

Estimativa de fluxo de calor no solo em Natal/RN baseado na derivada temporal fracionária de meia ordem

Marcos Aurelio Ferreira dos Santos¹

Fernando Moreira da Silva²

Filipe Emanuel Vieira Taveiros³

Resumo

O fluxo de calor no solo é um dos importantes componentes do balanço de energia de superfície, particularmente para regiões áridas e semiáridas. O objetivo deste trabalho foi realizar a estimativa do fluxo de calor no solo, a partir da temperatura do solo medida em uma única profundidade, baseado no método da derivada fracionária de meia ordem proposta por Wang e Bras (1999). Os resultados foram comparados com o fluxo de calor no solo medido através de placas de fluxo. Os resultados obtidos mostram excelente concordância entre o fluxo estimado a partir da solução adotada e o fluxo medido, permitindo estimativas de longo termo para o fluxo de calor no solo a partir da série temporal de temperatura medida em uma única profundidade.

Palavras-chave: Temperatura do solo; Cálculo fracionário; Fluxo geotérmico.

Abstract

The soil heat flux is one of the most important components of the surface energy balance, especially in arid and semi-arid regions. The objective of this work was to carry out to estimate of the soil heat flux from the soil temperature measured at a single depth, based on the half-order time derivative method proposed by Wang and Bras (1999). The results were compared with the soil heat flux measured through flux plates. The results obtained show excellent concordance between estimated flow from the adopted solution and the measured flow, allowing estimates of long term for the soil heat flux from the temporal series of temperature measured at a single depth.

Key words: Soil temperature; Fractional calculus; Geothermal flux.

Introdução

Na modelagem meteorológica e no balanço de energia de superfície na interface solo-atmosfera, o fluxo de calor no solo desempenha um papel importante. Em superfícies irrigadas e com total cobertura vegetal, estudos apontam que o fluxo de calor no solo é da mesma ordem que o fluxo de calor sensível (KUSTAS e DAUGHTRY, 1990; CLOTHIER et al., 1986). Para superfícies de solo seco, o fluxo de calor no solo poderá ser de até 50% da radiação líquida (IDSO et al., 1975). Mesmo tratando-se de florestas, o fluxo de

¹ Mestre em Recursos Hídricos (Saneamento Ambiental) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

² Pós-doutor e docente do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

³ Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

calor no solo representa de 30 a 50% da radiação líquida para a camada de vegetação rasteira (OGEE et al., 2001).

O fluxo de calor no solo pode ser medido diretamente utilizando sensores de fluxo de calor, entretanto este sensor deve ser instalado a certa profundidade do solo, e ainda assim também deve ser medida a temperatura nesta mesma profundidade para que se possa calcular o calor armazenado nesta profundidade. Vários métodos, como Kimball e Jackson (1975), Stull (1988), Malek (1993), e outros, têm sido desenvolvidos e aplicados no cálculo do fluxo de calor no solo, entretanto quase todos necessitam da temperatura do solo medida em pelo menos duas camadas, e a literatura (MAYOCCHIA e BRISTOW, 1995) afirma que o fluxo de calor no solo é frequentemente medido de forma incorreta, e erros são introduzidos nos cálculos do balanço de energia, especialmente para regiões semiáridas onde o papel do fluxo de calor no solo é de fundamental importância (HEUSINKVELD et al., 2003). Além disso, a necessidade de instalação de sensores de fluxo e sensores de temperatura do solo em diversas profundidades, pelos métodos convencionais, faz com que os projetos e experimentos de monitoramento para grandes áreas sejam inviabilizados, especialmente pelo custo dos vários sensores envolvidos, e isso se acentua quando se trata de projetos no Nordeste do Brasil (NEB), onde os recursos são ainda mais limitados.

Supondo que a temperatura da superfície varia senoidalmente, então se tem uma solução analítica para a equação de difusão de calor unidimensional para cálculo do fluxo de calor no solo a partir de medidas de temperatura do solo em uma única profundidade. No entanto, esta suposição de uma variação senooidal da temperatura pode fazer com que esta solução analítica não reflita de forma precisa o comportamento do solo (CAMPBELL e NORMAN, 1998). Wang e Bras (1999) propuseram um método fundamentado na derivada temporal de meia-ordem para resolver a equação de difusão térmica e para calcular o fluxo de calor no solo. A vantagem deste método é que requer medidas temporais de temperatura do solo em apenas uma camada ou profundidade. Wang e Bras verificaram seu método com dois tipos de dados. O primeiro conjunto de dados foi gerado resolvendo numericamente um conjunto completo de equações não-lineares de calor acoplado e transferência de água em uma coluna de solo unidimensional. O segundo conjunto de dados foi de observações (de 10-2 dias de duração) de dois experimentos: o primeiro projeto de ISLSCP experimento de campo (FIFE) e o projeto Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study (ABRACOS) (WANG e BRAS, 1999). Com os resultados os autores concluíram que a concordância

entre os valores estimados, utilizando o método, e os valores medidos de fluxo de calor no solo e temperatura é boa.

Cheng et al (2009) avaliaram o método da derivada temporal de meia-ordem de Wang e Bras (1999) para estimar o fluxo de calor no solo para estudos de longo termo, através de um experimento “in-situ” realizado em uma zona temperada e úmida próximo a Cork, na Irlanda. Esta experiência proporcionou, de um cenário ambiental real, obter as observações de campo contínuas necessárias para avaliar a capacidade do método em estimar o fluxo de calor no solo. Seus estudos concluíram que o fluxo de calor no solo previsto na superfície e a 5 cm de profundidade pelo método da derivada temporal de meia-ordem, estavam em boa concordância com os valores medidos demonstrando a eficácia do método para previsão do fluxo de calor no solo de superfície de longo prazo a partir de medidas de temperaturas efetuadas diretamente.

Os autores que utilizaram este método em trabalhos anteriores, basearam-se na definição da derivada fracionária desenvolvida por Miller e Ross (1993) para obter a equação do Fluxo de Calor no Solo, e utilizaram a solução discreta analítica baseada no método das diferenças finitas. Este trabalho buscou a solução da derivada fracionária de meia ordem, utilizando a definição da derivada fracionária proposta por Grünwald-Letnikov (ORTIGUEIRA e COITO, 2004), e implementada na ferramenta de desenvolvimento LabVIEW (acrônimo para Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), que é a linguagem de programação base da plataforma de projeto da National Instruments.

Assim, os objetivos do presente estudo são: (1) avaliar o método proposto por Wang e Bras (1999) para estimar o fluxo de calor a partir de medidas de temperatura do solo em uma única profundidade, através da solução proposta pelo autor deste trabalho, utilizando a derivada meiéssima implementada em LabView, comparando com os dados de fluxo de calor no solo medidos ‘*in situ*’, para um solo no litoral do nordeste brasileiro, em um cenário de observações de campo contínuas; (2) Verificar a resposta da implementação para períodos de curto e longo termo, analisando os dados estatísticos da relação entre os valores do fluxo de calor no solo estimados e medidos para períodos de 10, 30 e 120 dias.

Materiais e Métodos

Grande parte da área geográfica do Estado do Rio Grande do Norte caracteriza-se pela predominância do clima semiárido. Esta condição impõe limitações à exploração dos recursos naturais da região e condiciona as principais atividades básicas como a

agricultura, a pecuária e o uso dos recursos hídricos, o que termina por impor limitações ao próprio desenvolvimento sustentável do Estado. Tal situação exige dos órgãos governamentais soluções que visem racionalizar o uso desses recursos naturais. Na busca dessas soluções é fundamental que se adquira o conhecimento das particularidades climáticas da região que servirão de parâmetros para determinar o padrão de comportamento das variáveis que determinam o clima regional (FAPERN, 2007).

Para tornar viável a implantação de uma Rede de Meteorologia Estadual, formada por um sistema de coleta, armazenamento e tratamento de dados confiáveis, que de forma eficaz possa agilizar ações e promover a sustentabilidade das atividades de pesquisa, extensão e desenvolvimento, foi elaborado, submetido a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), e aprovado o projeto Rede de Monitoramento Meteorológico do Rio Grande do Norte (REMETERN).

Através deste projeto (REMETERN) foram instaladas estações automáticas de coleta de dados em várias cidades do estado do Rio Grande do Norte, e entre elas uma na cidade de Natal. Estas estações contam com sensores para medidas automáticas de parâmetros como Radiação Solar, Temperatura e Umidade do Ar, Direção e Velocidade do Vento, Chuva, bem como Temperatura e Fluxo de Calor no Solo.

Estas estações são mantidas pelo INPE/CRN e EMPARN, e os dados disponibilizados à comunidade.

A Estação de Natal/RN foi instalada em 21 de setembro de 2011 dentro do sítio da Estação Climatológica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), localizada no anel viário do Campus Universitário, nas coordenadas geográficas de 05° 50' 14,2" S; 35° 12' 27,9" W, e a 48,6 m de altitude (Figura 1).



Figura 1 – Mapa de localização da Estação Automática em Natal/RN.
(fonte do mapa de fundo: CPTEC)

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os dados de fluxo de calor no solo e de temperatura do solo coletados pela estação automática de Natal/RN.

Os dados são armazenados em um sistema de aquisição de dados ('*datalogger*') CR1000 da Campbell Scientific Inc., sendo alimentado continuamente por uma bateria de 12 volts/7.5 Acoplada a um painel solar com potência de 20W. Uma torre com 10 metros de altura é utilizada para suportar os sensores, o gabinete de proteção (caixa) do *datalogger*, e toda a estrutura de segurança de para raios. São medidos dados de Temperatura e Umidade do Ar, Pressão, Velocidade e Direção do Vento, Radiação Solar, Chuva, Temperatura do Solo e Fluxo de Calor no Solo.

Método

A equação unidimensional de difusão de calor para transporte de calor no solo pode ser escrita como (ARYA, 2001):

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial G}{\partial z}, \quad (1)$$

onde t é o tempo, z é a profundidade abaixo da superfície, T é a temperatura do solo, G ($W m^{-2}$) é o fluxo de calor no solo, ρ_s ($kg m^{-3}$) é a densidade do solo e c_s ($J kg^{-1} K^{-1}$) é o calor específico do solo; enquanto $\rho_s c_s$ ($J m^{-3} K^{-1}$) representa a capacidade térmica volumétrica C . Combinando a Eq. (1) e a lei de Fourier para o transporte de calor,

$$G = -k \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2)$$

obtem-se

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3)$$

onde k ($W m^{-1} K^{-1}$) é a condutividade térmica.

Assumindo uma difusividade térmica constante, D_0 , dada por $D_0 = k/C$, a Eq.(3) pode ser reescrita como

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (4)$$

O fluxo de calor no solo pode ser estimado resolvendo-se a equação diferencial (4). Para isso se faz necessário o conhecimento das condições iniciais e de contorno. É importante notar que a variação da temperatura do solo muito abaixo da superfície é próxima de zero; e o perfil de temperatura do solo inicial é uniforme em toda a camada de solo. Desta forma, as condições iniciais e de contorno para a temperatura do solo podem ser dadas por:

$$T=T_0, \text{ para } t=0, z \leq 0 \quad (5)$$

$$T=T_0, \text{ para } t > 0, z \rightarrow -\infty \quad (6)$$

onde T_0 é a temperatura inicial. A Eq. (5) afirma que as temperaturas iniciais do solo através de cada camada de solo são as mesmas, e exige que o cálculo do fluxo de calor no solo seja iniciado no momento em que o fluxo de calor no solo é zero.

Com base nas Eqs. (4) (5) e (6) e empregando a teoria matemática do cálculo fracionário da derivada temporal de meia-ordem, Wang e Bras (1999) deduziram a afirmação de que o fluxo de calor no solo, G , pode ser estimado pela temperatura do solo em qualquer profundidade e tempo, através da equação:

$$G(z,t) = \sqrt{\frac{kC}{\pi}} \int \frac{dT(z,s)}{\sqrt{t-s}} \quad (7)$$

onde s é o parâmetro de transformação de Laplace que constitui a variável de integração.

A integral da equação (7) é então resolvida aproximando a integração pelo método das diferenças finitas, e sua forma discreta é dada por:

$$G = 2 \sqrt{\frac{kC}{\pi}} x \sum_{i=0}^N \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i} [\sqrt{t_N - t_{i+1}} - \sqrt{t_N - t_i}] \quad (8)$$

onde N é o número de intervalos.

A partir do no método proposto por Wang e Bras (1999), têm-se que o gradiente da temperatura do solo pode ser expresso em termos da derivada temporal fracionária de meia ordem, como:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = \frac{1}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{\frac{1}{2}} [T(z,t) - T(0)]}{\partial t^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

e logo, aplicando à equação (9) a Lei de Fourier, o fluxo de calor no solo definido como positivo para o transporte de calor entrando no solo, pode ser expresso por:

$$G(z,t) = k \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = \frac{k}{\sqrt{D_0}} \frac{\partial^{\frac{1}{2}} [T(z,t) - T(0)]}{\partial t^{\frac{1}{2}}}, \quad (10)$$

como

$$D_0 = \frac{k}{C}, \quad (11)$$

então:

$$G(z,t) = \sqrt{kC} \cdot \frac{\partial^{\frac{1}{2}} [T(z,t) - T(0)]}{\partial t^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

Desta forma, neste trabalho buscou-se uma outra forma de implementar a derivada meiéssima contida na equação (12), diferente da empregada por outros autores, que buscam resolver a equação (7), proposta por Wang e Bras (1999), através de sua forma numérica discreta dada pela equação (8), baseada no método das diferenças finitas, e assim tentar minimizar possíveis erros embutidos no cálculo da integral da equação (7), e esta solução foi encontrada a partir da definição da derivada fracionária proposta por Grünwald-Letnikov (ORTIGUEIRA e COITO, 2004), utilizando-se um módulo implementado na linguagem de programação LabView da National Instruments.

Seguindo a notação de Podlubny (1999), o operador

$${}_a D_t^\alpha f(t) \quad (13)$$

representa a derivada de $f(t)$, para $\alpha > 0$, ou a integral de $f(t)$, para $\alpha < 0$, onde α e t denotam os limites da diferenciação ou integração fracionária.

Uma generalização para o cálculo fracionário pode ser obtida a partir da definição de Grundwald-Letnikov, como:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{r=0}^n (-1)^r \binom{\alpha}{r} f(t - rh) \quad (14)$$

onde h é o intervalo entre amostras,

e $n = \frac{t-a}{h}$ e $\binom{\alpha}{r} = \frac{\alpha!}{(\alpha-r)!r!}$ são os coeficientes binomiais.

Aplicando o operador (13) em (12), obtém-se a expressão utilizada para o cálculo do fluxo de calor no solo, como segue:

$$G(z,t) = \sqrt{kC} \cdot D_t^{\frac{1}{2}} [T(z,t) - T(0)], \quad (15)$$

Para a estimativa do fluxo de calor no solo utilizando o método proposto aplicando a equação (10), são necessárias as propriedades térmicas k e C , respectivamente, a condutividade térmica, expressa em $W.m^{-1}.K^{-1}$, e a capacidade térmica volumétrica expressa em $J.m^{-3}.K^{-1}$. Neste trabalho, o produto ($k.C$), a ser utilizado na equação (10), foi estimado utilizando 50% de dados medidos de temperatura e fluxo de calor no solo, e ajustando a curva do fluxo de calor estimado, de forma a minimizar o 'Root Mean Square Error' (*RMSE*) entre as curvas do Fluxo de Calor Estimado e o Fluxo de Calor Medido. A representação matemática numérica para este ajuste pode ser escrita como: minimizar *RMSE*, sendo *RMSE* dado por (FONSECA et al., 1985):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (Ge - Gm)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

onde N é a quantidade de dados. Portanto, uma vez que Ge contém o produto ($k.C$), o objetivo é encontrar o produto ótimo ($k.C$) que minimize *RMSE*.

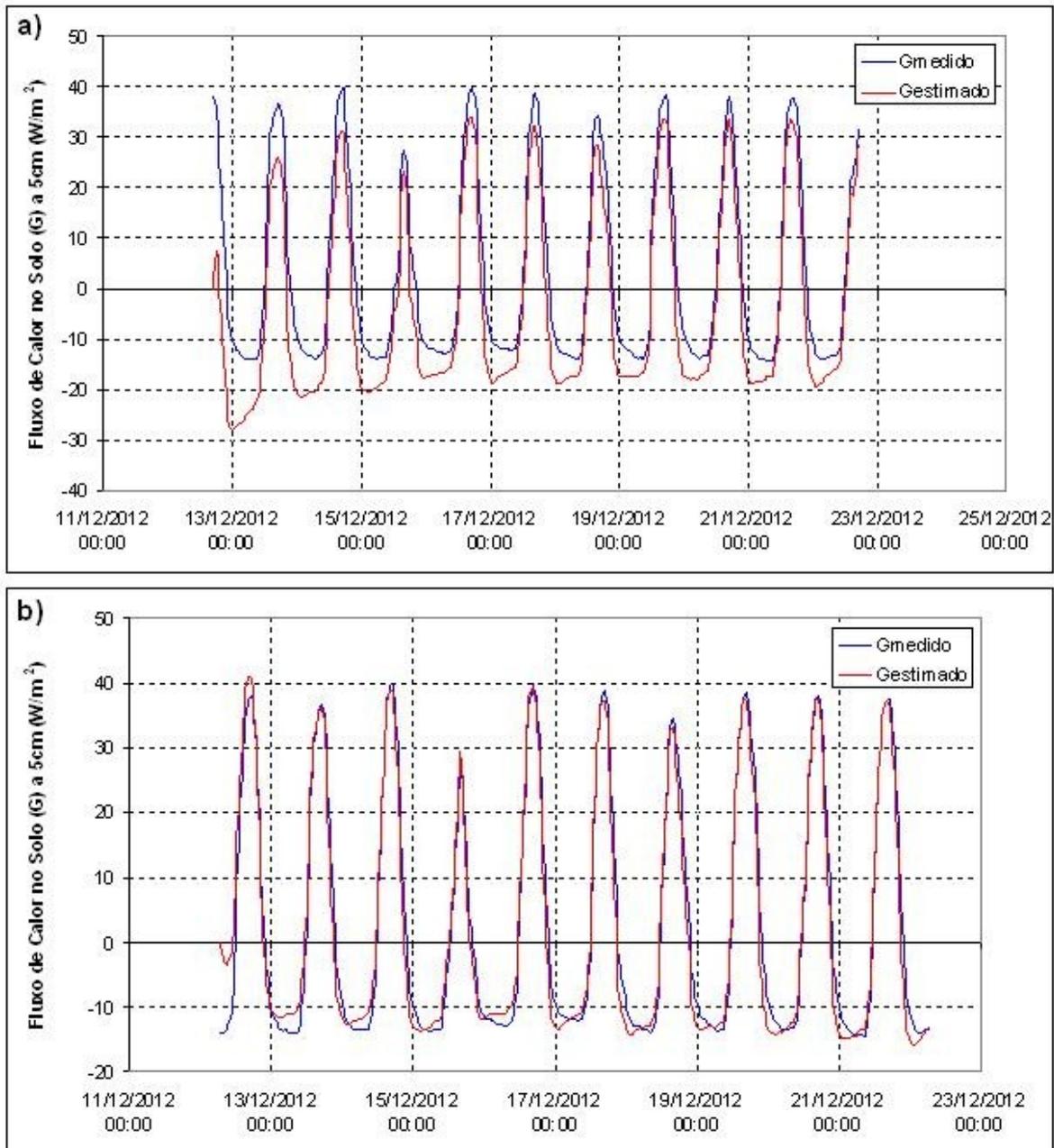
É interessante notar que os erros devido às propriedades k e C , são reduzidos pela dependência do fluxo estimado Ge com a raiz quadrada destes parâmetros.

Resultados e Discussão

Na definição do modelo são estabelecidas condições iniciais, para as quais o perfil inicial de temperatura do solo é uniforme, ou seja, a equação (5) ($T=T_0$; para $t=0$; $z \leq 0$) estabelece que a temperatura inicial do solo através de toda a camada é a mesma, de forma que o cálculo do fluxo de calor no solo seja iniciado no momento em que o fluxo de

calor é zero. Na verdade, não é simples determinar o momento para início de aplicação do modelo, uma vez que este exato ponto é desconhecido sem os dados de fluxo de calor no solo. De forma prática alguns autores consideram o início da noite ou à meia-noite o momento em que o fluxo de calor no solo é próximo de zero. Entretanto, com os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, observou-se que aplicando-se o método e comparando a curva de valores estimados com os valores de fluxo medidos, verificou-se que, independente do momento em que se inicial, a curva do fluxo estimado tende a sincronizar com a do fluxo medido, de forma que ao longo de algumas inversões diárias de fluxo (positivo para negativo ou vice-versa), pode-se determinar o horário aproximado em que o fluxo passa pelo zero, e então obtêm-se o horário para início de aplicação do método. Desta forma, mesmo sem conhecer os valores de fluxo medido, pode-se determinar, a partir da curva do fluxo estimado pelo método, o horário diário aproximado em que o fluxo passa pelo zero, e aí se aplica novamente o método, com os dados de temperatura a partir deste horário.

As figuras 2a e 2b foram geradas a partir dos dados de fluxo de calor no solo a 5 cm e temperatura do solo a 5 cm, obtidos a cada hora do mês de dezembro de 2012 na estação de Natal/RN. Os valores estimados de fluxo de calor no solo (Gestimado) foram gerados pelo modelo proposto neste trabalho, a partir dos dados de temperatura do solo a 5 cm. Estas figuras (2a e 2b) mostram a aplicação do método iniciando em instantes em que o fluxo medido não é zero. Conforme mostrado na figura 2a, o fluxo de calor no solo foi estimado a partir de um momento em que o fluxo de calor no solo é máximo, enquanto na figura 2b o método foi aplicado iniciando no momento em que o fluxo de calor no solo é mínimo. Verifica-se, portanto, que em ambas as situações os valores estimados não são coerentes em amplitude com o valor medido, entretanto verifica-se que a partir de algumas inversões diárias, a curva do fluxo estimado tende a passar pelo zero no mesmo instante do fluxo medido, ou seja, embora diferente em amplitude a fase dos fluxos medidos e estimados coincidem.



Figuras 2a e 2b – Curvas de Fluxo de Calor no Solo (G) a 5 cm, com a) início do cálculo de G estimado no momento em que o Fluxo de Calor no Solo é Máximo, e b) início do cálculo de G estimado no momento em que o Fluxo de Calor no Solo é Mínimo.

A partir dos resultados mostrados nas figuras 2a e 2b, escolheu-se uma data e horário em que o fluxo passa pelo zero para início do cálculo, uma vez que, conforme explicado acima, o cálculo deve ser iniciado no momento em que o fluxo é zero.

Portanto, aplicando a temperatura do solo medida a 5 cm, mostrada na figura 3, ao cálculo da derivada meiéssima da equação (12), e obtendo-se o valor do produto $(k.C)=2,35 \times 10^5 \text{ J}^2\text{m}^{-4}\text{K}^{-2}\text{s}^{-1}$, mediante a minimização do *RMSE* entre o fluxo de calor medido e o estimado, dado pela equação (16), conforme descrito anteriormente, calculou-se os

dados do fluxo de calor no solo estimado, apresentado no gráfico da figura 4, que mostra as séries temporais de fluxo de calor no solo medido (Gmedido) e o estimado pelo modelo (Gestimado), para um período de 10 dias.

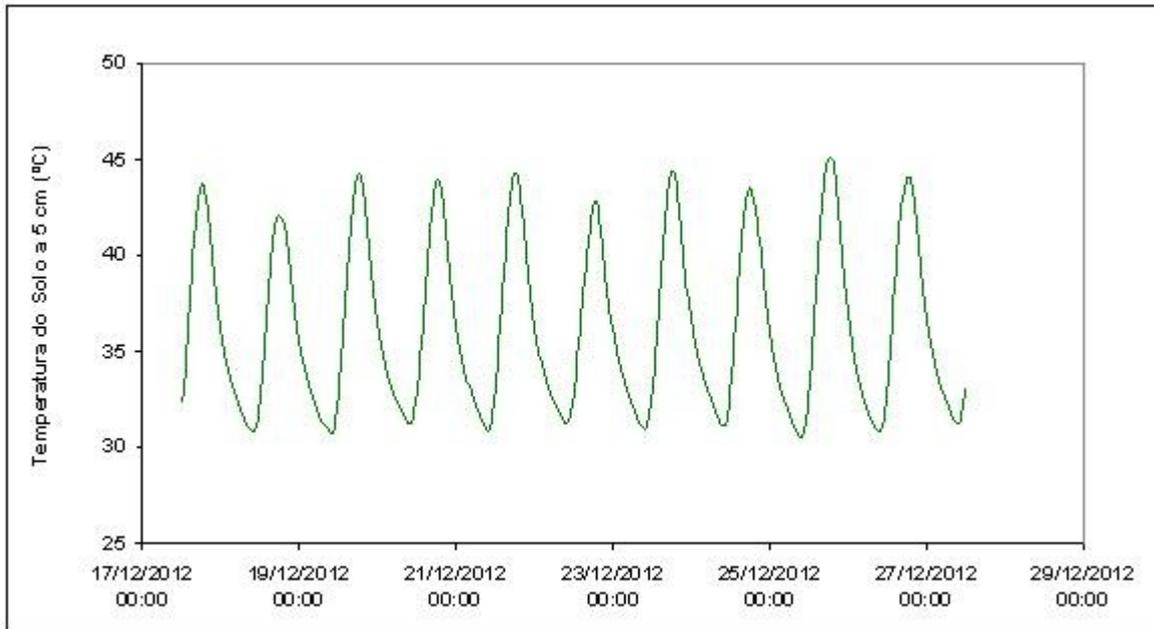


Figura 3 – Temperatura do solo medida a 5 cm de profundidade.

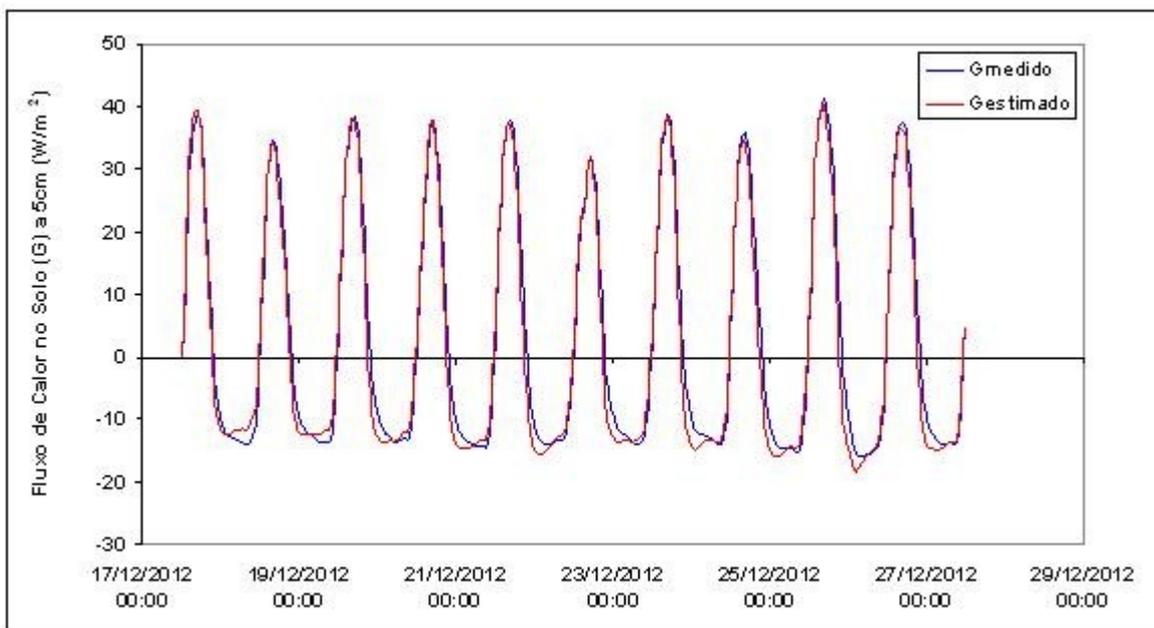


Figura 4 – Curvas de Fluxo de Calor no Solo a 5 cm medido (Gmedido) e estimado (Gestimado).

A figura 4 mostra que as maiores discrepâncias entre o Gmedido e o Gestimado são mais aparentes nos períodos de mínimos absolutos, onde o fluxo se inverte, assim o

método é menos sensível quando a radiação de ondas longas encontra-se acima da radiação de ondas curtas.

O gráfico de dispersão mostrando a relação entre o fluxo de calor no solo a 5 cm medido (G_{medido}) e estimado ($G_{estimado}$) é apresentado na figura 5. Os resultados apresentam uma correlação entre as curvas G_{medido} e $G_{estimado}$ de 0,99093, coeficiente de determinação $R^2 = 0,98194$, e erro padrão de estimativa de $2,56 \text{ W/m}^2$.

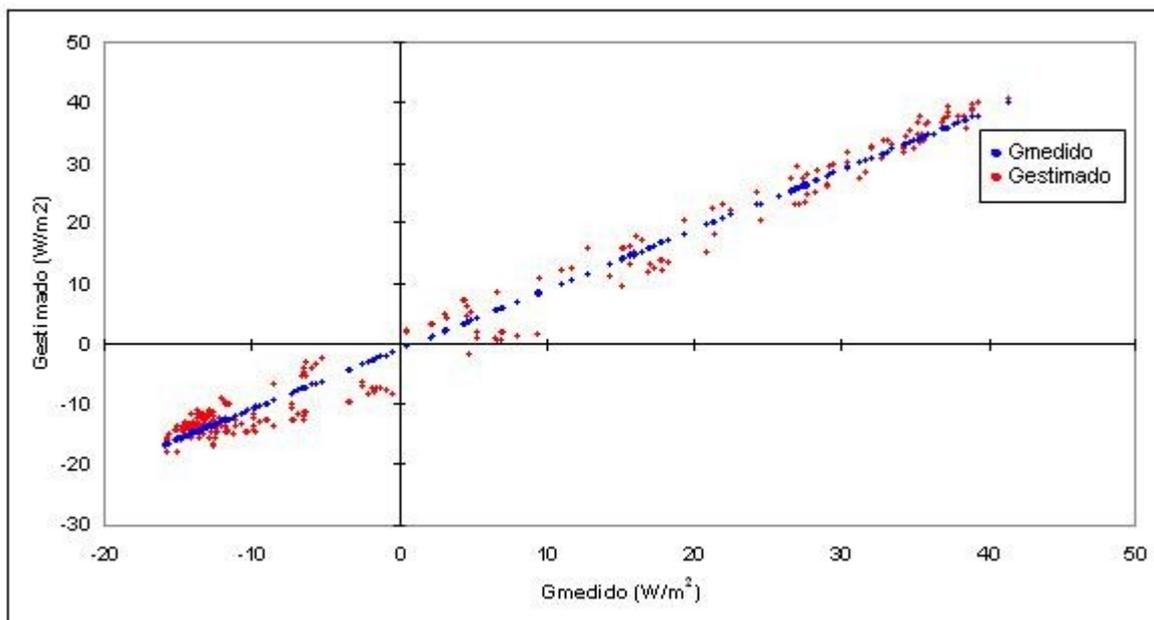


Figura 5 – Gráfico de dispersão relacionando o Fluxo de Calor no Solo a 5cm medido (G_{medido}) e estimado ($G_{estimado}$).

Os resultados mostram que o método utilizado é capaz de estimar o fluxo de calor no solo em uma determinada profundidade, a partir dos dados temporais da temperatura do solo naquela profundidade, com bom desempenho.

A estimativa de fluxo de calor no solo apresentada acima foi realizada para um período de 10 dias. Para verificar a resposta da metodologia para períodos de longo prazo, foram utilizadas as séries temporais da temperatura do solo e do fluxo de calor no solo, ambos a 5 cm de profundidade, para períodos de 30 e 120 dias (04 meses). A figura 6 mostra as séries temporais de fluxo de calor no solo medido (G_{medido}) e o estimado pelo modelo ($G_{estimado}$), para o período de 30 dias.

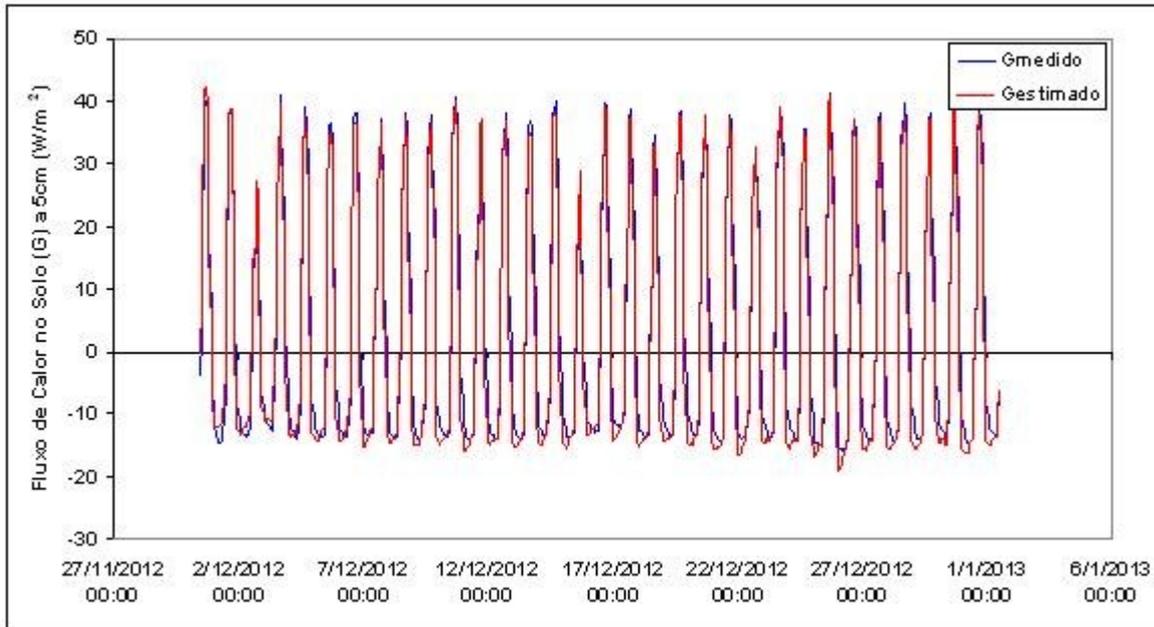
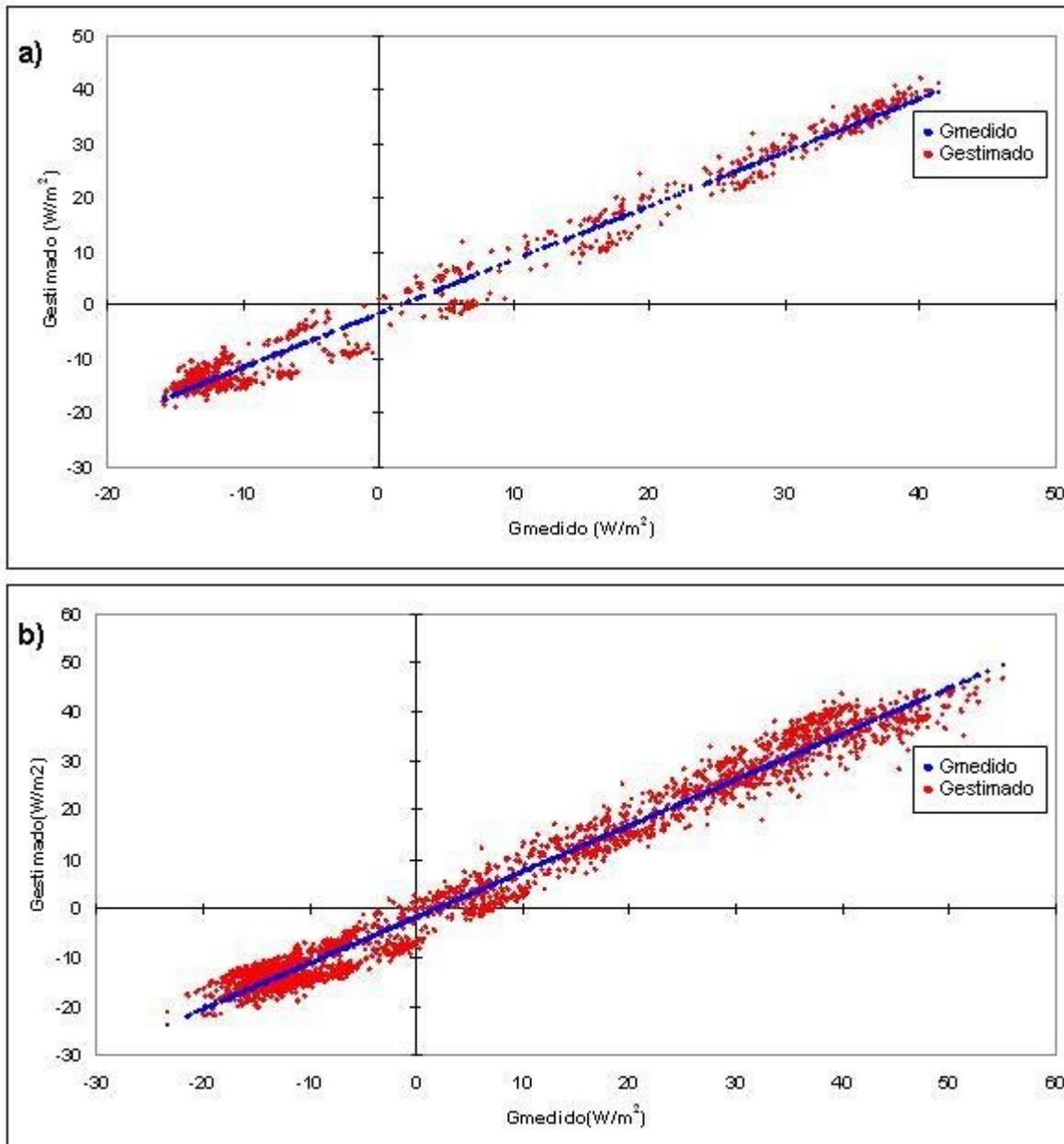


Figura 6 – Curvas de Fluxo de Calor no Solo a 5cm medido (Gmedido) e estimado (Gestimado), para o período de 30 dias.

A figura 7a mostra o gráfico de dispersão entre G medido e G estimado para um período de 30 dias, enquanto a figura 7b apresenta o gráfico de dispersão para um período de 120 dias (04 meses). Os resultados apresentam uma correlação entre as curvas Gmedido e Gestimado de 0,99069, coeficiente de determinação $R^2= 0,98147$, e erro padrão de estimativa de $2,59 \text{ W/m}^2$, para estimativa de um período de 30 dias, e para o período de 120 dias foram obtidos correlação de 0,98974, coeficiente de determinação $R^2= 0,97958$, e erro padrão de estimativa de $2,77 \text{ W/m}^2$. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados estatístico entre Gmedido e Gestimado, encontrados para estimativas de períodos de 10, 30 e 120 dias. Estes resultados mostram que o método apresenta também boa capacidade de estimativa do fluxo de calor no solo, para períodos de longo prazo.



Figuras 7a e 7b – Gráfico de dispersão relacionando o fluxo de calor no solo a 5 cm medido (Gmedido) e estimado (Gestimado) para um período de a) 30 dias, e b) 120 dias.

Os resultados encontrados, conforme apresentados na tabela 1, mostram que o método empregado permite estimar com excelente precisão o fluxo de calor no solo, não apenas em amplitude, mas também em sua tendência temporal.

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros estatístico para estimativas de fluxo de calor no solo.

Parâmetro	Período		
	10 dias	30 dias	120 dias
Correlação	0,99093	0,99069	0,98974
R ²	0,98194	0,98147	0,97958
Erro Padrão (W/m ²)	2,56	2,59	2,77

Considerações Finais

Neste trabalho examinou-se as respostas do método utilizando a derivada fracionária de meia ordem para estimativa do fluxo de calor no solo, utilizando-se a série temporal de temperatura do solo a uma profundidade de 5 cm. Foram verificadas as performances do método para períodos de curto e longo prazo. Os resultados mostraram que:

– diferente de outros métodos indiretos para estimativa de fluxo de calor no solo, o método necessita apenas da série temporal da temperatura do solo, o que permite reduzir consideravelmente os custos de implementação de projetos e experimentos de monitoramento, especialmente de grandes áreas com necessidade de medidas em vários locais, pelo custo dos vários sensores envolvidos, e isso se acentua quando se trata de projetos no Nordeste do Brasil, onde os recursos são ainda mais limitados;

– uma vez que o método se fundamenta na série temporal de dados de temperatura, para se obter uma boa estimativa de longo prazo, se faz necessária uma medição contínua, precisa e completa destes dados;

– os valores de fluxo de calor no solo estimados para a profundidade de 5 cm, mostraram-se concordante com o valores medidos, inclusive com correlações lineares (r) acima de 0,98, coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,97 e erros padrões médios entre 2,56 e 2,77 W/m², respectivamente;

– o conhecimento preciso das propriedades térmicas do solo k e C , para o período estimado, conduz a resultados mais precisos do fluxo de calor no solo estimado, uma vez que estas propriedades são variáveis no tempo e no espaço, entretanto os erros devido à estas propriedades, são reduzidos pela dependência do fluxo estimado.

Referências

CAMPBELL, Gaylon S.; NORMAN, John M. **An introduction to environmental biophysics**. Bartlett, Marietta, GA, 1998.

CHENG, I Hsieh; CHENG, Wei Huang; GER Kiel. **Long-term estimation of soil heat flux by single layer soil temperature**. Int. J Biometeorol, 2009.

CLOTHIER, Brent E.; CLAWSON, K. L.; PINTER, Paul J. Jr.; MORAN, M. Susan; REGINATO, Robert J., JACKSON, Ray. Estimation of soil heat flux from radiation during the growth of alfalfa. **Agricultural and Forest Meteorology**, 37:319–329, 1986.

FONSECA, Jairo Simon; MARTINS, Gilberto de Andrade; TOLEDO, Geraldo Luciano. **Introdução à estatística**. São Paulo: Atlas, 1985.

HEUSINKVELD, Bert G.; JACOBS, Adrie F.G.; HOLTSLAG, Albert A.M; BERKOWICZ, Simon Morris. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, 122: 21-37, 2004.

IDSO, Sherwood B.; AASE J. Kristian; JACKSON, Ray D. Net radiation–soil heat flux relations as influenced by water content variations. **Boundary Layer Meteorol**, 9:113–122, 1975.

KIMBALL, Bruce A.; JACKSON, Ray D. Soil heat-flux determination: a null-alignment method. **Agricultural and Forest Meteorology**, 15:1–9, 1975.

KUSTAS, William P.; DAUGHTRY, Craig S.T. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. **Agricultural and Forest Meteorology**, 49: 205-223, 1990.

MALEK, Esmail. Rapid changes of the surface soil heat flux and its effects on the estimation of evapo-transpiration. **Journal of Hydrology**, 142:89–97, 1993.

MAYOCCHI, Colin L.; BRISTOW, Keith L. Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Volume 75, Issues 1–3, June 1995, pp. 43–50.

MILLER, Kristin S.; ROSS, Brian. **An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations**. Wiley, New York, 1993.

OGEE, Jérôme; LAMAUD, Eric; BRUNET Yves; BERBIGIER Paul; BONNEFOND J.M. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, 106:173–186, 2001.

ORTIGUEIRA, Manuel Duarte; COITO, Fernando. **Fractional Calculus and Applied Analysis - From Differences to Derivatives** 7(4): 459-71, 2004.

PODLUBNY, Igor. **Fractional Differential Equations**. Academic Press, New York, 1999.

STULL, Roland B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Kluwer, Dordrecht, 1988.

WANG Jingfeng.; BRAS Rafael L. Ground heat flux estimated from surface soil temperature. **Journal of Hydrology**, 216:214–226, 1999.

Recebido em Maio de 2013.

Publicado em Agosto de 2013.