustas et al., 1994, Okawa, 1998). Em visita de manutenção para trocar o termopar, constatou-se que os anemômetros vertical e horizontal instalados em dezembro de 1998 foram vandalizados nos feriados de Natal e Ano Novo, tendo sido alvo de tiros de espingarda de pressão; o sensor de radiação líquida também apresentava sinais de vandalismo. Os hélices dos anemômetros foram trocados, uma proteção adicional de isopor contra a radiação solar foi instalada sobre a conexão do termopar e o radiômetro líquido foi trocado. Apesar da proteção, o termopar superaquece durante o dia devido à exposição à radiação solar, e mede temperaturas muito mais altas que as reais; apesar disso, as flutuações de temperatura são corretamente estimadas. A figura 1 mostra a comparação da temperatura absoluta medida pelo termopar com a temperatura do ar a 10 m medida dentro de um abrigo plástico tipo *Gill*.

A estação foi reparada durante duas visitas entre (01/02/99) e (08/04/99). Desde então, ocorreram os seguintes problemas:

1. Em 02/03/99, a conexão do termopar com os terminais do sistema de aquisição de dados soltou-se, e a medição de  $H$  foi interrompida.
2. Em 07/04/99, a cúpula do radiômetro líquido foi danificada (aparentemente por granizo), mas o aparelho continuou a funcionar aparentemente sem maiores problemas até 16/06/99 quando a cúpula foi trocada.

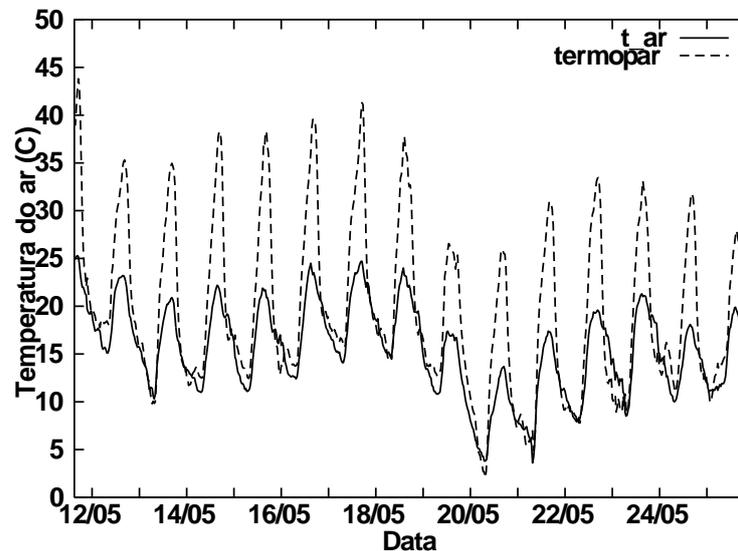


Figura 1: Comparação da temperatura absoluta medida pelo termopar e pelo termistor.

Um mês antes da instalação da estação, foi feita uma coleta de solo da região e levada para o Departamento de Solos da UFPR, onde os sensores de umidade de solo TDR (*time-domain reflectometry*) que seriam instalados (Campbell Scientific Instruments CS615), foram calibrados. Esta calibração foi feita com uma amostra de solo deformada e compactada, que foi saturada em laboratório e depois secada em estufa. A curva correspondente de calibração é

$$W_{cal0} = 1,0629 - 3,6792 e^{(-1,6978 x)},$$

onde  $W$  é a umidade volumétrica (entre 0,0 e 1,0) e  $x$  é a resposta do sensor (em mili-segundos). De acordo com o manual (Campbell Scientific, Inc., 1996), a saída do sensor é essencialmente uma onda quadrática com amplitude de  $\pm 2,5 V$  e uma frequência que é dependente da constante dielétrica do material que circunda as hastes. A umidade volumétrica causa variação na constante dielétrica, que por sua vez influencia na frequência de oscilação do multivibrador do sensor. A saída do multivibrador é conectada às hastes e age como uma onda guia. Um circuito digital converte a saída do multivibrador em uma frequência apropriada para medição com o datalogger. O período medido em mili-segundos é usado na calibração da umidade volumétrica. O coeficiente de determinação de (1) é  $r^2 = 0,9976$ . Embora esta relação seja provavelmente adequada para a camada superficial do solo, que é bastante compactada, verificou-se após o início das medições que ela provavelmente produz valores superestimados para os sensores situados a 20 e 40 cm de profundidade. Neste ponto, decidiu-se:

1. iniciar a coleta de amostras não-deformadas de solo natural em torno da estação a 2, 20 e 40 cm de profundidade a cada vez que se realiza a coleta de dados, ou seja, com a média de uma coleta a cada 15 dias. As amostras de solo são hermeticamente fechadas e enviadas ao laboratório do Departamento de Solos da UFPR para medições gravimétricas, e estão, progressivamente, gerando um conjunto de pontos para a calibração dos sensores de umidade. Este trabalho ainda está em progresso.

2. adotar interinamente as curvas de calibração padrão sugeridas pelo fabricante em função da faixa de condutividade elétrica dos solos da região para o cálculo de  $W_2$  e  $W_3$ , mantendo (1) para calcular  $W_1$ .

A curva de calibração padrão adotada interinamente é

$$w_{\text{padrão}} = -0,207 + 0,097x + 0,288x^2. \quad (2)$$

A figura 2 mostra uma comparação das duas curvas. Na seqüência deste trabalho, os dados de umidade  $W_1$  foram obtidos com (1) e os valores de  $W_2$  e  $W_3$  foram obtidos com (2). Note que para uma mesma resposta em milisegundos do sensor de umidade do solo na faixa usual de respostas (0,7 a 1,8 ms), (1) sempre estima uma umidade *maior* que (2).

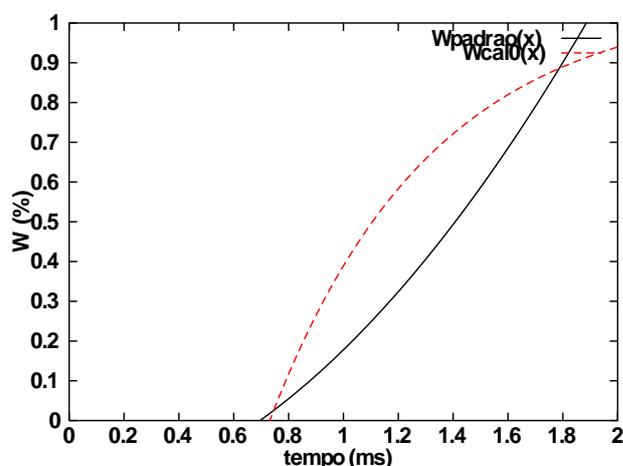


Figura 2: Curvas de calibração utilizadas para os sensores de umidade TDR: a linha vermelha corresponde à equação (1) e foi utilizada para o nível 1 (2 cm); a linha preta corresponde à equação (2), e foi utilizada para os níveis 2 e 3 (20 e 40 cm).

## RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Conforme mencionado, as medições de chuva e umidade do solo ocorreram sem incidentes desde o início, em 1/dez/1998; é sempre extremamente instrutivo plotar os registros de chuva e umidade do solo simultaneamente. Isto é feito na figura 3, como um exemplo particularmente interessante dos 5 meses de medição analisados neste trabalho. As medições de umidade a 2 cm apresentam um ciclo diário de flutuações, “aumentando” durante o dia e “diminuindo” durante a noite. Este comportamento está sendo estudado no Departamento de Solos da UFPR para ser explicado fisicamente; de qualquer forma, note a tendência de diminuição contínua da umidade da camada superficial do solo durante os períodos sem chuva (linha contínua); note também o aumento abrupto e considerável, de 35 para 60% em 11 de abril como resposta a uma chuva de 33 mm acumulada em 2 horas. No dia 15 de abril ocorreu uma chuva ainda maior, 107,6 mm acumulados entre as 05:30 e as 16:00 h.; desta vez entretanto a camada superficial do solo estava próxima da capacidade de campo, o que fez com que a água percolasse por gravidade para as camadas mais profundas, aumentando a umidade do solo a 40 cm em cerca de 20%. Este tipo de comportamento marcadamente diferente em função das condições antecedentes de umidade ilustra as dificuldades de modelação da fase “solo” do ciclo hidrológico.

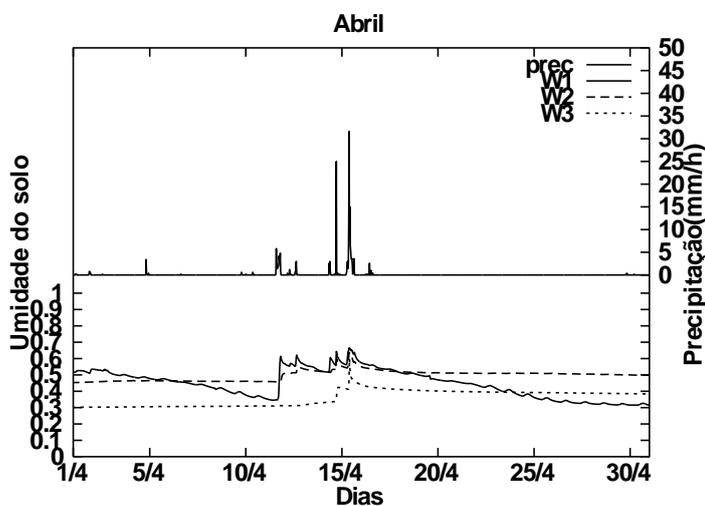


Figura 3: Comportamento da chuva e da umidade do solo a 2 (linha contínua), a 20 (linha tracejada) e a 40 (linha pontilhada) cm em abril de 1999.

Nós reunimos, por meio de uma análise subjetiva, este e outros casos de precipitação intensa e mudanças também grandes de umidade em vários níveis do solo na tabela 1. Nela, estão mostrados períodos de chuvas relativamente fortes, e o seu efeito

relativo sobre os níveis de umidade a 2, 20 e 40 cm. Novamente, nota-se efeitos diversos sobre as camadas mais profundas dependendo da condição de umidade da camada superficial.

Para evitar uma análise simplista dos dados de chuva e umidade do solo, os seguintes pontos precisam ser considerados:

- O pluviômetro está instalado *acima* da cultura de soja, que cresce continuamente entre dezembro e 27 de março, quando foi realizada a colheita. Portanto, é de se esperar que o efeito da interceptação vegetal seja crescente ao longo do tempo.
- A estação de São Lourenço está localizada num divisor de águas das bacias do reservatório de Itaipu e do rio Iguaçu, em uma região com topografia levemente ondulada (para ter uma idéia do relevo, veja as fotografias em Okawa et al. (1999)). Portanto, também é de se esperar um considerável escoamento superficial quando a camada superficial do solo estiver mais úmida.

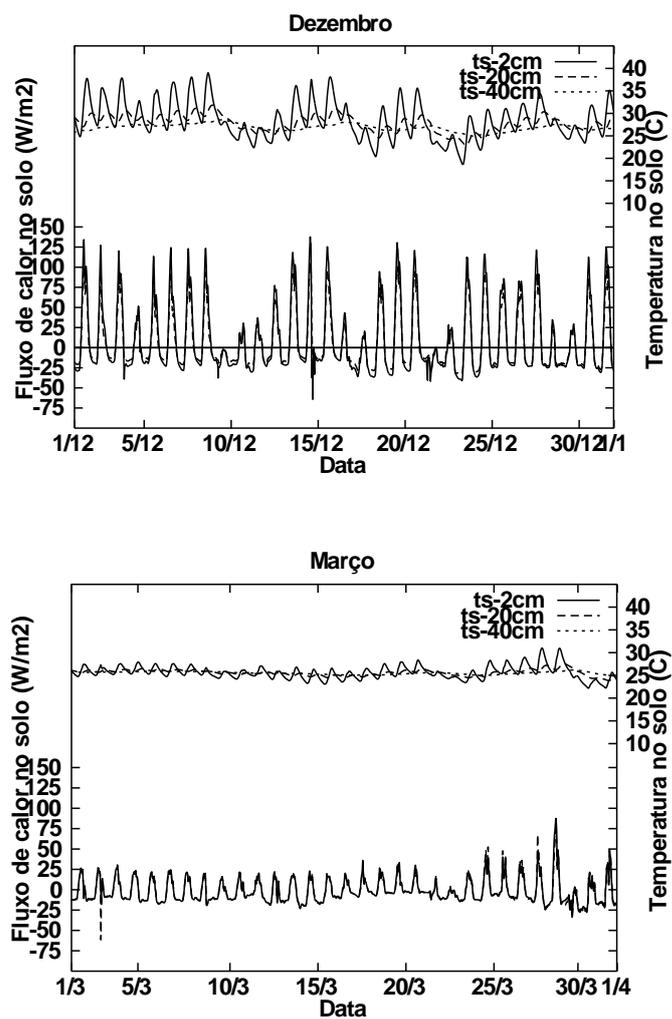
O efeito das mudanças causadas pelo crescimento da cultura de soja na interface superfície-atmosfera não são imediatamente visíveis nos registros de umidade do solo. No entanto, quando se analisa os dados de temperatura do solo e fluxo de calor no solo (medido com duas placas situadas a 10 cm de distância uma da outra e ambas enterradas a 2 cm de profundidade), a situação muda drasticamente.

Tab. 1 - Episódios de precip. intensa e seus efeitos sobre a umd. do solo a 2, 20 e 40 cm.

<b>Dia/mês</b>	<b>Horário</b>	<b>Chuva acum.</b>	<b><math>\Delta W_1</math> (%)</b>	<b><math>\Delta W_2</math> (%)</b>	<b><math>\Delta W_3</math> (%)</b>
16/12	21:30-22:00	16,2	10	0	0
21/12	09:30-16:30	108,4	40	15	10
28/12	14:00-17:30	5,4	10	0	0
04/01	14:30-15:30	35,4	30	2	1
11/01	20:00-21:00	32,8	30	0	0
12/01	21:30-22:00	5,2	2	0	0
19/01	00:30-04:30	14,0	20	0	0
19/01	15:30-16:30	30,0	15	7	3
21/01	18:00-18:30	11,2	10	3	0
31/01	13:30-14:00	11,4	5	0	0
02/02	09:30-10:00	6,8	13	0	0
02/02	14:00-14:30	5,2	3	0	0
08/02	16:30-19:00	73,2	30	15	10
13/02	18:30-19:00	16,2	20	0	0
14/02	05:00-09:00	31,2	20	12	6
16/02	14:00-15:00	15,2	15	3	1
23/02	15:30-16:00	13,0	20	0	0
01/03	16:00-16:30	5,8	5	0	0
02/03	15:30-17:00	43,8	26	20	2
21/03	07:30-13:30	33,4	30	0	0
22/03	10:30-15:30	13,6	4	11	0
29/03	10:00-12:30	11,6	12	0	0
11/04	14:00-20:00	33,0	25	5	0
12/04	13:30-16:00	6,8	5	2	0
14/04	16:30-17:30	26,0	7	6	8

15/04      05:30-16:00      107,6      8      8      20

A figura 4 mostra as grandezas citadas para os meses de dezembro (a), março (b) e abril (c).



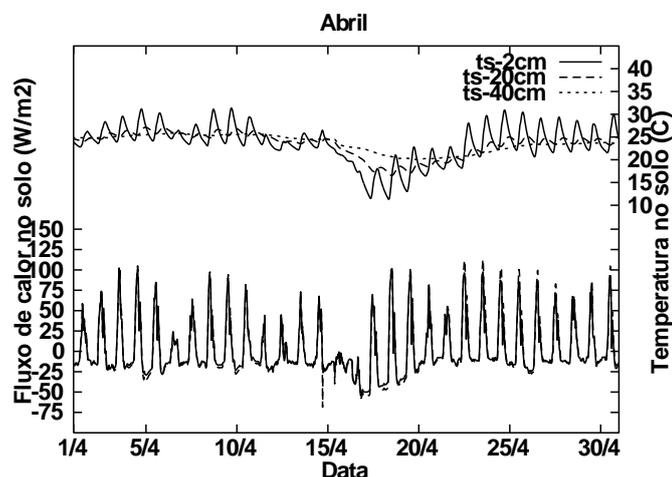


Figura 4: Temperatura do solo a 2, 20 e 40 cm de profundidade e fluxo de calor no solo a 2 cm de profundidade, em dezembro (a), março (b) e abril (c).

Em dezembro (figura 4-a), o solo ainda está parcialmente descoberto e a soja recém-plantada está apenas brotando; então, o ciclo diário da radiação solar reflete-se diretamente nas temperaturas a 2 e 20 cm de profundidade, enquanto que a 40 cm este sinal é quase imperceptível; mesmo assim, a temperatura do solo a 40 cm ainda exibe uma considerável variabilidade na escala de uma semana ou mais, à medida em que se alternam períodos frios e chuvosos com períodos de tempo bom. Por exemplo, os 10 primeiros dias de dezembro mostram temperaturas altas associadas com o tempo bom, com a temperatura a 40 cm exibindo uma tendência clara de subida; então, entre 11/12/98 e 14/12/98 ela volta a cair durante um período frio e chuvoso. Os fluxos de calor no solo a 2 cm,  $G$ , são altos, com valores máximos em torno de  $100 \text{ W m}^{-2}$  nos dias de tempo bom.

Em março (figura 4-b), a soja está bastante crescida, e a amplitude da variação de  $T_{s1}$  e  $T_{s2}$  é significativamente menor que em dezembro. Observe como o fluxo de calor no solo em março é consideravelmente menor, com máximos da ordem de apenas  $25 \text{ W m}^{-2}$ ; a penetração deste fluxo a 40 cm de profundidade é mínima, e conseqüentemente  $T_{s3}$  permanece praticamente constante até a data da colheita (27/03/99).

A colheita de soja produz mudanças drásticas: os fluxos de calor no solo, que vinham caindo gradativamente desde dezembro, voltam a subir para  $100 \text{ W m}^{-2}$  ou mais em fins de março e em abril; a amplitude da variação diária de  $T_{s1}$  e  $T_{s2}$  volta a subir,

agora que o solo está novamente nu; finalmente, detecta-se claramente o evento da forte friagem que ocorreu bem cedo em 1999, entre os dias 15 e 18 de abril: nestes 3 dias, a temperatura da superfície do solo cai nada menos que 10°C, e a temperatura a 40 cm cai 5°C; durante estes dias o fluxo de calor no solo permanece negativo o dia todo: o solo mais quente está cedendo energia para a atmosfera enquanto o ar sobrejacente permanece muito frio.

Uma outra questão de grande importância é o valor *médio* diário de  $G$ : frequentemente, ele é desprezado em estudos climatológicos que usam apenas dados meteorológicos médios diários. A equação de balanço de energia médio diário é então simplificada para

$$(R_1) = (H) + (LE), \quad (3)$$

$$(G) \approx 0, \quad (4)$$

onde  $(\cdot)$  indica uma média diária. A existência de um registro contínuo de valores de 30 minutos de  $G$  permite-nos testar a hipótese representada por (4). Para verificá-la, nós plotamos os valores médios diários de  $(R_1)$ ,  $(H)$ ,  $(LE)$  e  $(G)$ . Devido aos constantes problemas de quebra do termopar, apenas cerca de dois meses e meio dos cinco meses de medição avaliados neste trabalho possuem medições diretas de  $H$ ; o valor de  $LE$  a cada 30 minutos foi calculado pelo balanço de energia do período de 30 minutos correspondente:

$$LE = R_1 - H - G. \quad (5)$$

A figura 5 mostra o resultado dos valores médios diários dos fluxos ao longo de 5 meses. Note que, ao contrário do que se supõe muitas vezes, os valores médios diários  $(G)$  não são desprezíveis, permanecendo durante muitos meses da mesma ordem de grandeza que  $(H)$ . O efeito da colheita aparece novamente com muita clareza: depois que o termopar voltou a funcionar, verifica-se uma imediata intensificação do fluxo de calor sensível em detrimento da evaporação, como é de se esperar, já que não há mais plantas transpirando, e toda a evaporação deve ser evaporação direta do solo. Entretanto, é de se notar que o regime de chuvas da região mantém o solo bem suprido de água e a evaporação alta mesmo quando a vegetação foi retirada.

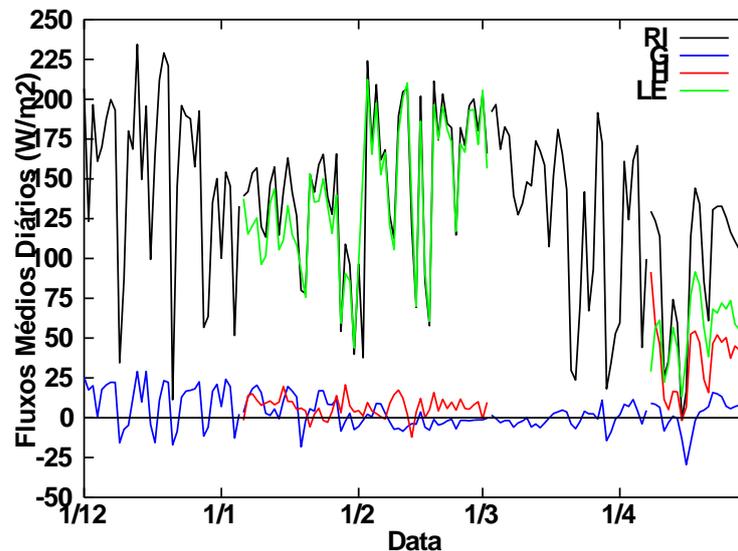


Figura 5: Valores médios diários dos fluxos de energia.

Nós procuramos estabelecer relações empíricas entre ( $R_1$ ) e ( $G$ ). Verificamos que é impossível estabelecer uma única relação para todos os cinco meses, porque o efeito sazonal devido ao crescimento da cultura é muito marcado; em vez disso, obteve-se 5 equações de regressão lineares, uma para cada mês:

dezembro: ( $G$ ) =  $0,20(R_1) + 20,0$ ,

janeiro: ( $G$ ) =  $0,23(R_1) - 22,0$ ,

fevereiro: ( $G$ ) =  $0$ ,

março: ( $G$ ) =  $0$ ,

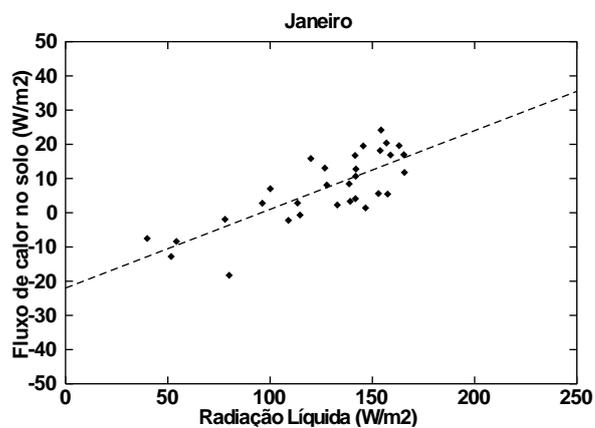
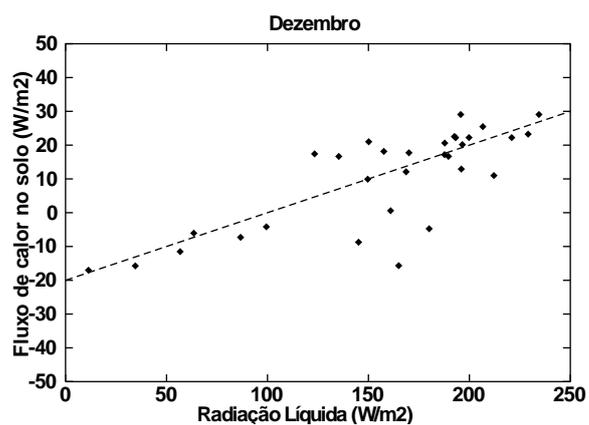
abril: ( $G$ ) =  $0,15 (R_1) - 10,0$ .

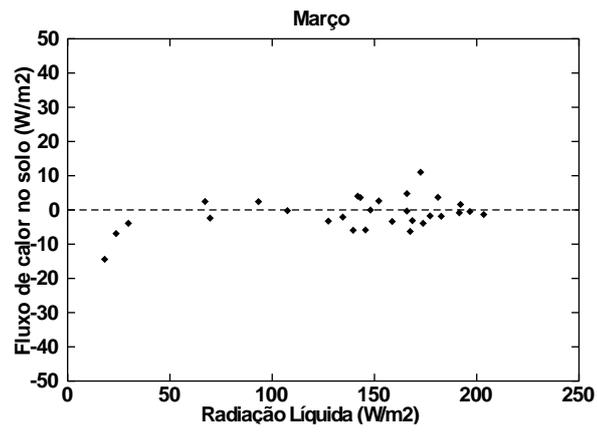
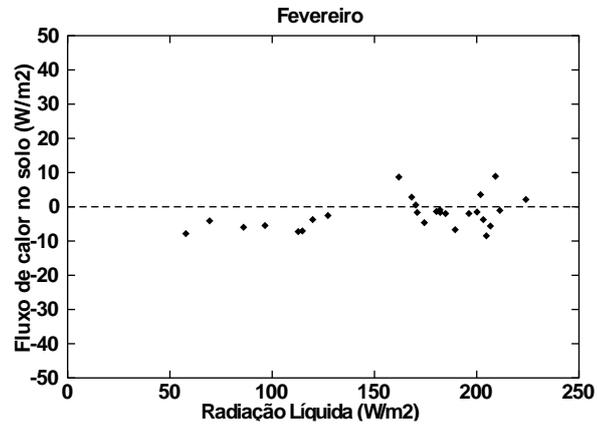
A figura 6 mostra os gráficos correspondentes.

### CONCLUSÕES

A falta de dados experimentais medidos ao longo de escalas de tempo “hidrológicas” (semanas, meses e anos) de variáveis tais como umidade do solo e evaporação tem sido um grande obstáculo ao progresso científico da hidrologia. Neste trabalho nós descrevemos os primeiros 5 meses de operação de uma estação especial do SIMEPAR que é capaz de monitorar continuamente um grande número de grandezas que

não são usualmente medidas. Estas grandezas são: radiação solar refletida, radiação líquida, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente (evaporação: calculada por balanço de energia), umidade do solo a 2, 20 e 40 cm de profundidade e temperatura do solo nestes mesmos níveis.





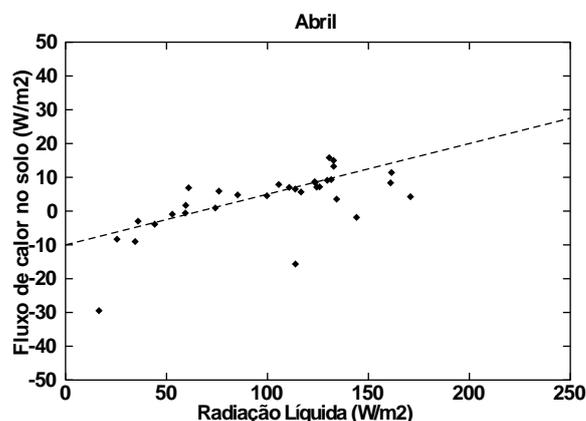


Figura 6: Regressões mensais de radiação líquida ( $R_l$ ) versus fluxo de calor no solo ( $G$ ) médios diários. Dezembro (a), Janeiro (b), Fevereiro (c), Março (d) e Abril (e).

As medições realizadas até agora mostram que a maioria das variáveis “especiais” que nós nos propusemos a monitorar são de fato passíveis de medição contínua sem grandes esforços adicionais. Os principais cuidados que se deve ter dizem respeito à correta instalação dos sensores no solo de maneira a “deformá-lo” ou perturbá-lo o menos possível. Além disso, para que as grandezas medidas reflitam a realidade, é necessário abandonar a filosofia tradicional de instalar estações meteorológicas cercadas e sobre um gramado previamente preparado. Muito ao contrário, nossa estação foi instalada no meio de uma plantação de soja, e o encarregado da fazenda foi instruído especificamente a garantir que o uso do solo em termos de plantio e manejo seja estritamente o mesmo do restante da fazenda. Isto garante que as medições reflitam fidedignamente a evolução sazonal do sistema solo-planta-atmosfera. Inevitavelmente, paga-se o preço de uma maior exposição da estação: tivemos problemas de vandalismo logo no início, mas desde então e após algum esforço de conscientização das pessoas que vivem na região, ela vem operando sem maiores problemas.

Nossas medições mostram a grande variabilidade da resposta da umidade do solo à chuva dependendo das condições antecedentes de umidade e, provavelmente, do estado da cobertura vegetal. Esta última tem um papel preponderante na partição de energia na superfície entre  $H$ ,  $LE$  e  $G$ : com o crescimento da soja, a amplitude de variação da temperatura da camada superficial de solo  $T_{s1}$  decresce sistematicamente entre dezembro e março, enquanto diminuem também a variabilidade de  $T_{s2}$  e  $T_{s3}$  nas escalas de dias a semanas, e a intensidade dos fluxos de calor no solo. Tudo isto se reverte rapidamente após a colheita, com uma grande intensificação nos valores de  $G$  e  $H$ , e a simultânea redução na evaporação  $LE$ .

Durante a passagem de sistemas atmosféricos extraordinariamente intensos, tais como a friagem de abril de 1999, o efeito pode se propagar até 40 cm de profundidade em poucos dias: durante a ocorrência da frente fria que produziu as temperaturas extremamente baixas deste episódio, o fluxo de calor no solo permaneceu sistematicamente negativo (dirigido do solo para a superfície).

Os fluxos medidos e suas médias diárias refletem claramente a rápida evolução da cultura de soja e sua grande influência sobre eles. Ao contrário da simplificação muitas vezes adotada de fluxo de calor no solo médio diário nulo, verificamos que existem relações lineares diárias genéricas com a radiação líquida média diária, mas cujos coeficientes apresentam uma forte variação sazonal.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELJAARS, A. C. M., Viterbo, P., Miller, M. J. e Betts, A. K. (1996). *The anomalous rainfall over the United States during July, 1993: sensitivity to land surface parameterization and soil moisture anomalies*. Monthly Weather Review, v.124, p. 362-383.
- BLANFORD, J. H. e Gay, L. W. (1992). *Tests of a robust eddy correlation system for sensible heat flux*. Theoretical and Applied Climatology, v.46, p. 53-60.
- BRUBAKER, K. L. e Entekhabi, D. (1996a). *Analysis of feedback mechanisms in land-atmosphere interaction*. Water Resources Research, v. 32(5), p. 1343-1357.
- CAMPELL Scientific, Inc. (1996). CS615 Water Content Reflectometer: *instruction manual*. Campbell Scientific, Inc., Logan, UT 84321-1784 USA, 10/96 edition.
- FINDELL, K. L. e Eltahir, A. B. (1997). *An analysis of the soil moisture-rainfall feedback, based on direct observations from Illinois*. Water Resources Research, v.33, p. 725-735.
- KUSTAS, W. P., Blanford, J. H., Stannard, D. I. , Daughtry, C. S. T., Nichols, W. D. e Wertz, M. A. (1994). *Local energy flux estimates for unstable conditions using variance data in semiarid rangelands*. Water Resources Research, v. 30(5), p. 1351-1361.
- OKAWA, C. M. P. (1998). *Medição contínua do fluxo de calor sensível para a atmosfera*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- OKAWA, C. M. P., Dias, N.L., Grodzki, L. e Prevedello, C. L. (1999). *Resultados de um experimento micrometeorológico em uma cultura de soja*. Em XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: Anais (CD-ROM), Belo Horizonte, MG. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.