

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE MESTRADO**

**FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA EM  
PASTAGEM DE CAPIM BRAQUIÁRIA COM GRAU DE  
COBERTURA VARIÁVEL**

**João Paulo Chaves Couto**

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA  
AGOSTO - 2016**

**FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA EM  
PASTAGEM DE CAPIM BRAQUIÁRIA COM GRAU DE COBERTURA  
VARIÁVEL**

**João Paulo Chaves Couto  
Engenheiro Agrônomo  
Universidade do Estadual do Sudoeste da Bahia, 2014**

Dissertação submetida ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA  
AGOSTO - 2016**

## FICHA CATALOGRÁFICA

C871f

Couto, João Paulo Chaves.

Fluxo de calor no solo e radiação líquida em pastagem de capim braquiária com grau de cobertura variável / João Paulo Chaves Couto. - Cruz das Almas, BA, 2016.  
79f.; il.

Orientador: Aureo Silva de Oliveira.  
Coorientador: Lucas Melo Vellame.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

1.Solo – Efeito da radiação. 2.Solo – Propriedades físico-químicas. 3.Capim-braquiária – Plantio – Avaliação. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 631.41

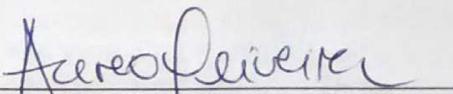
Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA EM  
PASTAGEM DE CAPIM BRAQUIÁRIA COM GRAU DE COBERTURA  
VARIÁVEL**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de  
João Paulo Chaves Couto

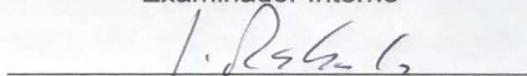
Aprovada em 15 de agosto de 2016



Prof. Dr. Auro Silva de Oliveira  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas - UFRB  
Orientador



Prof. Dr. Maurício Antônio Coelho Filho  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas - UFRB  
Examinador Interno



Prof. Dr. Jorge Luiz Rabelo  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - UFRB  
Examinador Externo

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Edmundo Pereira Couto e Maria do Carmo Chaves Couto (*in memoriam*) pela benção da vida, pela educação, respeito e amor a mim depositados.

Aos meus irmãos Tássisia Chaves Couto e Ravene Chaves Couto pela união e companheirismo durante toda jornada acadêmica, bem como pela confiança depositada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, fonte inesgotável da minha fé, pela dádiva da vida; sempre me abençoando com saúde e paz e me mantendo focado nos meus objetivos.

Aos meus pais, razão da minha existência e fonte de inspiração;

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela infra-estrutura, bem como pelo conhecimento a mim oferecido;

Ao Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira pela orientação, amizade, incentivo, respeito, sendo importante para o desfecho da realização deste trabalho;

A Eloísa, pelo carinho, compreensão, companheirismo, mostrando-se presente em todos os momentos;

Ao Prof. Dr. Cristiano Tagliaferre pelo apoio e ensinamentos durante o período de curso;

Aos meus amigos pelo carinho, amizade e apoio, fazendo-me perceber o quão importante a perseverança em alcançar almejados objetivos mesmo diante das dificuldades;

Enfim, a aqueles que, de alguma maneira, influenciaram na minha qualificação profissional na conclusão deste trabalho.

**MUITO OBRIGADO!**

## EPÍGRAFO

*“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas. A persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça aquilo que a maioria não faz.”.*

*(Bill Gates)*

## FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA EM CAPIM BRAQUIÁRIA COM GRAU DE COBERTURA VARIÁVEL

**RESUMO:** O fluxo de calor no solo ( $G$ ) é um importante componente do balanço de energia e se refere à quantidade de energia térmica transferida a níveis inferiores do solo por unidade de área durante determinado período de tempo. O uso de placas de fluxo de calor no solo é muito utilizado em diversos estudos envolvendo balanço de energia e demanda hídrica. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos modelos de placas de fluxo de calor no solo HFT3.1 (*Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, Washington, USA*) e HFP01 (*Hukseflux, Thermal, Delft, Netherlands*) denominadas REBS e HUKS respectivamente. Além disso, o trabalho objetivou encontrar uma relação do saldo de radiação ( $R_n$ ) e o grau de cobertura do solo para estimar o fluxo de calor no solo em superfície vegetada por capim braquiária. Uma estação meteorológica automática foi instalada no *Campus* da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB na cidade de Cruz das Almas para obtenção dos dados das variáveis de solo e de atmosfera para o estudo. As placas de fluxo de calor apresentaram performance semelhantes quando comparadas dentro do mesmo modelo, bem como modelos de diferentes fabricantes, sendo possível estimar os valores de HUKS, baseado nos valores de REBS. Foi observado que a relação  $G/R_n$  sofreu interferência do grau de cobertura do solo, sendo  $G$  representado por 23, 12 e 1 % de  $R_n$  para solo nu, parcialmente, coberto e totalmente coberto. Dessa forma, obteve-se, nesses estudos, modelos matematicamente com elevados coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

**Palavras-chave:** Balanço de energia; cobertura do solo; saldo de radiação.

## SOIL HEAT FLUX AND NET RADIATION IN BRAQUIÁRIA GRASS WITH VARYING GROUND COVER

**ABSTRACT:** The soil heat flux on the ground ( $G$ ) is an important component of the energy balance and refers to the amount of thermal energy transferred to lower soil levels for unit area during a given period of time. The use of heat flow plates in the soil is widely used in several studies involving energy balance and water demand. The objective of this study was to evaluate the performance of models of heat flow plates in soil HFT3.1 (Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, Washington, USA) and HFP01 (Hukseflux, Thermal, Delft, Netherlands) called REBS and HUKS respectively. In addition, the study aimed to find a ratio of net radiation ( $R_n$ ) and soil coverage degree to estimate the heat flux in the soil in vegetated surface for braquiária grass. An automatic weather station was installed on the campus of the Federal University of Bahia Reconcavo - UFRB in the city of Cruz das Almas to obtain the data of soil variables and atmosphere for the study. The heat flux plates exhibited similar performance when compared within the same model as well as models of different manufacturers, it is possible to estimate the huKS values based on the values REBS. It was observed that the ratio  $L / R_n$  suffered interference degree of ground cover, being represented by L 23, 12, and 1% to  $R_n$  bare soil, partially covered and wholly covered. Thus, was obtained in these studies, models mathematically with high coefficient of determination ( $R^2$ ).

**Key-words:** Energy balance; soil cover; net radiation.

## SUMÁRIO

|  | Página |
|--|--------|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 10     |
| <b>CAPÍTULO I</b>  |        |
| AVALIAÇÃO DE PLACAS DE FLUXO DE CALOR NO SOLO EM ÁREA DE CAPIM<br>BRAQUIÁRIA .....                             | 18     |
| <b>CAPÍTULO II</b>   |        |
| RELAÇÃO FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA PARA GRAU DE<br>COBERTURA VARIÁVEL DE CAPIM BRAQUIÁRIA ..... | 46     |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | 76     |

## INTRODUÇÃO

O fluxo de calor no solo é um importante componente nos estudos envolvendo balanço energético no sistema solo-planta-atmosfera, o qual justifica tanto o armazenamento quanto a transferência de calor dentro do solo, bem como as trocas existentes entre a superfície do solo e a atmosfera. Dessa forma, conforme Pereira et al. (2007), a energia solar é a fonte primária de energia para todos os processos terrestres, desde a fotossíntese, responsável pela produção vegetal e manutenção da vida na presente forma, até o desenvolvimento de furacões, tempestades, enfim, pela circulação geral da atmosfera e oceanos, afetando todos os outros elementos (temperatura, pressão, vento, chuva, umidade etc.).

A quantidade de energia que fica retida na superfície, definida como saldo de radiação, é utilizada nos fenômenos físicos e biológicos como o aquecimento do solo e do ar, a evapotranspiração e a fotossíntese respectivamente (ALLEN et al., 2011; SOUZA et al., 1999). Segundo Santos (2009), o saldo de energia em uma superfície estão em equilíbrio, conforme a lei de conservação de energia, e a energia disponível para uma dada superfície é quantificada pelo balanço de radiação e balanço de energia.

De acordo com Fietz e Fisch (2009), o  $R_n$  é o elemento meteorológico que exerce a maior influência na evapotranspiração. Com isso, a equação que expressa o balanço de energia para uma superfície evaporante é a seguinte:

$$R_n = G + \lambda ET + H \quad (1)$$

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação,  $G$  o fluxo de calor do solo,  $\lambda ET$  o fluxo de calor latente e  $H$  o fluxo de calor sensível.

Segundo Allen et al. (1998), o  $R_n$  é influenciado pelos fluxos e, em geral, é positivo durante o dia e negativo a noite devido à ausência do sol, variando no tempo e no espaço (SENTELHAS & NASCIMENTO, 2003), sendo sua estimativa fundamental para aplicações em recursos hídricos e modelagens climáticas (ALFARO, 2009).

As transferências de massa e calor na interface superfície-atmosfera são causadoras de numerosos fenômenos que interferem direta e indiretamente na

produção agrícola, caracterização do microclima local e identificação de efeitos de atividades antropogênicas (DANELICHEN, 2012; SOARES, 2013; BIUDES et al., 2009). Estudos micrometeorológicos vêm sendo utilizados para estimar as trocas de energia e matéria em áreas naturais ou modificadas (GALEANO et al., 2013).

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) é a energia utilizada no aquecimento do solo, o que é um importante componente do balanço de energia em dosséis vegetativos, bem como para cálculos da evapotranspiração ( $ET$ ) em modelagem. Segundo Payero et al. (2005),  $G$  representa a quantidade de energia radiante absorvida ou liberada na superfície do solo durante um determinado período de tempo.

Sendo assim, o valor de  $G$ , quando positivo, representa um aquecimento do solo, quando negativo, significando que o solo está em processo de resfriamento. Os processos físicos, químicos e biológicos, ocorrentes no solo, dependem, de algum modo, da temperatura, umidade e, conseqüentemente, do fluxo de calor no mesmo (CARNEIRO et al., 2013). Assim, os autores ressaltam que o fluxo de calor no solo é intrinsecamente dependente das propriedades físicas do solo, as quais envolvem a condutividade térmica, a difusividade térmica e a capacidade calórica volumétrica.

A maioria das medidas de densidade de fluxo de calor no solo são obtidas por meio dos métodos de calorimetria, gradiente, placa de fluxo, ou combinado. O primeiro é utilizado para determinar a densidade do fluxo de calor no solo a partir da variação do calor armazenado no solo ao longo de um intervalo de tempo, sendo que a temperatura e a inércia térmica são os únicos dados de entrada necessárias para o procedimento do método. O método gradiente consiste na aplicação direta da lei de *Fourier*, em que um gradiente de temperatura medido é combinado com a condutividade térmica estimada ou medida para determinar  $G$ .

Muitos estudos têm considerado o uso de placas de fluxo de calor no solo (também chamadas de medidores de fluxo de calor ou transdutores de fluxo de calor), que são pequenos discos rígidos com propriedades físicas conhecidas. Essas placas medem, diretamente, a densidade do fluxo de calor que é proporcional à densidade do fluxo de calor no solo. Já o método combinado inclui a combinação dos métodos gradiente e calorimetria e, em alguns casos, a combinação de placas de fluxo de calor e calorimetria.

O fluxo de calor no solo pode ser medido através de placas de fluxo de calor no solo. Essas medições, no entanto, precisam ser corrigidas para o calor armazenado

acima das placas de fluxo de calor no solo. Essa correção é, geralmente, estimada usando medições de temperatura do solo e umidade próxima da superfície (HANKS E ASHCROFT, 1980). Payero et al. (2005) afirmam, ainda, que o fluxo de calor no solo tem sido estimado para diferentes superfícies, usando vários métodos, alguns dos quais consideram  $G$  ser uma simples fração de  $R_n$ .

Quando o fluxo de calor no solo é medido a uma profundidade abaixo da superfície, o método combinado inclui correção para o armazenamento de calor sensível na camada de solo entre a profundidade de medição e a superfície do solo com base na variação da temperatura em função do tempo e da capacidade de calor no solo (HEITMAN et al., 2010). Para Kustas et al. (2000), o fluxo de calor no solo ( $G$ ) é estimado colocando placas de fluxo de calor no solo a uma profundidade que varia de 5 a 10 centímetros, usando sondas de temperatura do solo acima das placas para estimar o armazenamento de calor no mesmo. No entanto, a colocação de fluxímetros em uma profundidade mais rasa pode introduzir erros muito maiores, em comparação com a implantação mais profunda (AGAM et al., 2012). Apesar de haver transporte de energia por radiação e convecção em camadas mais rasas do solo, na maioria dos casos, a condução é o principal meio de transferência de energia (SAUER & HORTON, 2005).

Há incerteza quanto ao número de sensores necessários para obter um fluxo de calor no solo representante para a maioria das superfícies heterogêneas (AGAM, et al., 2012). De acordo com os autores, existem limites práticos ao número de sensores que podem ser usados para obtenção de um valor representativo dentro de vários metros de uma torre de fluxo. Payero et al. (2005) afirmam que, mesmo  $G$  sendo ignorado, sua contribuição para evapotranspiração diária tem sido significativa, principalmente, quando a ET é calculada em escala de tempo superior à diária.

Kustas et al. (2000) confirmam que, para solos nus e escassamente cobertos,  $G/R_n$  é máximo no meio da manhã e diminui a zero no final da tarde. Como resultado, os valores de  $G/R_n$  meio-dia não são representativos de todo o ciclo diurno e, ignorando a assimetria na  $G/R_n$  sobre meio-dia solar, pode levar à subestimação do  $G$  na parte da manhã e à superestimação de  $G$  na parte da tarde em até 50 % (SANTANELLO JR. & FRIEDL, 2002).

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) pode ser influenciado por uma série de fatores, por exemplo, Arshad & Azooz (1996) observaram diferentes medidas de  $G$  em solo sob

preparo convencional, plantio direto e plantio direto modificado. Já em estudos realizados por Gupta et al. (1984), foi observado que medições horárias de  $G$  para solo nu são superestimadas, quando comparadas com o solo coberto com resíduo na condição de plantio direto.

De acordo com Soares (2013), o fluxo de calor no solo é controlado pela sua condutividade térmica e pelos gradientes de temperatura. Estes são variáveis com a cobertura fracional da vegetação e o índice de área foliar (IAF) devido à interceptação de luz e a formação de sombra. O solo nu também influencia esse gradiente, uma vez que condiciona o aquecimento da superfície do solo (DANELICHEN, 2012). Além disso, o autor, ainda, afirma que a umidade do solo afeta a condutividade térmica, sendo que esta propriedade influencia a condução de calor da superfície.

Segundo Bezerra et al. (2008), a relação  $G/R_n$  é fundamentada na configuração do sistema solo-planta e varia em função do tipo de solo e umidade, bem como o tipo de vegetação (ALLEN et al., 2005; SANTOS et al., 2010) e o microclima local (ALLEN et al., 2007). Segundo Kustas et al. (2000), em superfícies uniformes com cobertura de vegetação alta,  $G$  representa, normalmente, uma fração de 5 a 10% de  $R_n$  durante meio-dia, podendo ser estimado com razoável confiabilidade, utilizando-se de 3 a 5 sensores. No entanto, os autores afirmam que, sob uma cobertura parcial do dossel,  $G$  passa a ser uma fração muito mais significativa em relação a  $R_n$  com valores que variam de 20 a 40% de  $R_n$ .

Em regiões úmidas temperadas, em que 100% de cobertura de vegetação é comum, considera-se o fluxo de calor no solo ( $G$ ) um componente relativamente pequeno no balanço de energia da superfície (AGAM et al., 2012). No entanto, os autores afirmam que, sob condições de vegetação esparsa,  $G$  pode chegar a 50% do saldo de radiação e até mesmo para copas mais altas, incluindo as florestas, podem ser responsáveis por 30 a 50% de  $R_n$ . As práticas de lavoura, associadas ao cultivo do solo, expõem as superfícies, bem como a realização de colheitas e, em ambos os casos,  $G$  pode voltar a atingir 50% do saldo de radiação.

O solo desempenha um papel importante na equação do balanço de energia, determinando a radiação líquida disponível e influenciando o fluxo de energia no perfil do solo (NUÑEZ et al., 2010; ZUO et al., 2011). De acordo com Biudes et al. (2009), quando a superfície do solo se encontra coberta pela vegetação, e sendo mantida sem restrição hídrica, o balanço da energia influencia intensamente a estimativa do

fluxo de calor no solo, sendo que a porosidade e a condutividade térmica do solo pouco influenciam na temperatura do mesmo.

Partindo da premissa que o fluxo de calor no solo ( $G$ ) é um importante componente do balanço de energia e que sua quantificação é importante em estudos relacionados à demanda hídrica e particionamento da radiação líquida, o presente trabalho objetivou a comparação de diferentes modelos de placas de fluxo de calor no solo, bem como a relação fluxo de calor no solo e radiação líquida ( $G/R_n$ ) sob vegetação de capim braquiária com grau de cobertura variável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAM, N.; KUSTAS, W. P.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; COSH, M. H.; MCKEE, L. G. Soil heat flux variability influenced by row direction in irrigated cotton. **Advances in Water Resources**, v. 50, p. 31-40, 2012.

ALFARO A. D. S. *Modelo de estimativa da radiação líquida e sua aplicação na determinação da evapotranspiração potencial*. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UEPG, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.

ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J.M.H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**. v.25, p.4011–4027, December, 2011.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.251-268, Kimberly, University of Idaho, 2005.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J.L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I. ROBISON, C. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Kimberly, Idaho, v.133, n.4, p.395-406, August. 2007. doi:10.1061(ASCE)0733 - 9437.

ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; DALL'OLIO, A.; AUDRY, P.; PINTO, A.X.M. Influência do posicionamento de sondas térmicas na determinação da difusividade térmica e do fluxo de calor do solo em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.165-172, 1997.

ARSHAD, M. A., R. H. AZOOZ. Tillage effects on soil thermal properties in a semiarid cold region. **Soil Science Society of America Journal**. 60(2): 561-567, 1996.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B.; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n.3, p.305-317, 2008.

BIUDES, M.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J.S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.24, n.2, p.135-143, 2009.

BROTZGE, J. A.; CRAWFORD, K. C. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement systems. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, 160–178, 2003.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; ANDRADE, a. M. D.; santos, a. B.; MAIA, R. G. X. Fluxo de calor do solo e saldo de radiação dentro de uma área de mata atlântica em comparação com uma área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 3, Campina Grande, PB, 2013.

DANELICHEN, V. H. M. *Parametrização de modelos de estimativa do fluxo de calor no solo em regiões de floresta e pastagem no pantanal mato-grossense utilizando dados de sensoriamento remoto*. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – UFMT, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

FIETZ, C. R. & FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 13: 449-453, 2009.

GALEANO, D. C.; BIUDES, M. S.; DANELICHEN, V. H. M.; FABIAN, F. A.; SOUZA, M. C. Energy balance in a pasture in the Pantanal. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 4, n. 2, p. 113-118, 2013.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E.; ALLMARAS, R. R. Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage-surface residue conditions [Mulch, Zea mays]. **Soil Science Society of America Journal**. v. 48, n. 2, p. 223-232, 1984.

HANKS, R. J.; G. L. ASHCROFT. Applied soil Physics. New York: Springer-Verlag, 1980.

HEITMAN, J. L.; HORTON, R.; SAUER, T. J.; Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 249-264, 2010.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 249-264, 2000.

NUÑEZ, C M.; VARAS, E. A.; MEZA, F. J. Modelling soil heat flux. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 100, p. 251-260, 2010.

PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 21, n. 3, p. 401-409, 2005.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R. & SENTELHAS, P. C. Meteorologia agrícola. Ed. Revista e Ampliada, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-SP. 2007, 202 p.

SANTANELLO JR, J. A.; FRIEDL, M. A. Diurnal covariation in soil heat flux and net radiation. **Journal of applied meteorology**. v. 42, p. 851-862, 2003.

SANTOS, T. V. *Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na Bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais*. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, T.V.; FONTANA, D.C.; ALVES, R.C.M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 5, p. 488-496, 2010.

SAUER TJ, HORTON R. Soil heat flux. In: Hatfield J. L.; Baker J. M.; editors. *Micrometeorology in Agricultural Systems*. Agron Monogr, 47. Am Soc of Agron Madison, WI; p. 131–54, 2005.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A. L. C. Variação sazonal entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. ***Revista Brasileira de Meteorologia***, 18: 7177, 2003.

SOARES, W. A. Análise comparativa do fluxo de calor no solo em profundidade e na Superfície. ***Revista Brasileira de Geografia Física***. v. 6, n. 4, p. 665-679, 2103.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F.; TORNERO. M. T. T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 34: 1763-1774, 1999.

ZUO, J.; WANG, J.; HUANG, J.; LI, W.; WANG, G. Y. REN, H. Estimation of ground heat flux and its impact on the surface energy budget for a semi-arid grassland. ***Sciences in Cold and Arid Regions***. v. 3, n. 1, p. 41-50, 2011.

## **CAPÍTULO I**

### **AVALIAÇÃO DE PLACAS DE FLUXO DE CALOR NO SOLO EM ÁREA DE CAPIM BRAQUIÁRIA**

---

<sup>1</sup> Artigo submetido à Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

## **AVALIAÇÃO DE PLACAS DE FLUXO DE CALOR NO SOLO EM ÁREA DE CAPIM BRAQUIÁRIA**

**RESUMO:** As placas de fluxo de calor no solo são utilizadas em estudos de balanço de energia e demanda hídrica. Tratam-se de pequenos discos rígidos de propriedades térmicas definidas e constantes que são inseridos no solo para medir o fluxo de calor no meio. Assim sendo, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de placas de fluxo de calor no solo de dois diferentes modelos, o HFT3.1 (*Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, Washington, USA*) e o HFP01 (*Hukseflux Thermal, Delft, Netherlands*) denominadas REBS e HUKS para período de solo seco e solo úmido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, *Campus Cruz das Almas*, durante o período de 02 de outubro 2015 a 23 de fevereiro de 2016. Os valores  $R^2$ , para o período de solo seco, foram de 99,34; 96,86 e 99,04 % para as comparações entre placas do modelo HFT3.1 (REBS1 x REBS2), do modelo HFP01 (HUKS1 x HUKS2) e entre os modelos REBS e HUKS respectivamente. Já para o período de solo úmido, esses valores foram da ordem de 96,39; 95,79 e 97,40 %, caracterizando performances semelhantes das placas para os dois períodos estudados, bem como para todo o período em que o  $R^2$  foi de 0,9879. Os diferentes modelos de placas apresentaram excelentes resultados com o modelo REBS, apresentando maior amplitude de medição em relação ao modelo HUKS, sendo que essa diferença pode ter sido atribuída às condições de instalação das placas.

**Palavras-chave:** Balanço de energia, desempenho de placas, HFT3.1 e HFP01.

## EVALUATION OF HEAT FLUX PLATES IN A FIELD OF BRAQUIÁRIA GRASS

**ABSTRACT:** The heat flow plates in the ground has long been used in a study involving energy balance and water demand. These are small hard disks of defined and constant thermal properties which are inserted into the ground to measure the heat flow in the middle. Therefore, this study aimed to evaluate the heat flux plates of performance on the ground of two different models, the HFT3.1 (Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, Washington, USA) and HFP01 (Hukseflux Thermal, Delft, Netherlands) called REBS and huks for soil dry period and wet soil at the Federal University of Bahia Reconcavo - UFRB Campus Cruz das Almas, during the period from 02 october 2015 to February 23 2016. The  $R^2$  values for the soil dry period were 99.34; 96.86 and 99.04% for comparisons between plates HFT3.1 model (REBS1 x REBS2), the HFP01 model (HUKS1 HUKS2 x) and between REBS and HUKS models respectively. As for the soil moist period these values were of 96.39 order; 95.79 and 97.40%, featuring similar performance of the plates for the two periods studied, as well as for the entire period in which the  $R^2$  was 0.9879. The different models of plates showed excellent results, with REBS model showing greater range of measurement in relation to HUKS model, and this difference may have been attributed to the plates installation conditions.

**Key-words:** Energy balance, performance boards, HFT3.1 and HFP01.

## 1.0 INTRODUÇÃO

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) é uma fração da radiação líquida e representa a quantidade de energia utilizada no processo de aquecimento e resfriamento do solo. Para Soares (2013),  $G$  representa a fração do saldo de radiação transferida aos níveis inferiores do solo, sendo dependente da condutividade térmica e da temperatura do solo em diferentes profundidades.

Payero et al. (2005) afirmam que  $G$  representa a quantidade de energia radiante absorvida ou liberada na superfície do solo durante um determinado período de tempo. SANTANELLO JR & FRIEDL (2002) garantem que, em escalas de tempo diárias ou mais, medidas dos valores de fluxo de calor no solo diários são muito interessantes, pois podem ser suficientes para obter um fechamento do balanço de energia, o qual contribui para o aumento e/ou redução nos fluxos de calor latente e sensível, aumentando e/ou reduzindo as taxas de evaporação e transpiração (GALVANI et al., 2001).

Conforme Moura & Querino (2010), o fluxo de calor no solo ocorre em razão do processo de condução, no qual, por movimento molecular, transmitem-se as moléculas adjacentes, decrescentemente, sendo que essa transmissão ocorre em desequilíbrio térmico do sistema tanto no período do dia quanto da noite, caracterizando a ocorrência de trocas de calor entre a superfície do solo e a atmosfera.

O fluxo de calor no solo é dependente das propriedades físicas do solo, envolvendo a condutividade e difusividade térmica, bem como a capacidade calórica volumétrica que é fortemente influenciada pela umidade do solo. Dessa forma, ele é muito estudado em experimentos de campo para se obter informações características de limites de superfícies naturais e manejados sob diferentes condições climáticas (SAUER et al., 2008).

Medições do fluxo de calor no solo podem ser obtidas através de técnicas calorimétricas de gradientes ou combinadas, as quais requerem medidas precisas e complexas da temperatura, bem como das propriedades térmicas do solo. Vários avanços na medição de fluxo de calor no solo são observados, incluindo o advento de sensores de pulso térmico. Assim, o uso desses sensores, para medição do fluxo de calor no solo, tem sido amplamente empregados em estudos de medição do fluxo de

calor neste meio. Segundo Sauer & Horton (2005), muitos estudos recentes, envolvendo densidade de fluxo de calor no solo, usaram placas de fluxo de calor.

As placas de fluxo de calor são pequenos discos rígidos de propriedades térmicas definidas e constantes que são inseridos horizontalmente próximos à superfície do solo para medição direta da densidade do fluxo de calor que é proporcional a densidade do fluxo de calor no solo. Uma constante de calibração é utilizada para converter a tensão de saída (mV) para uma medida do fluxo através da placa ( $W \cdot m^{-2}$ ). De acordo com Ochsner et al. (2006), as placas são resistentes o suficiente por longo prazo de uso no campo e podem suportar a instalação repetida e escavação, o que permite medições com elevada frequência e precisão durante longos períodos de tempo.

Para Peng et al. (2015), placas de fluxo de calor são amplamente utilizadas devido a sua simplicidade e durabilidade, bem como devido à facilidade de abordagem do fluxo pela placa (SAUER & HORTON, 2005). Falckenberg (1930) foi o primeiro a utilizar placas de fluxo de calor para medir a transferência de calor em solos, visto que o conceito de placa de fluxo de calor no solo foi adaptado a partir de esforços para medir a transferência de calor em paredes de edifícios e anteparas de navios.

Há diferentes modelos de placas, no entanto, cada modelo possui desempenho diferente no que tange à medição do fluxo de calor, tendo em vista que, cada modelo possui diferentes características físicas, bem como fator de calibração diferente; havendo, ainda, modelos auto-calibrantes. Assim, devido à popularidade, várias placas com diferentes características se encontram disponíveis comercialmente (Tabela 1).

Todavia, fatores como regimes térmicos e hídricos do solo monitorado, além da profundidade de posicionamento, devem ser levados em consideração na escolha da placa de fluxo de calor. Embora o uso de placas de fluxo de calor no solo seja uma técnica simples e de vasta aceitação, devido cuidado deve ser tomado na instalação destes sensores, visto que as faces das placas devem estar em pleno contato com a parede do solo, pois alguns aspectos indutores de erros, como distorção do fluxo de calor próximo a placa, fluxos divergentes de vapor d'água e a subestimativa de  $G$ , podem ocorrer devido ao mau contato entre a placa e a matriz do solo (SAUER et al., 2003), já que a condutividade térmica da placa se mantém constante, enquanto que a condutividade térmica do solo é variável em função do conteúdo de água.

Tabela 1. Especificações técnicas de algumas placas de fluxo de calor no solo disponíveis comercialmente.

| <b>Modelo</b> | <b>Forma</b> | <b>Dimensões</b><br>(mm x mm ou mm) | <b>Espessura</b><br>mm | <b>Condutividade térmica</b><br>(W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | <b>Sensibilidade</b><br>(μV W <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ) |
|---------------|--------------|-------------------------------------|------------------------|--|---|
| <b>CN3</b>    | Retangular   | 48 x 29                             | 7                      | 0,4  | 21  |
| <b>MF-81</b>  | Retangular   | 110 x 12                            | 4                      | 0,23   | 26  |
| <b>HUKSSC</b> | Circular     | 80                                  | 5                      | 0,8  | 50  |
| <b>HUKS</b>   | Circular     | 80                                  | 5                      | 0,8  | 50  |
| <b>GHT-1C</b> | Quadrada     | 52 x 52                             | 5,7                    | 0,26   | 900   |
| <b>REBS</b>   | Circular     | 38,2                                | 3,91                   | 1,22   | -   |
| <b>HFT-1</b>  | Circular     | 38                                  | 3,9                    | 1  | 24  |
| <b>610</b>    | Circular     | 25                                  | 2,6                    | 0,33   | 7,5   |
| <b>WS 31S</b> | Circular     | 110                                 | 5                      | 0,2 a 0,3  | 100   |

Geralmente, as placas de fluxo de calor são inseridas em profundidades que variam entre 2 e 10 cm (SAUER, 2002), porém, frequentemente, usa-se entre 6 e 10 cm (EVETT al, 2012). Desse modo, Kustas et al. (2000) recomendam que sejam instaladas a uma profundidade de 5 e 10 centímetros. Amiro (2009) posicionou placas a profundidades menores (1 a 2 cm), visando minimizar a magnitude do armazenamento de calor acima das placas. No entanto, Agam et al. (2012) afirmam que a colocação de fluxímetros, em uma profundidade mais rasa, pode introduzir erros muito maiores em comparação com a implantação mais profunda.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo comparar medições de fluxo de calor no solo a partir de dois modelos distintos de fluxímetros submetidos a condições variáveis de umidade do solo e grau de cobertura da superfície pela vegetação.

## 2.0 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Características do local de estudo

O experimento foi desenvolvido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, *Campus* de Cruz das Almas, com a seguinte localização geográfica: 12° 40'

39" de latitude sul e 39° 06' 23" de longitude oeste, com uma altitude de 225 metros acima do nível médio do mar.

Segundo Silva et al. (2016) a região possui duas classificações climáticas, sendo a primeira proposta por Köppen Ometto (1981) do tipo Ami (chuva anual dez vezes maior que o mês mais seco) e a segunda conforme a metodologia de Thornthwaite (1984), é C1dA'a' classificada como C1 (seco e subúmido). Ainda conforme os autores, a localidade possui pluviosidade média anual de 1131,2 mm, com médias anuais que variam em torno de 81% e 23,9 °C para umidade relativa e temperatura do ar respectivamente.

A área experimental compreende um cercado de 1764 m<sup>2</sup> e é ocupada em sua totalidade por pastagem homogênea de capim *Brachiaria* sp. mantida por grau de cobertura variável sob condição de sequeiro.

De acordo com análise laboratorial realizada na Embrapa Mandioca e Fruticultura, o solo é de classificação textural areia franca, sendo sua composição granulométrica apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição granulométrica (g kg<sup>-1</sup>) da estação experimental, dispersão com NaOH.

| Composição granulométrica (g kg <sup>-1</sup> ) | Areia muito grossa | Areia grossa | Areia media | Areia fina | Areia muito fina | Silte | Argila |
|---|--------------------|--------------|-------------|------------|------------------|-------|--------|
|   |                    | 25           | 238         | 347        | 209              | 54    | 37     |

A determinação da densidade do solo foi realizada no Laboratório de Água e Solos do Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS), pelo método do anel volumétrico (Equação 1), a partir de amostras de solo coletadas na área, densidade média do solo 1,75 Kg m<sup>-3</sup>.

$$d_s = \frac{m_s}{vol_c} \quad (1)$$

em que:  $d_s$  é a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>),  $m_s$  é a massa do solo seco (g) e  $vol_c$  o volume do solo seco (cm<sup>3</sup>).

## 2.2 Descrição do experimento

### 2.2.1 Parâmetros mensurados

A pesquisa foi realizada entre os meses de outubro de 2015 e fevereiro de 2016 em que ao longo do estudo, foram realizadas medidas através de uma estação meteorológica automática (Figura 1) localizada na área de estudo constituída de sensores para monitoramento das seguintes variáveis: saldo de radiação, temperatura do ar e do solo, umidade do ar, velocidade e direção do vento, fluxo de calor no solo e precipitação pluviométrica.



Figura 1. Instrumentação meteorológica de coleta automática de dados instalada na área de capim braquiária, Cruz das Almas, Bahia.

Para registro da radiação líquida ( $R_n$ ), foi utilizado um saldo radiômetro modelo CNR4 (Kipp & Zonen, The Netherlands), instalado a 1,5 m de altura. Para registro diário da precipitação, utilizou-se um pluviômetro modelo TE525MM (*Texas Electronics, Dallas, Texas, USA*) que foi instalado com sua área de captação distante de 0,5 m da superfície do solo.

Neste estudo, foram coletados, ininterrompidamente, dados de fluxo de calor no solo por meio de uma bateria contendo quatro placas, as quais foram instaladas paralelamente à superfície do solo a uma profundidade de 0,08 m distribuídas em quatro parcelas. Em duas das parcelas (P1 e P2), utilizou-se as placas do modelo HFT3.1 (*Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, Washington, USA*)

(doravante REBS1 e REBS2) contra duas placas do modelo HFP01 (*Hukseflux Thermal, Delft, Netherlands*) (doravante HUKS1 e HFUKS2) instaladas nas parcelas 3 e 4.

O monitoramento do grau de cobertura do solo proporcionado pela vegetação local foi realizado através do processamento de imagens digitais via *software ImageJ® 1.48v*, iniciando sob grau de cobertura zero, ou seja, solo nu até 100%. Assim, as fotografias foram capturadas em um intervalo de três dias em dez pontos escolhidos aleatoriamente na área (P5 a P10), além dos quatro referentes aos pontos de instalação das placas.

A Figura 2 mostra o croqui da área em estudo, destacando os pontos de medições e disposição dos instrumentos de medições meteorológicas em campo.

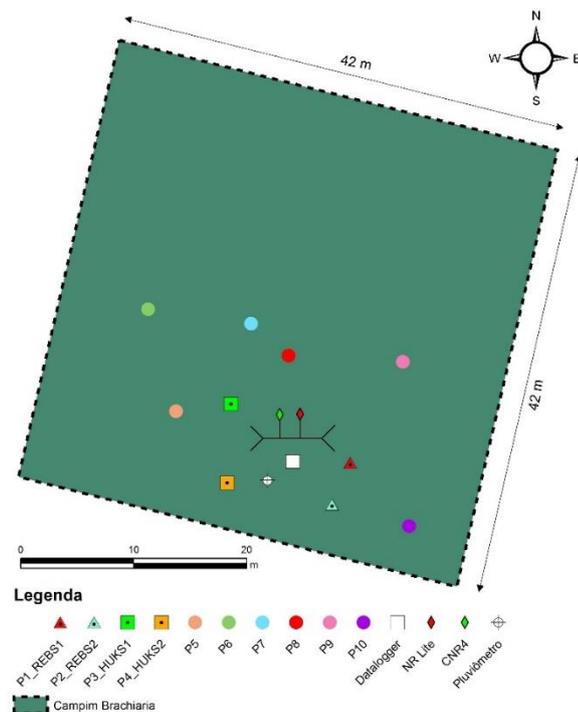


Figura 2. Croqui do campo experimental de condução dos trabalhos de campo na UFRB em Cruz das Almas, Bahia.

Cada placa de fluxo de calor no solo foi instalada horizontalmente a 0,08 m de profundidade, sendo dois termopares instalados acima do fluxímetro a uma profundidade de 0,02 e 0,06 m abaixo de superfície do solo e uma sonda de TDR (Reflectometria no domínio do tempo) instalada entre 0,03 e 0,06 m de profundidade

para monitoramento da umidade do solo ( $\theta_v$ ) conforme esquema de instalação mostrado na Figura 3.

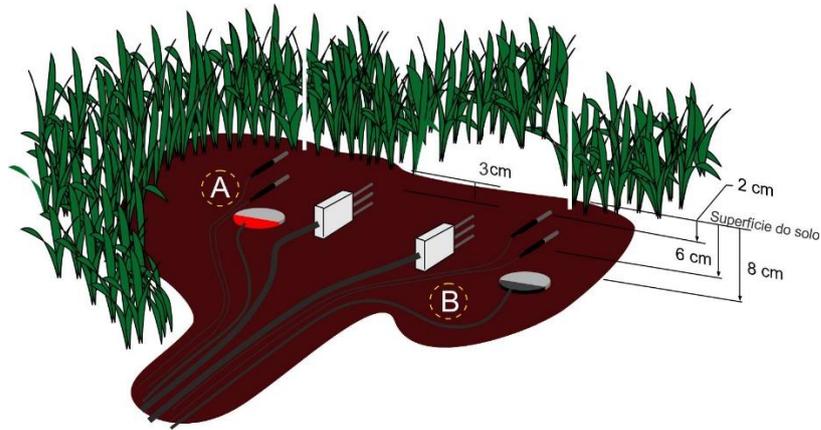


Figura 3. Representação esquemática de instalação dos sensores para obtenção do fluxo de calor no solo utilizando placas do modelo HFT3.1 (A) e do modelo HFP01 (B), Cruz das Almas, BA.

As placas de fluxo de calor no solo utilizam uma termopilha que mede gradientes de temperatura em toda sua extensão. As especificações técnicas individuais dos modelos de placa de fluxo de calor no solo HFT3.1 (REBS) e HFP01 (HUKSEFLUX) utilizadas neste estudo estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Especificações técnicas dos modelos de placas de fluxo de calor no solo utilizadas neste estudo segundo especificações dos fabricantes.

| Modelo   | REBS1     | REBS2     | HUKS1     | HUKS2     |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Forma  | Circular  | Circular  | Circular  | Circular  |
| Dimensões (mm)                                       | 38,2      | 38,2      | 80        | 80        |
| Espessura (mm)                                       | 3,91      | 3,91      | 5         | 5         |
| Condutividade térmica ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ )        | 1,22      | 1,22      | 0,8       | 0,8       |
| Número de série                                      | 3582      | 3585      | 90,99     | 9098      |
| Fator de calibração ( $W\cdot m^{-2}\cdot mV^{-1}$ ) | 46,67     | 46,34     | 16,92     | 16,47     |
| Temperatura de operação ( $^{\circ}C$ )              | - 40 a 55 | - 40 a 55 | - 30 a 70 | - 30 a 70 |
| Faixa de medição ( $W\cdot m^{-2}$ )                 | 100       | 100       | 200       | 200       |
| Precisão (%)   | 5         | 5         | 5 a15     | 5 a15     |

A estimativa do fluxo de calor na superfície do solo foi calculado conforme Kustas et al. (2000), representado pela Equação 2:

$$G = G_8 + \frac{(T_i - T_{i-1}) \cdot C_s \cdot d}{\Delta t} \quad (2)$$

em que  $G_0$  o fluxo de calor na superfície do solo ( $W m^{-2}$ ),  $G_8$  o fluxo de calor medido pela placa a 0,08 m de profundidade ( $W m^{-2}$ ),  $T_i$  é temperatura média do solo no instante  $i$  ( $^{\circ}C$ ),  $T_{i-1}$  a temperatura média do solo no instante anterior ( $^{\circ}C$ ),  $C_s$  a capacidade calórica do solo úmido ( $MJ m^{-3} ^{\circ}C^{-1}$ ),  $d$  é a profundidade de instalação da placa (m) e  $\Delta t$  o variação do tempo (3600 s).

A capacidade calórica do solo úmido foi calculada, somando-se o calor específico do solo seco com o conteúdo de água do mesmo de acordo a Equação 2:

$$C_s = d_s \cdot \left( \frac{2,01 \cdot m_m}{2,65 \cdot m_s} + \frac{2,51 \cdot m_o}{1,30 \cdot m_s} \right) + 4,19 \cdot \theta_v \quad (3)$$

em que:  $d_s$  é a densidade do solo ( $g cm^{-3}$ ),  $m_m$  a massa do material mineral (g),  $m_o$  massa do material orgânico (g),  $m_s$  a massa do solo seco (g) e  $\theta_v$  a umidade do solo em base de volume ( $cm^3 cm^{-3}$ ).

A medida da umidade do solo foi realizada através da técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), em que se baseia no princípio de que a velocidade de deslocamento de um pulso eletromagnético, em um meio, é função da constante dielétrica do mesmo. Assim, a determinação da umidade volumétrica do solo foi tomada com base no modelo polinomial cúbico (Equação 4) de calibração universal proposta por Topp et al. (1980) que determina a umidade em função da constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) que não leva em consideração as características específicas de cada tipo de solo.

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot K_a - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^2 + 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^3 \quad (4)$$

em que:  $\theta_v$  é a umidade do solo em base de volume ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $K_a$  constante dielétrica aparente (adimensional).

### 2.2.2 Coleta e processamento dos dados

Os instrumentos utilizados na pesquisa foram previamente testados, conforme recomendações dos fabricantes, e, posteriormente, conectados a uma unidade acumuladora de dados (*datalogger*) modelo CR1000 (*Campbell Scientific Inc, Logan, Utah, USA*). Como os equipamentos foram instalados em área remota, um painel solar foi utilizado, visando o fornecimento de energia elétrica para realização das coletas e processamentos necessários para armazenamento das variáveis medidas, além de uma bateria utilizada, visando garantir a continuidade dos dados no período noturno, bem como para um eventual suprimento de energia durante o dia.

Os dados foram armazenados na memória interna do *datalogger* e, posteriormente, transferidos para um computador portátil. Os canais de entrada e saída foram controlados pelo sistema operacional, conjuntamente com o programa de interface ao usuário denominado PC200W (*Campbell Scientific Inc, Logan, Utah, USA*).

Os dados armazenados no *datalogger* foram programados para proceder leituras em uma frequência de 30 segundos, sendo, então, armazenados em médias horárias e com uma frequência semanal para efetivação das coletas mediante verificação da consistência dos dados e construídos gráficos com recurso computacional adequado.

### 2.2.3 Análise dos dados

Para avaliação comparativa entre placas de fluxo de calor no solo, foi realizada uma análise de regressão, levando em consideração a comparação entre sensores de mesmo fabricante (REBS1 x REBS2; HUKS1 x HUKS2) e sensores de fabricantes diferentes (REBS x HUKS), sendo os valores obtidos através das médias de cada modelo e realizados as correlações existentes.

A comparação entre os modelos de placas de fluxo de calor utilizados neste estudo foi realizada em diferentes condições de umidade do solo, considerando um período seco (outubro a dezembro) e um período úmido (janeiro a fevereiro), bem como as diferentes condições do grau de cobertura da superfície do solo proposto pela vegetação local (pastagem de capim braquiária).

A análise estatística dos dados foi fundamentada na comparação entre as placas de fluxo de calor no solo, sendo submetidos a uma análise de regressão linear. A dispersão entre os valores medidos pelos fluxímetros foi evidenciada através do erro relativo (SEE), extraído da ANOVA da regressão os coeficientes dos modelos de regressão e os respectivos testes estatísticos de significância para os modelos.

### 3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Precipitação, umidade do solo

O regime pluviométrico está relacionado aos processos de ordem química, física e biológica na superfície terrestre, o qual altera as características hídricas e térmicas do solo proporcionando influência direta na determinação do fluxo de calor no mesmo. Na Figura 4, são apresentados o total de chuva precipitado, bem como o comportamento da umidade volumétrica do solo na área em estudo.

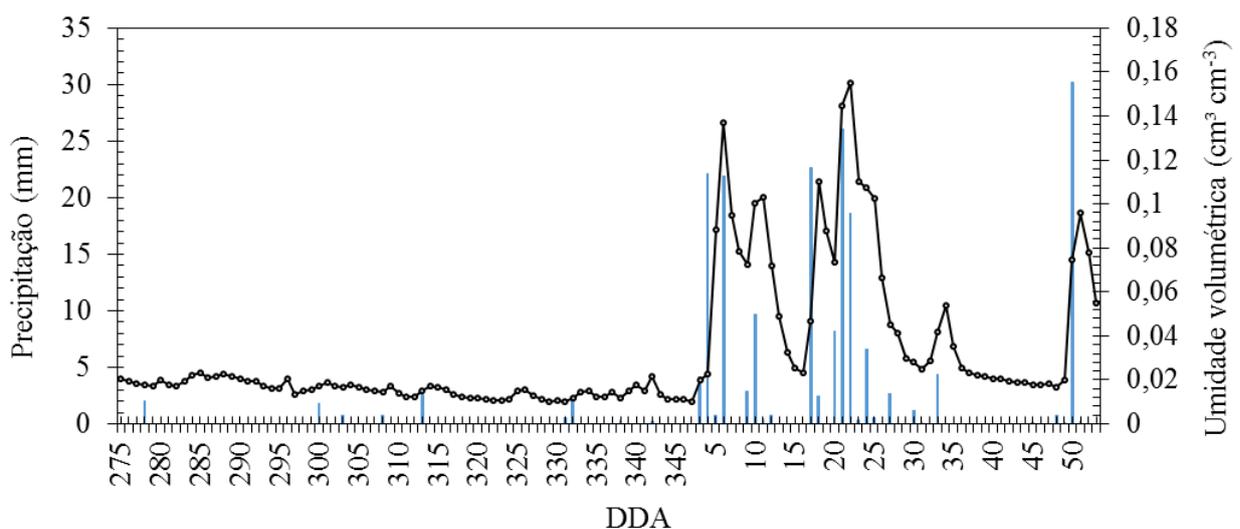


Figura 4. Precipitação (mm) e umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) registradas ao longo da pesquisa em Cruz das Almas, Bahia, no período de 02/10/2015 a 22/02/2016.

Ao longo do estudo, foi registrada uma precipitação pluviométrica de 202,6 mm, sendo observado um longo período de estiagem (outubro a dezembro), no qual apresentou uma lâmina de 19,3 mm de chuva. Já no período compreendido entre janeiro e fevereiro de 2016, foi observado um maior volume precipitado (183,3 mm), ou seja, 90,47% de toda precipitação registrada na área durante a pesquisa.

Ressalta-se, ainda, que incrementos acentuados de umidade do solo indicam as vezes em que o solo foi umedecido através de eventos de precipitação, conforme observado na figura acima a partir do quarto dia do ano até o final do estudo (Dia Juliano 53). Logo, uma maior variação nos dados diários de umidade volumétrica do solo foi observada durante os meses de janeiro e fevereiro, visto a presença de maior regime pluviométrico precipitado.

Os valores diários de umidade do solo, em base de volume durante o período de menor ocorrência de chuvas, poderia ter sido insignificante, uma vez que os valores de  $\theta_v$  medidos através da TDR a uma profundidade entre 3 e 6 cm eram relativamente pequenos (0,01 a 0,015 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), apresentando pouca variação durante o estudo. Este comportamento foi também evidenciado por Peng et al. (2015) ao posicionarem sondas de TDR a 2 cm de profundidade. Para os autores, isso ocorre devido à existência de grandes gradientes de concentração de vapor próximo da interface solo-atmosfera, e um espaço poroso cheio de ar está disponível para difusão de vapor.

### **3.2 Comparação entre placas de fluxo de calor para valores de $G_8$ e $G_0$**

A Figura 5 mostra uma análise temporal do fluxo de calor no solo ( $G_8$  e  $G_0$ ) a partir dos valores médios para cada modelo, sob condição de solo seco (A) compreendido entre o Dia Juliano 328 e 333 e solo úmido (B) entre Dia Juliano 5 e 10 para cada modelo de placa de fluxo de calor proposto neste estudo.

Ao avaliar os valores médios horários de  $G_8$  e  $G_0$  para os diferentes períodos, é possível observar que os desempenhos de cada modelo testado foram semelhantes nas medidas de fluxo de calor no solo tanto para período seco quanto para período úmido.

Nota-se, na evolução do fluxo de calor no solo, tanto para  $G_8$  quanto para  $G_0$ , uma amplitude maior em medidas obtidas a partir das leituras das placas HFT3.1

(REBS) em relação às placas HFP01 (HUKSFLUX) para valores agrupados em médias horárias tanto para o período seco (24 a 29/10/2015) quanto para o período úmido (05 a 10/02/2016). No entanto, durante o período de maior umidade do solo, observa-se uma tendência de aproximação dos valores medidos em cada modelo de placa proposto no estudo.

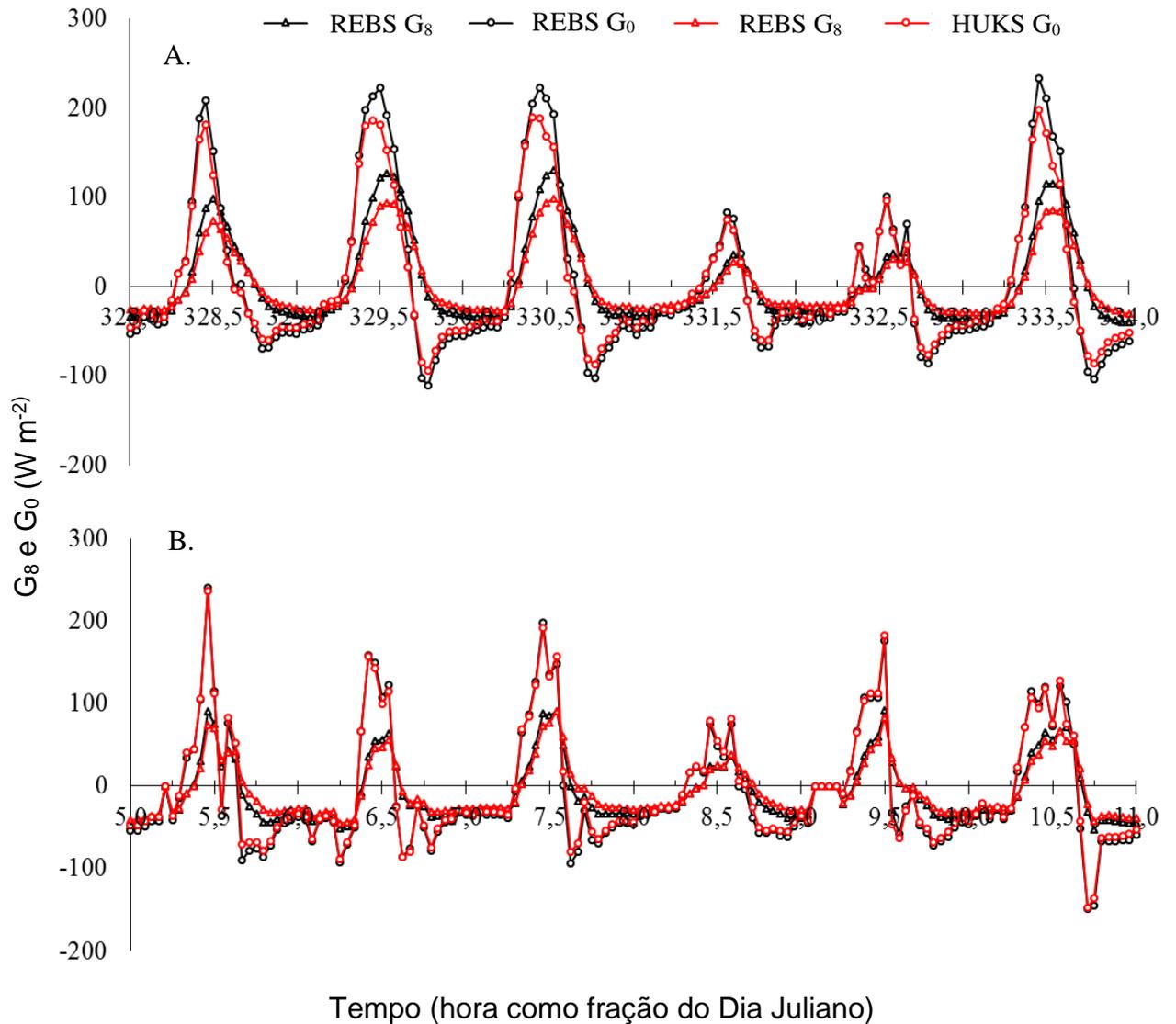


Figura 5. Evolução do fluxo de calor no solo médio ( $G_8$  e  $G_0$ ) com as placas HFT3.1 (REBS) E HFP01 (HUKSEFLUX) entre 24 e 29/10/2015 para subperíodo de solo seco (A) e entre 05 a 10/01/2016 para subperíodo de solo úmido (B) em Cruz das Almas, Bahia.

Levando em consideração o período de solo seco (A), verifica-se que, devido à baixa umidade do solo, ocorreu predominância de valores positivos durante maior

parte do dia. Como se sabe, o solo com baixa umidade permite maior amplitude térmica devido ao elevado calor específico da água. Desta forma, o baixo teor de umidade favoreceu maior variação da temperatura do solo, resultando em valores mais elevados de fluxo de calor no solo medido através das placas, bem como nos valores corrigidos para a superfície do solo.

Para a figura 5a, as médias de  $G_8$  e  $G_0$  apresentaram um curso diário uniformemente distribuído. No entanto, é possível perceber a ocorrência de valores reduzidos nas medições do fluxo de calor no solo ( $G_8$  e  $G_0$ ) aos Dias Juliano 331 e 332. Essa redução dos valores se deve ao fato da presença de dias com alta nebulosidade, em que foi observado um coeficiente de transmissividade ( $K_t$ ) de 0,252 e 0,312 para os respectivos dias do ano.

Vale ressaltar que a alta nebulosidade, apontada nos dias, provocou interceptação parcial da radiação solar que chega à superfície da terra, que influenciou na redução da temperatura do solo e conseqüentemente na redução de amplitudes de  $G_8$  e  $G_0$ , o qual reforça influência da cobertura das nuvens no comportamento da transferência de energia no solo. Vale lembrar que, para a Figura 5B, foi observado valores mais reduzidos da transmissividade atmosférica que caracterizam dias com alta nebulosidade conforme Querino et al. (2011).

A partir da avaliação da Figura 5B, em que se inicia o período chuvoso, é possível observar o comportamento de  $G_8$  e  $G_0$  após ocorrência de precipitação. Nota-se maior oscilação entre os valores medidos e estimados por cada modelo de placa devido a variação da umidade do solo, bem como redução da radiação global que chega à superfície, justificando a incidência de dias com maior cobertura de nuvens que interferiu diretamente na temperatura e, conseqüentemente, na densidade do fluxo de calor no solo.

Como se sabe, variação da umidade do solo promove também uma variação da condutividade térmica, alterando, deste modo, a densidade do fluxo, o gradiente de temperatura e, conseqüentemente, afetando diretamente na distribuição da temperatura do solo conforme relatado por Novais et al. (2011).

Observa-se, ainda, que o incremento de água no solo promoveu acréscimo da condução de calor, haja vista que os espaços porosos presentes no solo antes preenchidos por ar, foram então ocupados por água por meio de precipitação

pluviométrica, viabilizando maior fluxo de calor no solo através do processo de condução de calor.

Como o calor específico da água é muito maior que o do solo, o meio manteve seu calor por mais tempo e, conseqüentemente, a superfície foi suprida pelo fluxo ascendente de calor no solo, motivado pela redução do aquecimento solar da superfície em função da atenuação pelas nuvens, bem como através das perdas radiativas que conduzem calor da superfície para a atmosfera.

Comparando os dois períodos, se verifica uma redução na amplitude dos ciclos horários e diários do fluxo de calor para solo úmido, evidenciando a influência direta da precipitação nas medidas, visto que a umidade do solo aumentou em função da precipitação no Dia Juliano 4, o qual provocou alterações bruscas nas medidas de  $G_8$  e, conseqüentemente, nas estimativas de  $G_0$  para cada modelo de placa.

É importante salientar que o grau de cobertura do solo foi variável para os dois períodos apresentados no gráfico, sendo que, para o intervalo compreendido entre o os Dias Juliano 328 ao DDA 333, o grau de cobertura proporcionado pela pastagem apresentou pequena variação (23,93 a 24,36%). Já para o intervalo compreendido entre o Dia Juliano 5 e 10, a variação do grau de cobertura foi ainda maior (22,43 a 34,92%) devido a incidência de precipitação aliada ao estresse hídrico acometido.

Ainda com base na Figura 5, ao analisar os cursos de  $G_8$  e  $G_0$  é importante ressaltar a influência do calor armazenado na camada do solo acima das placas de fluxo de calor. Como não há uma maneira de medir o fluxo de calor na interface solo-atmosfera, é recomendado que as placas sejam instaladas poucos centímetros abaixo da superfície do solo, corrigindo esse fluxo para a interface solo-atmosfera através da estimativa do calor armazenado acima das placas.

Nota-se, ainda, além da tendência de aproximação dos valores de  $G_8$  e  $G_0$  para cada placa durante o período de maior umidade do solo, a predominância de valores negativos na maior parte do dia. Essa observação foi também verificada em trabalho realizado por Moura & Querino (2010) ao avaliarem a variação sazonal de  $G$  em um manguezal, e, mais recentemente, por Andrade et al. (2015) ao estudarem a influência da liteira no comportamento de  $G$  em área de mata atlântica.

Vale lembrar que a precipitação promove alteração no conteúdo de água do solo, influenciando na variação da capacidade calórica do mesmo e, além disso, altera a temperatura do solo, originando um fluxo ascendente do calor no solo, devido à

redução do aquecimento da superfície, visto que, em dias chuvosos, há uma maior cobertura de nuvens que interceptam parte da radiação solar, provocando alterações no particionamento da radiação líquida nos processos de aquecimento do solo, do ar e evaporação da água.

Correlacionando os dados horários obtidos por cada modelo de placa de fluxo de calor no solo de mesmo fabricante (REBS e HUKS), o modelo matemático encontrado que melhor ajustou os dados foi o linear. A Figura 6 mostra os gráficos de regressão linear entre as medidas horárias de fluxo de calor no solo ( $G_8$ ) entre os modelos das placas de mesmo fabricante a partir da observação de 2167 pares ordenados para período de solo seco.

A dispersão dos pontos em torno da reta de regressão e da reta 1:1 reforça os indicadores de desempenho e o desvio médio relativo é indicado pela inclinação das retas. Observa-se que, em ambos os casos, os valores obtidos pelas placas de fluxo de calor apresentam uma boa correlação quando comparadas com valores de placas de mesmo fabricante, o que já é esperado.

A regressão apresenta um bom ajuste para os valores observados pelas placas, representando alta correlação na ordem de 99,34 % e 96,86 para os modelos REBS e HUKS respectivamente, bem como elevada significância dos modelos ( $p < 0,01$ ) encontrados e, além disso, baixos valores do erro padrão da estimativa (SEE), o que justifica bom ajuste do modelo encontrado.

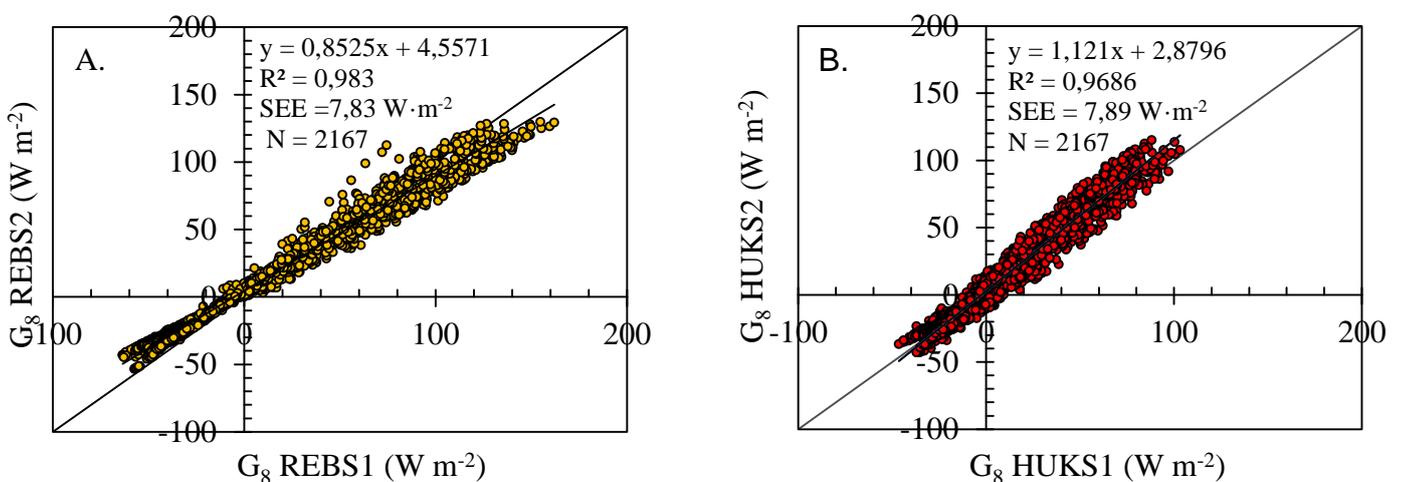


Figura 6. Fluxo de calor no solo medido por REBS1 versus REBS2 (A) e medido por HUKS1 versus HUKS2 (B) para solo seco (02/10/2015 a 03/01/2016) em Cruz das Almas, Bahia.

Avaliando a correlação existente entre os valores médios horários registrados através das médias das placas com mesmo modelo (REBS e HUKS), para um período em que se observou maior teor de umidade do solo, verifica-se que o modelo matemático que melhor ajustou os dados de regressão pelas placas foi o modelo linear conforme mostrado na Figura 7.

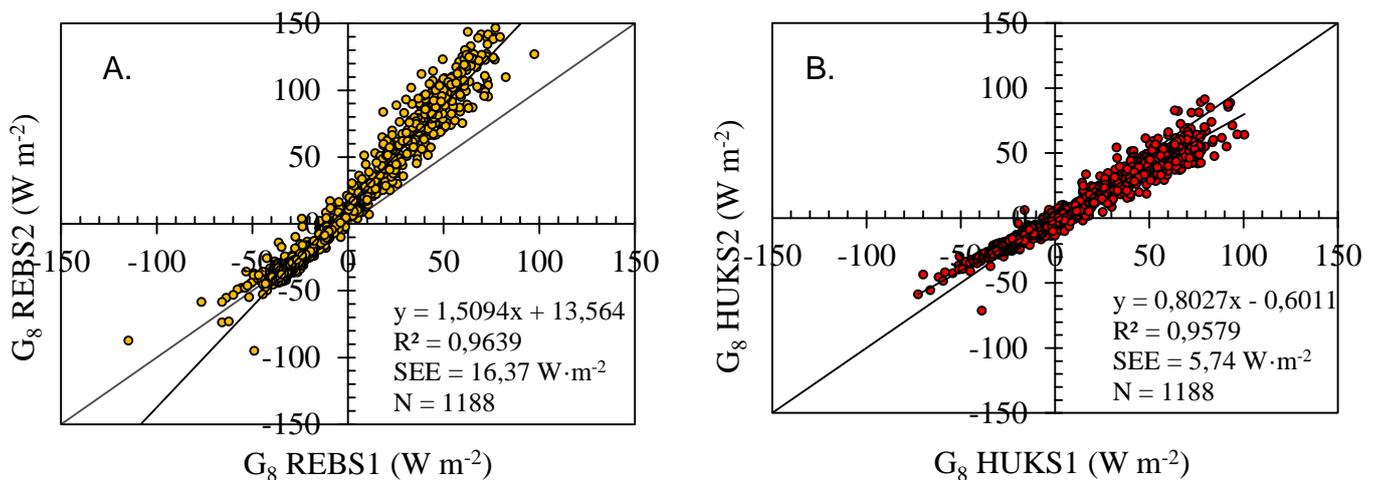


Figura 7. Comparação entre o fluxo de calor no solo medido por REBS1 versus REBS2 (A) e medido por HUKS1 versus HUKS2 (B) para solo úmido (04/01 a 22/02/2016) em Cruz das Almas, Bahia.

É possível notar que tanto o modelo REBS quanto HUKS obtiveram uma boa correlação quando comparados entre si conforme coeficiente de determinação obtidos da análise da regressão linear que registrou valores na ordem de 96,39 e 95,79 % respectivamente a partir da observação de 1188 pares ordenados.

Observando os gráficos da figura, ressalta-se, ainda, uma maior dispersão dos dados para valores horários de fluxo de calor no solo obtidos através da análise de regressão das placas do modelo REBS. Já para a análise de regressão das placas do modelo HUKS, percebe-se uma maior uniformidade na dispersão dos valores ao longo da reta. A partir de observações das retas 1:1, é possível notar o distanciamento entre as medidas de cada placa de fluxo de calor no solo quando comparadas dentro do mesmo modelo.

A mesma análise foi realizada, utilizando os valores médios horários registrados por cada modelo de placa proposto neste estudo com o intuito de encontrar uma relação existente entre os modelos REBS (HFT3.1) e HUKSFLUX (HFP01) para

diferentes condições de umidade do solo. Dessa forma, a Figura 8 apresenta a relação entre a média dos valores medidos pelas placas de fluxo de calor do modelo REBS versus a média dos valores do modelo HUKS para condição de solo seco compreendido pelo período entre 02/10/2015 a 03/01/2016 (a) e condição de solo úmido durante o intervalo de tempo entre 04/01 a 22/02/2016 (b).

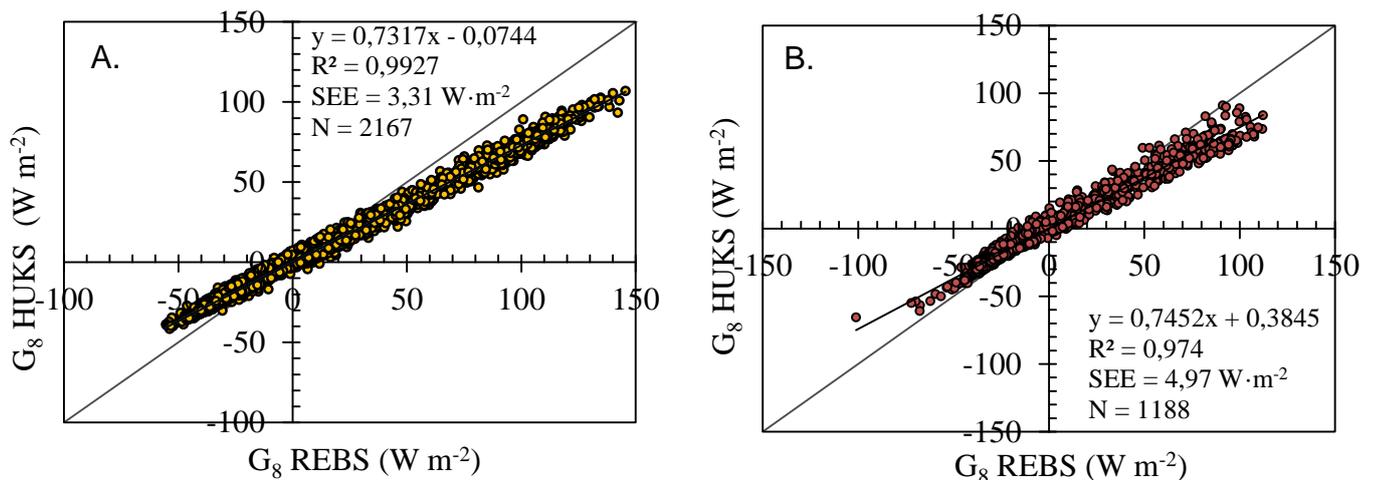


Figura 8. Relação entre valores médios de  $G_8$  medido por REBS versus HUKS para solo seco entre 02/10/2015 e 03/01/2016 (A) e solo úmido entre 04/01 a 22/02/2016 (B) em Cruz das Almas, Bahia.

É possível notar medições similares entre os modelos REBS (HFT3.1) e HUKS (HFP01), visto que o resultado da análise de regressão apresenta um elevado coeficiente de determinação (0,99 e 0,97) extraído do quadro de análise de variância (ANAVA), indicando alta concordância entre os modelos de placas de fluxo de calor.

A dispersão dos dados ao longo da reta 1:1 indica a proximidade de valores medidos entre as placas de fluxo de calor no solo, reforçando o indicador de desempenho do modelo encontrado. Além disso, a distribuição dos pontos em torno da reta 1:1, justifica a razão média de 1,47 e 0,57 entre os valores obtidos por REBS e HUKS para os períodos de solo seco e solo úmido respectivamente.

A Figura 8 mostra, ainda, a existência de uma correlação significativa entre as medidas dos dois modelos de placa de fluxo de calor (REBS e HUKS), ou seja, a existência de elevada concordância entre os valores de  $G_8$  medidos por cada modelo de placa estudado com alta significância ( $p < 0,01$ ), aliado ao baixo valor no erro padrão

da estimativa (3,31 e 4,97  $W m^{-2}$  para REBS e HUKS respectivamente), o que comprova elevado grau de confiabilidade do modelo gerado.

O gráfico de dispersão, mostrando a relação entre valores de fluxo de calor no solo ( $G_8$ ), bem como o fluxo de calor na superfície do solo medido ( $G_0$ ) através da placa do modelo REBS HFT3.1 e pela placa do modelo HUKS (HFP01), é apresentado na Figura 9, no qual se leva em consideração todo o período estudado (02/10/2015 a 22/02/2016).

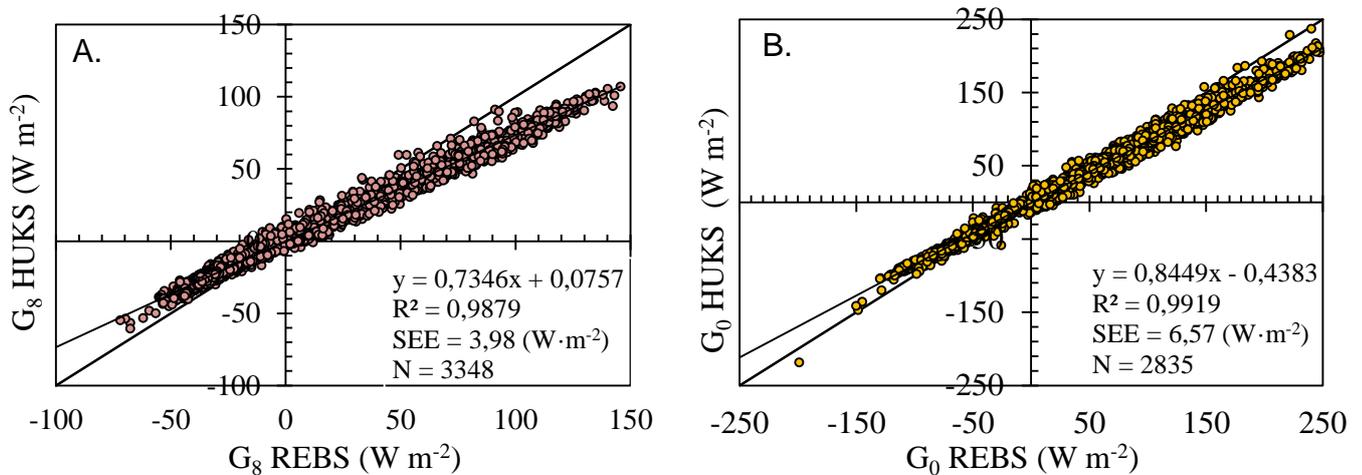


Figura 9. Correlação entre placas de fluxo de calor dos modelos REBS (HFT3.1) e HUKS (HFP01) para valores medidos a 0,08 m de profundidade (A) e para a superfície do solo (B) em Cruz das Almas, Bahia, no período de 02/10/2015 a 22/02/2016.

Os resultados encontrados para  $G_8$  apresentaram boa correlação entre os valores medidos pelos modelos REBS e HUKS com coeficiente de determinação de 98,79 %, e erro padrão da estimativa de 3,98  $W m^{-2}$ . Já para  $G_0$ , também foi encontrado elevada correlação entre os valores estimados com coeficiente de determinação de 0,99 e erro padrão de 6,57  $W m^{-2}$ .

Baseado nos resultados obtidos, é possível dizer que o método utilizado é capaz de estimar o fluxo de calor no solo para o modelo de placa HUKS (HFP01), apenas baseado em valores obtidos pelo modelo REBS (HFT3.1) tanto para o fluxo de calor a 0,08 m ( $G_8$ ) de profundidade quanto para o fluxo de calor na superfície do solo ( $G_0$ ) com elevado grau de confiabilidade.

Para avaliação do fluxo de calor na interface solo-atmosfera, é possível notar que os valores obtidos, a partir da estimativa de  $G_0$  para as duas placas de fluxo de

calor, apresentam elevada correlação com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,99, ou seja, é possível estimar o fluxo de calor na superfície do solo para o modelo HUKS baseado em valores de  $G_0$  estimados por REBS com confiabilidade de 99,19 %. Os dados de fluxo de calor a 0,08 m e na superfície do solo apresentadas na figura acima representam o período de outubro de 2015 a fevereiro de 2016.

O desempenho das placas de fluxo de calor no solo, para a localidade estudada, pode ser observado tanto pela precisão observada através da linha de tendência quanto pela exatidão mostrada pela dispersão dos pares ordenados ao longo da reta 1:1, os quais reforçam os indicadores de confiabilidade evidenciados nos gráficos da figura.

O gráfico de boxplot (Figura 10) abrange, graficamente, a mediana (quadrado no interior da caixa), o primeiro e o terceiro quartil (lado inferior e superior da caixa), bem como os valores máximos e mínimos (linhas verticais). Desta forma, o gráfico boxplot apresenta e compara a performance dos dados horários de dois modelos de placa de fluxo de calor nos períodos seco e úmido em pastagem de capim braquiária.

A dispersão dos dados é observada por meio do distanciamento dos picos máximos e mínimos dispostos nas linhas verticais em relação à caixa que contém a mediana. Esta coincidindo implica simetria entre os dados, sendo um dos indicadores de distribuição normal.

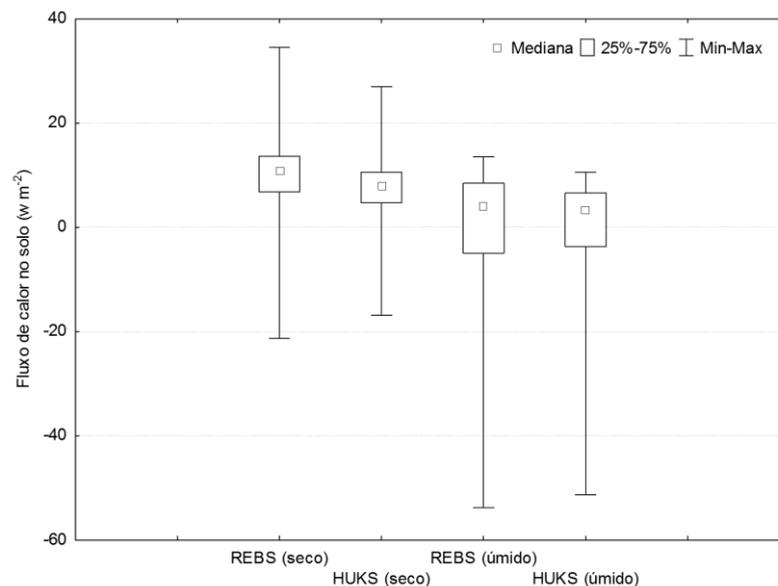


Figura 10. Gráfico boxplot para performance das placas de fluxo de calor (REBS e HUKS) para dados diários dos períodos seco e úmido em área de capim braquiária em Cruz das Almas, Bahia.

Nota-se ainda, que a dispersão dos dados para a placa HUKS é menor tanto no período seco, quanto no período úmido quando comprada com a placa REBS. Além disso, ao comparar os períodos observa-se que, durante o período úmido as placas registram valores positivo mais reduzidos, bem como presença de valores mais negativos.

A Tabela 4 complementa o gráfico boxplot com o resumo da análise estatística para os períodos seco e úmido proposto neste estudo.

Tabela 4. Resumo estatístico da análise das placas de fluxo de calor para os períodos em estudo.

| Medidas                           |               | Placas de fluxo de calor no solo |        |        |        |
|-----------------------------------|---------------|----------------------------------|--------|--------|--------|
|                                   |               | REBS                             |        | HUKS   |        |
|                                   |               | Seco                             | Úmido  | Seco   | Úmido  |
| Valores de fluxo de calor no solo | Média         | 9,29                             | -0,31  | 6,76   | -0,014 |
|                                   | Mediana       | 10,76                            | 4,05   | 7,98   | 3,39   |
|                                   | Desvio padrão | 9,92                             | 12,30  | 7,96   | 10,79  |
|                                   | Mínimo        | -21,33                           | -53,82 | -16,86 | -51,34 |
|                                   | Máximo        | 34,49                            | 13,48  | 26,99  | 10,53  |

A partir da análise da Figura 10 e da Tabela 4 é possível perceber que o modelo REBS se caracteriza por reunir os maiores valores de  $G$ , principalmente para o período seco em que registrou maior valor da mediana (10,76) quando comparado com o modelo HUKS que registrou uma mediana de 7,98. Também é possível observar que para a placa REBS a amplitude dos dados é maior que a placa HUKS no período seco. No entanto, durante período úmido observa-se uma tendência de aproximação dos valores de cada placa.

A Tabela 5 apresenta a média dos valores diurnos e noturno a partir de dados horários do fluxo de calor no solo para os modelos HFT3.1 (REBS) e HFP01 (HUKS) para períodos seco e úmido, bem como ao longo do estudo. Ressalta-se, ainda, que as médias dos valores apresentados na tabela são as mesmas para o fluxo de calor no solo  $G_8$  e  $G_0$ , e, portanto expressas conjuntamente.

Tabela 5. Valores médios horários do fluxo de calor no solo diurno e noturno obtidos pelas placas REBS e HUKS para período seco, úmido e durante todo período estudado.

| Placa de<br>fluxo de<br>calor | Fluxo de calor no solo ( $W\ m^{-2}$ ) |         |        |         |              |         |
|-------------------------------|--|---------|--------|---------|--------------|---------|
|                               | Seco                                   |         | Úmido  |         | Todo período |         |
|                               | Diurno                                 | Noturno | Diurno | Noturno | Diurno       | Noturno |
| REBS                          | 44,27                                  | -31,45  | 28,67  | -28,00  | 38,55        | -30,25  |
| HUKS                          | 31,40                                  | -22,21  | 21,31  | -19,92  | 27,70        | -21,41  |
| REBS/HUKS                     | 1,41                                   | 1,41    | 1,35   | 1,40    | 1,39         | 1,41    |

Observam-se diferenças nos valores médios ( $W\ m^{-2}$ ) do fluxo REBS (HFT3.1) durante o período diurno e noturno, em relação ao fluxo HUKS (HFP01). Percentualmente, para valores diurnos em todo período, a diferença entre os modelos foi de 28,14 % de superestimativa nos valores gerados pelo modelo REBS em relação à placa do modelo HUKS. Resultado semelhante foi observado durante o período noturno, ou seja, foi observado uma superestimativa na ordem de 29,22 % para o modelo REBS.

Ao avaliar o período seco, é possível perceber superestimativa que gira em torno de 29 % tanto para valores observados durante o dia, quanto à noite. Já para o período de maior umidade do solo, os valores diurnos apresentam superestimativa de 25,67 % para valores a partir do modelo REBS, enquanto que para os valores noturnos essa superestimativa foi de 28,8 % em relação à HUKS.

As maiores amplitudes do fluxo de calor no solo registradas pelos modelos de placas de fluxo de calor foram observadas durante o período seco, tanto para valores diurnos, quanto noturnos, devido maior variação da temperatura do solo.

Uma superestimativa para REBS (HFT3.1) foi também observada por Sauer et al. (2008), realizando testes em campo e em laboratório, comparando-a com um novo design da placa de fluxo de calor (placa perfurada). As diferenças observadas podem ser atribuídas devido à sensibilidade de posicionamento das placas, bem como as características locais, visto que as placas foram instaladas em locais distintos e, portanto, propícias às alterações.

Conforme observado pela Tabela 4, em que é perceptível maior amplitude de G para o modelo REBS em relação ao modelo HUKS, é possível que a escolha de um dos modelos de placas testados neste estudo impactará o fechamento do balanço de

energia da superfície analisada, visto que haverá sub ou superestimativa da energia disponível ( $R_n - G$ ) para os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente (H).

Durante a instalação das placas, pode ocorrer diversos erros, visto que pode ocorrer acúmulo de partículas na parte sensível à temperatura da placa, podendo variar, significativamente, as medições do fluxo de calor. Além disso, Weber et al. (2007) afirmam que erros significativos, em medidas de fluxo de calor no solo, através da utilização de fluxímetros, podem ocorrer quando decorrente de fluxos calor em substratos porosos grosseiro.

Weber et al. (2007), ao testarem o desempenho de placas de fluxo de calor no solo do modelo HUKS, encontraram valores mais elevados quando comparados com o método do gradiente de temperatura em laboratório, enquanto que, sob condições de campo, foi observado uma subestimativa de 26%, em que os autores implicam esse comportamento devido à sensibilidade de instalação do fluxímetro. Peng et al (2015), avaliando a performance de HUKS, obtiveram uma superestimativa pela placa em comparação com o método gradiente a uma profundidade de 0,02 m, no entanto, nas profundidades de 0,06 e 0,10 m, observaram uma subestimativa nos valores medidos.

#### **4.0 CONCLUSÕES**

1. O fluxo de calor no solo medido pela placa do modelo HFT3.1 (REBS) apresenta maiores amplitudes quando comparados com o modelo HFP01 (HUKSEFLUX) tanto para condição de solo seco quanto para solo úmido.
2. As diferenças entre medidas de fluxo de calor no solo através das placas podem ser atribuídas às condições sensibilidade de posicionamento, bem como diferentes características físicas do solo e de cada placa.
3. A escolha de um dos modelos pode impactar o fechamento do balanço de energia local sub ou superestimando a energia disponível para os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente ( $\lambda ET$ ).

## 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAM, N.; KUSTAS, W. P.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D.; COSH, M. H.; MCKEE, L. G. Soil heat flux variability influenced by row direction in irrigated cotton. **Advances in Water Resources**, v. 50, p. 31-40, 2012.

AMIRO, B. Measuring boreal forest evapotranspiration using the energy balance residual. **Journal of Hydrology**, v. 366, n. 1, p. 112-118, 2009.

ANDRADE, A. M. D.; SILVA, V. P. R.; MOURA, M. A. L.; SANTOS, A. B.; CARNEIRO, R. G. Influência da liteira no comportamento do fluxo de calor no solo em um fragmento de Mata Atlântica, Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 8, n. 5, p. 1294-1302, 2015.

EVETT, S.; AGAM, N.; KUSTAS, W. P.; COLAIZZI, P. D.; SCHWARTZ, R. C. Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: Comparison to soil heat flux plates. **Advances in Water Resources**. n. 50, p. 41-54, 2012.

FALCKENBERG, G. Apparatur zur Bestimmung des momentanen nächtlichen Wärmeaustausches zwischen Erde und Luft, *Meteorol. Z.* 47 154–156, 1930.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado. **Bragantia**. v. 60, n. 2, p. 139-147, Campinas, SP, 2001.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 249-264, 2000.

MOURA, M. A. L.; QUERINO, C. A. S. Variação sazonal do fluxo de calor no solo dentro de um manguezal tropical. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n. 3, p. 296-302, Campina Grande, PB, 2010.

NOVAIS, J. W. Z. *Dinâmica geotérmica do solo de uma floresta de cambarás no pantanal mato-grossense* 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – UFMT, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

OCHSNER, T. E.; SAUER, T. J.; HORTON, R. Field tests of the soil heat flux plate method and some alternatives. **Agronomy journal**, v. 98, n. 4, p. 1005-1014, 2006.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres. 1981. 440p.

PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass. **American Society of Agricultural Engineers**. v. 21, n. 3, p. 401-409, 2005.

PENG, X.; HEITMAN, J.; HORTON, R.; REN, T. Field evaluation and improvement of the plate method for measuring soil heat flux density. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 214, n. 215, p. 341-349, 2015.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C. V.; MARQUES FILHO, A. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (Kt), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 204-294, 2011.

SANTANELLO JR, J. A.; FRIEDL, M. A. Diurnal Covariation in Soil Heat Flux and Net Radiation. **American Meteorological Society**. 2003.

SAUER TJ, HORTON R. Soil heat flux. In: Hatfield JL, Baker JM, editors. *Micrometeorology in agricultural systems*. Agron Monogr, 47. Am Soc of Agron Madison, WI; p. 131–54, 2005.

SAUER, T. J. 5.5 Heat Flux Density. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, n. 4, p. 1233-1248, 2002.

SAUER, T. J.; AKINYEMI, O. D.; THERY, P.; HEITMAN, J. L.; DESUTTER, T. M.; HORTON, R. Evaluation of a new, perforated heat flux plate design. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. n. 35, p. 800-804, 2008.

SAUER, T. J.; MEEK, D. W.; OCHSNER, T. E.; HARRIS, A. R.; HORTON, R. Errors in Heat Flux Measurement by Flux Plates of Contrasting Design and Thermal Conductivity. **Vadose Zone Journal**. v. 2, n. 4, p580-588, 2003.

SOARES, W. A. Análise Comparativa do Fluxo de Calor no Solo em Profundidade e na Superfície. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 4, p. 665-679, 2103.

SILVA, T. S. M. da; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. **Boletim meteorológico da estação convencional de Cruz das Almas, BA: variabilidade e tendências climáticas**. Cruz das Almas – BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1050036/boletim-meteorologico-da-estacao-convencional-de-cruz-das-almas-ba-variabilidade-e-tendencias-climaticas>. Acesso em: Agosto de 2016.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography review**. v. 38, p. 55 – 94, 1984.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Eletromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resour. Res.**, v.16, p. 574-582, 1980.

WEBER, S.; GRAF, A.; HEUSINKVELD, B. G. Accuracy of soil heat flux plate measurements in coarse substrates – Field measurements versus a laboratory test. **Theoretical and Applied Climatology**. n. 89, p. 109-114, 2007.

## **CAPÍTULO II**

**RELAÇÃO FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA PARA GRAU  
DE COBERTURA VARIÁVEL DE CAPIM BRAQUIÁRIA**

## RELAÇÃO FLUXO DE CALOR NO SOLO E RADIAÇÃO LÍQUIDA PARA GRAU DE COBERTURA VARIÁVEL DE CAPIM BRAQUIÁRIA

**RESUMO:** O fluxo de calor no solo ( $G$ ) é um componente importante do balanço de energia na superfície, com aplicação na agricultura irrigada, bem como em estudos climatológicos. Neste estudo, as medições meteorológicas foram realizadas na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, *Campus* de Cruz das Almas, com o propósito de estabelecer relações entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o grau de cobertura do solo para estimar  $G$  em uma superfície vegetada por pastagem (*Brachiária* sp.). Os diferentes graus de cobertura do solo, correlacionaram linearmente com dados horários de  $R_n$  e  $G$ . A relação  $G/R_n$  variou com o grau de cobertura do solo, representado com média por 23, 12, e 1% da radiação líquida para as condições de solo nu, solo parcialmente coberto ( $\pm 50\%$ ) e totalmente coberto (100%). Modelos lineares foram obtidos, relacionando para estimativa de  $G$  em função de  $R_n$  e grau de cobertura do solo.

**Palavras-chave:** Balanço de energia; grau de cobertura do solo; saldo de radiação.

## HEAT FLUX RATIO IN SOIL AND NET RADIATION FOR GRASS VARIABLE COVERAGE LEVEL BRAQUIÁRIA

**ABSTRACT:** The heat flux on the soil ( $G$ ) is an important component of the energy balance at the surface, with application in irrigated agriculture, as well as climatological studies. In this study, meteorological measurements were carried out at the Federal University of Bahia Reconcavo - UFRB, Campus Cruz das Almas, in order to establish relations between the net radiation ( $R_n$ ) and soil coverage degree to estimate  $G$  on a surface vegetated by pasture (*Brachiária* sp.). The different degrees of soil cover, correlated linearly with  $R_n$  and  $G$ . hours data The ratio  $G / R_n$  varied with the degree of soil cover, represented an average of 23, 12, and 1% of net radiation for conditions bare soil, partly covered soil ( $\pm 50\%$ ) and totally covered (100%). Linear models were obtained, relating to estimate  $G$  in  $R_n$  function and degree of soil cover.

**Key-words:** Energy balance; soil coverage degree; net radiation.

## 1.0. INTRODUÇÃO

As condições climáticas que envolvem a superfície terrestre são, em parte, função das variáveis meteorológicas. A densidade e arquitetura das copas das plantas em sistemas naturais são, diretamente, influenciadas por esses fatores climáticos. Já em sistemas agrícolas, a própria copa das culturas influencia o microclima local.

Em ambos os casos, o solo exerce papel fundamental na influência do clima próximo a superfície, em que propriedades das camadas do solo como cor, umidade, textura, densidade afetam o particionamento da radiação incidente, bem como a energia utilizada para evaporação da água, do ar ou para o aquecimento do solo (SAUER & HORTON 2005).

Entre os fatores climáticos, o saldo de radiação ou radiação líquida ( $R_n$ ) e o fluxo de calor na superfície do solo ( $G$ ) são elementos essenciais em estudos de demanda hídrica das culturas, bem como no balanço de energia na interface solo-atmosfera, visto que a quantificação precisa desses componentes é fundamental na definição da energia disponível para os processos turbulentos que alteram a evaporação da água ( $\lambda LE$ ) e aquecimento do ar ( $H$ ).

De acordo com Varejão Silva (2006), o saldo de radiação ( $R_n$ ) se refere à diferença entre os ganhos (fluxos descendentes) e as perdas (fluxos ascendentes) radiativas. Já o fluxo de calor no solo ( $G$ ) se refere à quantidade de energia térmica que é transferida a níveis inferiores do solo por unidade de área durante um determinado período de tempo, sendo um importante componente do balanço de energia da superfície.

Para Zuo et al. (2010), por se tratar de um componente do balanço energético na superfície,  $G$  desempenha um papel importante no balanço de energia superficial, visto que sua precisa obtenção favorece o fechamento do balanço de energia, especialmente, com superfícies de solo descoberto ou com vegetação escassa.

Conforme relatado por Fuchs (1986),  $G$  depende principalmente da exposição da radiação solar e de suas propriedades radiativas. Dessa forma, Galvani et al. (2001) afirmam que  $G$  é função da temperatura em diferentes níveis e da condutividade térmica do solo, sendo influenciado diretamente pela variação da primeira. Além disso,  $G$  representa a quantidade de energia absorvida ou liberada na superfície do solo durante determinado período de tempo (PAYERO et al., 2005).

Kustas et al. (2000) asseguram que o fluxo de calor na superfície do solo é fundamental para elucidar o armazenamento, a transferência de calor dentro do solo, bem como a troca existente entre o solo e a atmosfera. Assim, a principal utilização prática das medições do fluxo de calor no solo é em estações meteorológicas que têm por finalidade estabelecer o balanço energético na superfície (NOVAIS, 2011).

Em vista da evidência sobre a variabilidade espacial de  $G$ , para a medição do fluxo de calor no solo em locais múltiplos, é necessário obter um valor representativo de  $G$  durante o balanço de energia em estudos de superfícies agrícolas, especialmente, coberturas parciais (SAUER & HORTON, 2005).

Para Kustas et al. (2000), o fluxo de calor no solo ( $G$ ) é estimado colocando placas de fluxo de calor a uma profundidade entre 5 e 10 centímetros e usando sondas de temperatura do solo acima das placas para estimar o armazenamento de calor nesta camada do solo.

De acordo com Sauer & Horton (2005), a capacidade de um solo de conduzir calor determina o quão rápido são as suas mudanças de temperatura durante o dia ou entre estações. Conforme relatado por Carneiro et al. (2013), a superfície do solo, com ou sem cobertura vegetal, exerce importante função sobre sua temperatura, uma vez que a cobertura vegetal é responsável pela troca e armazenamento de energia térmica nos ecossistemas terrestres.

Segundo Kustas et al. (2000), em superfícies uniformes com cobertura de vegetação alta,  $G$  representa normalmente uma fração de 5 a 10% do saldo de radiação durante meio dia, podendo ser estimado com razoável confiabilidade com o uso de 3 a 5 sensores. No entanto, os autores afirmam que, sob uma cobertura parcial do dossel,  $G$  passa a ser uma fração muito mais significativa em relação a  $R_n$ , apresentando valores que variam de 20 a 40 % da energia disponível.

De acordo Venegas et al. (2013), embora  $G$  seja parametrizado como uma proporção constante de  $R_n$  para um período de interesse, alguns estudos mostram que  $G$  não apresenta uma relação constante de  $R_n$  em escala de tempo horária, o qual pode representar mais de 50% para superfícies parcialmente cobertas pela vegetação (SANTANELLO & FRIEDL 2003).

Segundo Priante Filho et al. (2004), a variação de  $G$ , em vegetação de floresta, é comumente negligenciada para os estudos de balanço de energia, devido aos baixos valores observados durante o dia, no entanto, em pastagens, esse componente

não deve ser descartado, pois tem papel importante no fechamento do balanço de energia em função da maior amplitude diária.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar o fluxo de calor no solo (G) em campo, buscando uma relação dessa variável com o saldo de radiação (Rn) sob condições de diferentes graus de cobertura do solo para a superfície vegetada por pastagem (*Brachiária* sp.) no *Campus* da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia em Cruz das Almas, BA.

## **2.0. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Características do local de estudo**

O experimento foi desenvolvido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, *Campus* de Cruz das Almas, com a seguinte localização geográfica: 12° 40' 39" de latitude sul e 39° 06' 23" de longitude oeste, com uma altitude de 225 metros acima do nível médio do mar.

Segundo Silva et al. (2016) a região possui duas classificações climáticas, sendo a primeira proposta por Köppen Ometto (1981) do tipo Ami (chuva anual dez vezes maior que o mês mais seco) e a segunda conforme a metodologia de Thornthwaite (1984), é C1dA'a' classificada como C1 (seco e subúmido). Ainda conforme os autores, a localidade possui pluviosidade média anual de 1131,2 mm, com médias anuais que variam em torno de 81 % e 23,9 °C para umidade relativa e temperatura do ar respectivamente.

### **2.2 Parâmetros mensurados**

A pesquisa foi realizada entre os meses de outubro de 2015 e fevereiro de 2016, em que, ao longo do estudo, foram realizadas medidas através de uma estação meteorológica automática (Figura 1) localizada na área de estudo constituída de sensores para monitoramento das seguintes variáveis: saldo de radiação, temperatura do ar e do solo, umidade do ar, velocidade e direção do vento, fluxo de calor no solo e precipitação pluviométrica.



Figura 1. Estação meteorológica automática instalada área de capim braquiária na UFRB, Cruz das Almas, Bahia.

O saldo de radiação foi medido, utilizando um saldo radiômetro modelo CNR4 (*Kipp & Zonen, The Netherlands*), instalado a 1,5 m de altura, disposto sobre uma barra horizontal na área. Para registro diário da precipitação, utilizou-se um pluviômetro modelo TE525MM (*Texas Electronics, Dallas, Texas, USA*) que foi instalado com sua área de captação distante de 0,5 m da superfície do solo.

O monitoramento do grau de cobertura do solo foi realizado através do processamento de imagens digitais via *software ImageJ® 1.48v*, iniciando sob grau de cobertura zero, ou seja, solo nu até 100%. Assim, as fotografias foram capturadas em um intervalo de três dias em dez pontos escolhidos aleatoriamente na área (P5 a P10), além dos quatro (P1\_REBS1, P2\_REBS2, P3\_HUKS1 e P4\_HUKS2) referentes aos pontos de instalação das placas.

Para auxílio nas tomadas de fotografias, foi utilizado um quadrado de madeira de área 0,25 m<sup>2</sup> composto por uma régua graduada para posterior processamento de imagens via *software ImageJ® 1.48v* (Figura 2).

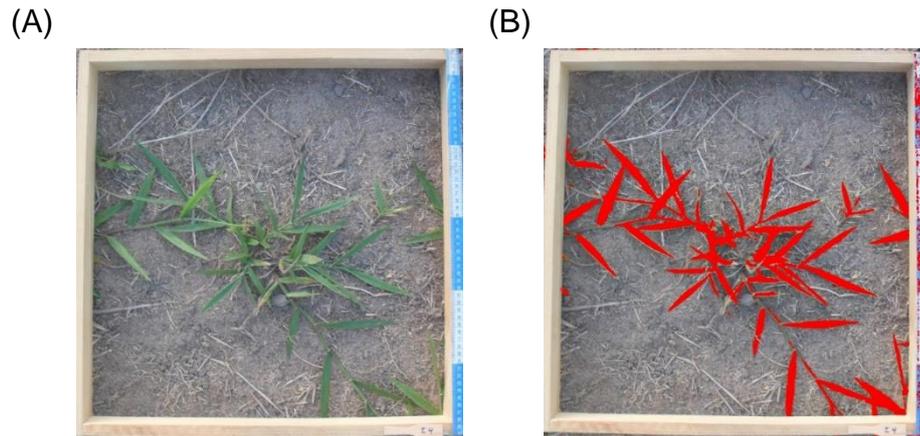


Figura 2. Avaliação do grau de cobertura do solo antes (A) e após o processamento de imagens (B) pelo *software ImageJ*® 1.48v em área de capim braquiária.

A área experimental compreende um cercado de 1764 m<sup>2</sup> e é ocupada em sua totalidade por pastagem homogênea de capim braquiária mantida por grau de cobertura variável sob condições de sequeiro. O croqui da área experimental é mostrado na Figura 3.

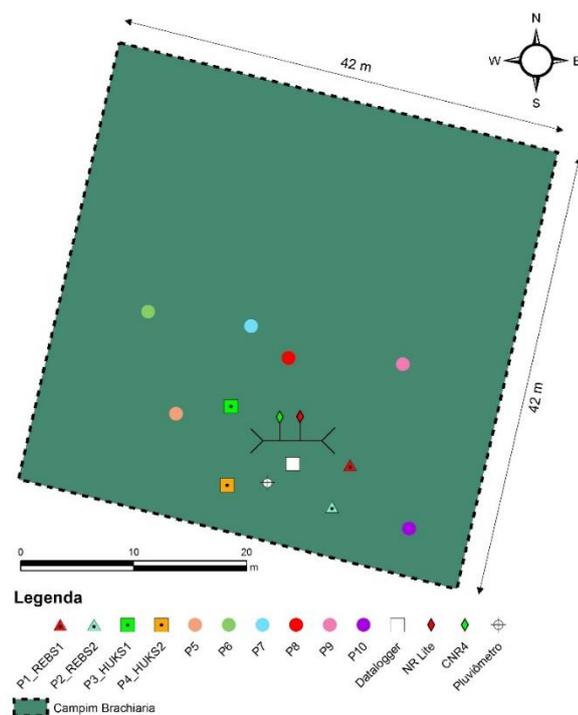


Figura 3. Croqui do campo experimental de condução dos trabalhos de campo na UFBR em Cruz das Almas, Bahia.

O fluxo de calor no solo foi calculado a partir de medições obtidas através de quatro placas de fluxo de calor, sendo duas unidades do modelo REBS (*Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, Washington, USA*) e duas unidades do modelo HUKS (*Hukseflux Thermal, Delft, Netherlands*), e oito termopares tipo T cobre-constantan (*Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah*). Cada placa de fluxo de calor no solo foi instalada horizontalmente a 0,08 m de profundidade, sendo dois termopares instalados acima do fluxímetro a uma profundidade de 0,02 e 0,06 m abaixo de superfície do solo e uma sonda de TDR (Reflectometria no domínio do tempo) para monitoramento da umidade do solo ( $\theta_v$ ) conforme esquema de instalação mostrado na Figura 4.

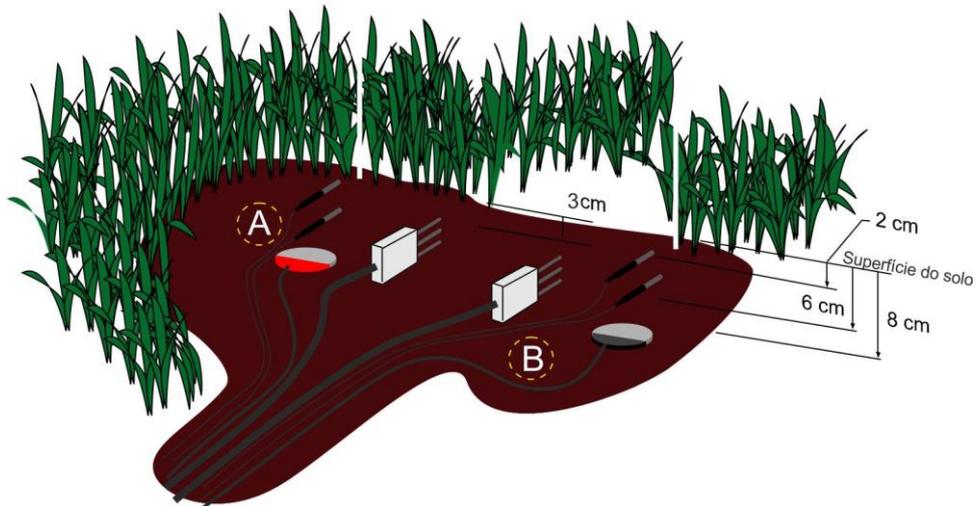


Figura 4. Representação esquemática de instalação dos sensores para obtenção do fluxo de calor no solo (G), utilizando placas do modelo HFT3.1 (A) e do modelo HFP01 (B), Cruz das Almas, Bahia.

### 2.2.1 Estimativa do fluxo de calor na superfície do solo (G)

O fluxo de calor na superfície do solo (G) foi calculado conforme Kustas et al. (2000) representado na Equação 1:

$$G = G_8 + \frac{(T_i - T_{i-1}) \cdot C_s \cdot d}{t} \quad (1)$$

em que  $G_0$  o fluxo de calor na superfície do solo ( $W m^{-2}$ ),  $G_8$  o fluxo de calor medido pela placa a 0,08 m de profundidade ( $W m^{-2}$ ),  $T_i$  é temperatura média do solo no instante  $i$  ( $^{\circ}C$ ),  $T_{i-1}$  a temperatura média do solo no instante anterior ( $^{\circ}C$ ),  $C_s$  a capacidade calórica do solo úmido ( $MJ m^{-3} ^{\circ}C^{-1}$ ),  $d$  é a profundidade de instalação da placa (m) e  $\Delta t$  o variação do tempo (3600 s).

A capacidade calórica do solo úmido foi calculada, somando-se o calor específico do solo seco com o conteúdo de água do mesmo de acordo a Equação 2:

$$C_s = d_s \cdot \left( \frac{2,01 \cdot m_m}{2,65 \cdot m_s} + \frac{2,51 \cdot m_o}{1,30 \cdot m_s} \right) + 4,19 \cdot \theta_v \quad (2)$$

em que:  $d_s$  é a densidade do solo ( $g cm^{-3}$ ),  $m_m$  a massa do material mineral (g),  $m_o$  massa do material orgânico (g),  $m_s$  a massa do solo seco (g) e  $\theta_v$  a umidade do solo em base de volume ( $cm^3 cm^{-3}$ ).

A determinação da densidade do solo foi realizada no Laboratório de Água e Solos do Núcleo de Água e Solo (NEAS), através do método do anel volumétrico (Equação 3), a partir de amostras de solo coletadas em quatro pontos na área, obtendo uma densidade média do solo  $1,75 g cm^{-3}$ .

$$d_s = \frac{m_s}{vol_c} \quad (3)$$

em que:  $m_s$  a massa do solo seco (g) e  $vol_c$  o volume do solo seco ( $cm^3$ ).

As frações mineral e orgânica foram obtidas a partir de análises laboratoriais físico-química do solo realizadas na Embrapa Mandioca e Fruticultura, sendo os resultados apresentados nos anexos I e II.

A medida da umidade do solo foi realizada através da técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), em que se baseia no princípio de que a velocidade de deslocamento de um pulso eletromagnético em um meio é função da constante dielétrica do mesmo. Assim, a determinação da umidade volumétrica do solo foi tomada com base no modelo polinomial cúbico (Equação 4) de calibração universal proposta por Topp et al. (1980) que determina a umidade em função da

constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) que não leva em consideração as características específicas de cada tipo de solo.

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot K_a - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^2 + 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^3 \quad (4)$$

em que:  $\theta_v$  é a umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $K_a$  é a constante dielétrica aparente (adimensional).

Para registro diário da precipitação, utilizou-se um pluviômetro Modelo TE 525 MM, (*Texas Electronics, Dallas, Texas, USA*) que foi instalado com sua área de captação distante de 0,5 m da superfície do solo.

### 2.2.2. Tratamento estatístico

Os dados foram coletados através de uma unidade acumuladora de dados (*Datalogger*) modelo CR1000 (*Campbell Scientific Inc, Logan, Utah, USA*) programado para realizar leituras a cada 30 segundos e armazenando em tabelas horários, sendo também agrupados em dados diários para interpretação e análise dos dados.

A consistência dos dados foi realizada por análise descritiva, bem como uma análise de regressão em que foi observado o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), o erro padrão, a significância dos coeficientes e o fenômeno estudado. Assim, essa avaliação incluiu análise de regressão com auxílio da ferramenta ANÁLISE DE DADOS da planilha eletrônica EXCEL para os dados de fluxo de calor no solo ( $G$ ) e do saldo de radiação ( $R_n$ ), bem como a relação existente com a variação do grau de cobertura da superfície estudada.

## 3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Parâmetros meteorológicos

O regime pluviométrico está relacionado aos processos de ordem química, física e biológica na superfície terrestre, o qual é capaz de alterar as características hídricas e térmicas do solo, proporcionando influência direta na determinação do fluxo da calor

no mesmo. Na Figura 5, são apresentados o total de chuva precipitada, a umidade do solo em base de volume, bem como a curva característica do grau de cobertura do solo na área em estudo.

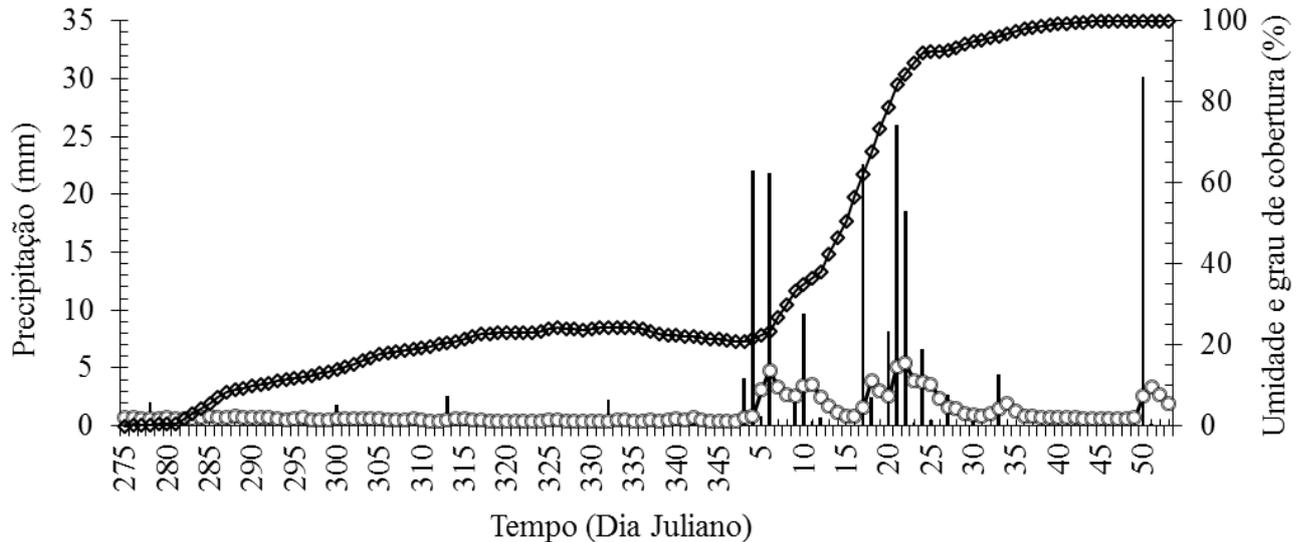


Figura 5. Precipitação (mm), umidade volumétrica do solo e grau de cobertura do solo (%) registradas em pastagem de capim braquiária em Cruz das Almas, Bahia no período de 02/10/2015 a 22/02/2016.

Ao longo do estudo, a lâmina precipitada foi de 202,6 mm, sendo observado um longo período de estiagem (outubro a dezembro), no qual apresentou uma lâmina de apenas 19,3 mm. Já no período compreendido entre janeiro e fevereiro, foi observado maior volume precipitado (183,3 mm), ou seja, 90,47 % de toda precipitação registrada na área.

Salienta-se que, durante a condução do experimento, a temperatura média do ar observada foi de 25,1 °C, com variações de 18,5 a 31,9 °C. A média da umidade relativa do ar foi de 76% ao longo do período em estudo, com mínima de 56% e máxima de 97% e da velocidade média do vento foi de 2,1 m s<sup>-1</sup>, chegando a atingir pico máximo de 5,8 m s<sup>-1</sup>.

O incremento de água no solo promoveu alterações nas características térmicas e hídricas do solo, influenciando, diretamente, na determinação do fluxo de calor no solo (G). Analisando a Figura 5, observa-se que os valores diários da umidade do solo utilizados para determinação de G sofreram pequenas variações durante o período

compreendido entre outubro e dezembro em função do baixo volume hídrico precipitado na área.

Ressalta-se, ainda, que incrementos acentuados de umidade do solo indicaram as vezes em que o solo foi umedecido através de eventos de precipitação conforme observado na figura acima a partir do quarto dia do ano até o final do estudo (DDA 53). Logo, uma maior variação nos dados diurnos de umidade volumétrica do solo foi observada durante os meses de janeiro e fevereiro, visto maior frequência dos eventos de precipitação pluviométrica.

Os valores diários do conteúdo de água no solo, em base de volume durante o período de menor ocorrência de chuvas, foram poucos significantes, uma vez que os valores de  $\theta_v$  medidos através da Reflectometria no domínio do tempo (TDR) a uma profundidade entre 3 e 6 cm eram relativamente pequenos (0,01 a 0,015 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), apresentando pouca variação durante o estudo. Esse comportamento foi, também, evidenciado por Peng et al. (2015) ao posicionarem sondas de TDR a 2 cm de profundidade. Os autores atribuíram esse comportamento, devido a existência de grandes gradientes de concentração de vapor próximos da interface solo-atmosfera e um espaço poroso cheio de ar está disponível para difusão de vapor.

Os valores observados do grau de cobertura do solo indicaram um crescimento desuniforme, devido ao período de estresse que a cultura sofreu ao longo do estudo. O estresse ocorreu devido a uma combinação de longo período sem ocorrência de precipitação pluviométrica, bem como fatores nutricionais da cultura, visto que não foram realizadas as práticas de irrigação e adubação, as quais são fundamentais no desenvolvimento vegetativo da pastagem, resultando em atraso e desuniformidade no fechamento da cobertura do solo.

Observa-se, ainda, que, em função do déficit hídrico ocasionado pela baixa precipitação, ocorreu um desenvolvimento irregular da cultura proporcionando uma redução do percentual de cobertura do solo de aproximadamente 24 % para cerca de 20 % do grau de cobertura da superfície. No entanto, ressalva-se um crescimento acelerado após o início do período chuvoso, resultando em total cobertura da superfície do solo em poucos dias após o início das chuvas. Esse comportamento já era esperado, visto o nível de estresse em que a pastagem estava submetida por conta do déficit hídrico.

### 3.2. Saldo de radiação (Rn) e fluxo de calor na superfície do solo (G)

O saldo de radiação (Rn) diz respeito à energia disponível aos processos físicos e biológicos que acontecem na interface solo-atmosfera. Logo, o saldo de radiação é definido como o balanço de todos os fluxos radiativos que entram (Radiação incidente) e que saem (Radiação refletida) em uma superfície, o qual representa um componente fundamental na estimativa do balanço de energia, bem como em aplicações climáticas e na agricultura irrigada.

De acordo Carneiro et al. (2013) a vegetação compreende em um importante receptor e armazenador de radiação solar, devido a absorção da energia que incide no sistema solo-planta, o qual sofre influência do albedo da superfície. Este, por sua vez, varia de acordo às características físico-químicas da superfície, da cor, do ângulo zenital solar entre outros, sendo que cada superfície apresenta uma resposta espectral diferente.

Os valores médios diários do saldo de radiação (Rn) e do fluxo de calor no solo (G) para o campo de pastagem (*Brachiária* sp.) são mostrados na Figura 6, em que a flutuação de Rn apresentou um comportamento esperado.

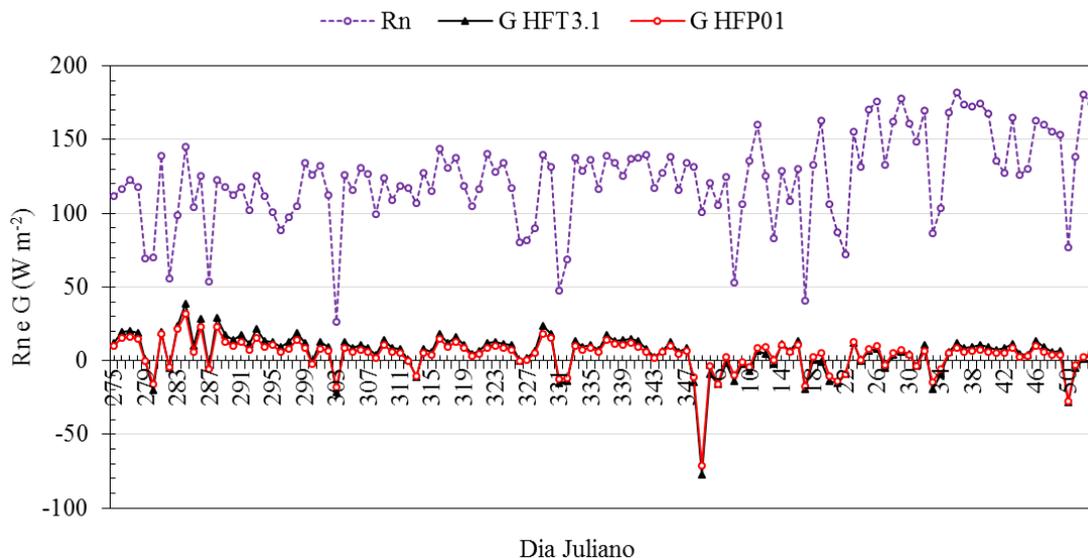


Figura 6. Médias diárias dos valores de saldo de radiação (Rn), e fluxo de calor na superfície do solo (G) em  $W m^{-2}$  em área de capim braquiária para a localidade de Cruz das Almas, Bahia.

Observa-se que os menores valores médios diários do saldo de radiação foram notados em dias de céu nublado (Dia Juliano 303 e 17), registrando uma média diária de 27,21 e 40,80 W m<sup>-2</sup>, que ocorreu em período seco e chuvoso respectivamente. Já os valores máximos médios diários foram de aproximadamente 180 W m<sup>-2</sup> que ocorreram predominantemente durante os meses de janeiro e fevereiro de 2016.

Ressalta-se, ainda, que o saldo de radiação apresentou um ciclo bem definido com valores positivos durante o período diurno compreendido entre às 06:00 e 18:00 horas e negativos a noite, apresentando maiores perdas de energia. Esse desempenho corrobora com estudos realizados por Carneiro et al. (2013) em vegetação de mata atlântica e cana-de-açúcar e por Andrade et al. (2015) em fragmentos de mata atlântica.

O fluxo de calor no solo (G) ocorre através do processo de condução, em que, através da agitação molecular, são transmitidas as moléculas adjacentes, decrescentes quando decorrentes do desequilíbrio térmico do sistema, visto a ocorrência de trocas de calor entre o solo e a atmosfera tanto durante o dia como a noite, seja por condução ou por irradiação (VAREJÃO SILVA, 2005) e há permuta de calor entre a superfície do solo e a atmosfera nos processos de evaporação e condensação de água (MOURA & QUERINO, 2010).

Em aspectos gerais, G cresce energia para atmosfera a noite, devido resfriamento do solo através da transferência de calor (fluxo negativo) por irradiação térmica. Já durante o dia, ocorre processo inverso devido ao aquecimento do solo por condução, direcionando o fluxo para as camadas mais profundas do solo (fluxo positivo).

O fluxo de calor no solo observado permitiu caracterizar seu comportamento durante o período estudado (outubro de 2015 a fevereiro de 2016). Ao avaliar a Figura 6, é possível observar diferença entre as estações seca (outubro a dezembro) e chuvosa (janeiro e fevereiro), visto alterações na variabilidade do fluxo de calor no solo e a redução da amplitude dos valores de G, bem como maior predominância de valores negativos durante o dia. Variações semelhantes foram observadas por Andrade et al. (2015) ao avaliar a influência da liteira no comportamento do fluxo de calor no solo.

Nota-se que, durante o período de baixa precipitação, o fluxo de calor na superfície do solo se apresenta com uma distribuição uniforme, em que os valores

médios diários variaram de -19,76 a 38,78 e -16,09 a 31,97 W m<sup>-2</sup> para REBS e HUKS, respectivamente, enquanto que após o início do período com maior incidência de chuvas os valores variaram de -77,43 a 13,48 para REBS e -71,15 a 12,77 W m<sup>-2</sup> para HUKS.

Neste estudo, ao longo de todo o período, foram encontrados valores médios diários de fluxo de calor no solo que variaram de -24,35 a 34,45 W m<sup>-2</sup> e -22,61 a 26,99 W m<sup>-2</sup> para as placas REBS e HUKS respectivamente. No entanto, para valores agrupados em médias horárias foi observado uma maior variação.

Com o início do período chuvoso, nota-se que os espaços porosos do solo ocupados com ar foram preenchidos por água que, devido ao seu elevado calor específico (4,19 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>), aumentou a capacidade térmica do solo em função do aumento no teor de umidade do solo (SHOFFEL & MENDES, 2005), visto que o calor específico da água é maior que o calor específico do solo (CURADO et al., 2013), mantendo o calor no solo por mais tempo.

A Figura 7 apresenta os cursos do fluxo de calor no solo ( $G_8$  e  $G$ ) para os modelos HFT3.1 (REBS) e HFP01 (HUKSEFLUX), bem como o saldo de radiação ( $R_n$ ), radiação solar incidente para dia de céu claro ( $R_{so}$ ) e radiação solar global ( $R_g$ ) para dois diferentes períodos ao longo do estudo para subperíodos ao longo do estudo.

É possível observar que a variação diurna do fluxo de calor do solo no local acompanha o curso do saldo de radiação, bem como a radiação global e é caracterizada para valores positivos após o nascer do sol com ocorrência de valores máximos observada por volta do meio-dia local e um retorno aos valores negativos após o pôr do sol.

Nota-se que, para ambos os períodos, o curso de  $G$  acompanha o curso do saldo de radiação para a superfície analisada, apresentando seus valores de pico no mesmo horário (próximo ao meio dia). Esse desempenho não é observado no curso dos valores de  $G_8$ , visto que os horários de pico ocorrem algum tempo após os valores máximos de  $G$ , porque o fluxo ocorre por condução, demandando mais tempo para a propagação do calor até 0,08 m (profundidade de instalação das placas).

Com isso, é possível verificar a influência e importância da determinação do calor armazenado na camada de solo acima das placas de fluxo de calor, visto que a não correção influenciará no fechamento do balanço de energia da superfície.

Conseqüentemente, haverá subestimativa do fluxo de calor no solo influenciando na energia disponível para os processos de aquecimento do ar e evaporação da água.

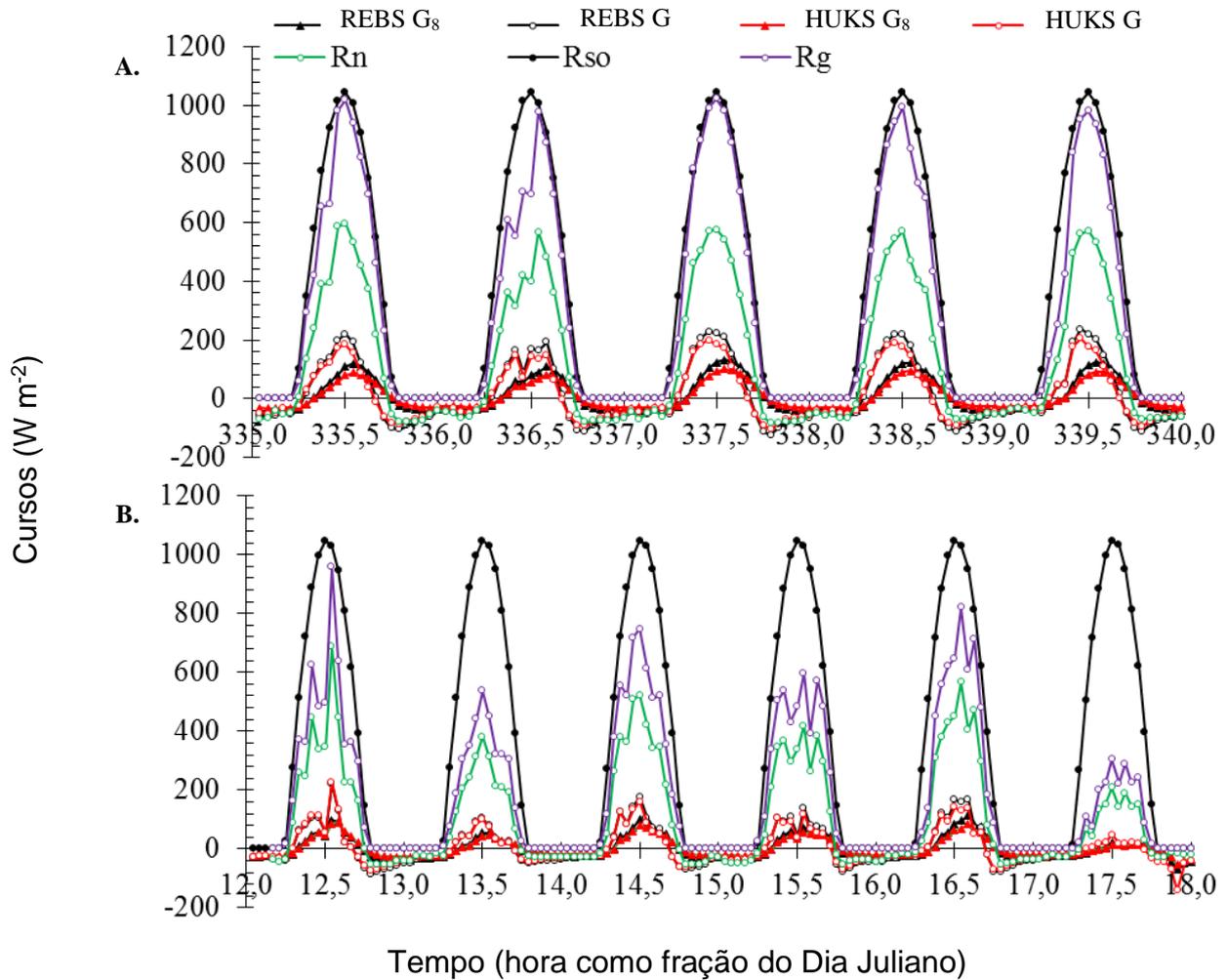


Figura 7. Evolução horária do fluxo de calor no solo ( $G_8$  e  $G$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), Radiação Solar incidente em dia de céu claro ( $R_{so}$ ) e radiação solar global ( $R_g$ ) para subperíodo entre os Dias Julianos 335 e 339 (A) e para subperíodo entre os Dias Julianos 12 e 17 (B) em Cruz das Almas, Bahia.

Observa-se na Figura 7A a ocorrência de um subperíodo com baixa nebulosidade, no entanto, conforme classificação de Querino et al. (2011), o dia de céu claro é percebido apenas no Dia Juliano 337, em que a curva da radiação global ( $R_g$ ) se aproxima o máximo da curva de radiação solar em dia de céu claro, registrando uma transmissividade atmosférica de 0,7.

Para o dia do ano 337, o valor máximo de  $G$  foi de 228,43 e 199,03  $W m^{-2}$  para REBS e HUKS, respectivamente, ao meio dia, representando cerca de 40% de  $R_n$  na

superfície, ou seja, 60% da radiação líquida disponível para os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente ( $\lambda ET$ ). Ressalta-se, ainda, que os valores máximos de  $G_8$  para o dia de céu claro ocorreram próximos às 13:00 horas.

Diferentemente da Figura 7A, a Figura 7B permite perceber a ocorrência de dias com maior cobertura de nuvens, que pode ser observados a partir da avaliação dos valores de  $R_g$  e  $R_n$ , bem como na redução dos valores de  $G$  e  $G_8$ . É importante salientar que, durante esse período, a transmissividade atmosférica se manteve com valores reduzidos, representando dias com céu parcialmente nublado. Devido a ocorrência de chuvas nesse período, foi registrado no dia do ano 17 um valor de 0,182 para transmissividade, caracterizando um dia de céu coberto.

Observa-se que, para o dia de céu nublado, os valores máximos de  $G$  foram de 57,93 e 49,09  $W m^{-2}$  para REBS e HUKS, aproximadamente 25% inferior em relação ao dia de céu claro. Essa redução evidencia a atenuação da radiação global ( $R_g$ ) através da cobertura das nuvens, fazendo com que a quantidade de radiação que chega à superfície seja inferior àquela incidente no topo da atmosfera, portanto, menor densidade do fluxo de calor no solo, sendo  $G$  responsável por aproximadamente 22 e 10% de  $R_n$  ao meio dia para as placas REBS e HUKS respectivamente.

Os valores máximos encontrados neste estudo para a superfície vegetada por pastagem são superiores aos encontrados por Soares (2009 e 2013) ao avaliar fluxo de calor no solo entre linhas e entre plantas na cultura da mamona e durante o plantio de feijão respectivamente. Além das características meteorológicas, a própria forma como a cultura cobre o solo influencia nas diferenças encontradas.

Observa-se, ainda, que, para condição de céu claro, em que o solo se encontrava seco, o comportamento do fluxo de calor no solo corrobora com Novais et al. (2012), apresentando valores semelhantes ao longo do dia. Já para um período chuvoso, e dia de céu nublado, o comportamento de  $G$  difere em função da variabilidade do conteúdo de água no solo, uma vez que o teor de água no solo altera as características térmicas do solo, influenciando na determinação do fluxo de calor no solo.

É importante salientar que, para o subperíodo da Figura 7B, foi registrado uma precipitação de 23,3 mm, sendo que 22,6 mm foi precipitado no Dia Juliano 17 (céu nublado). A chuva aconteceu por volta das 20:00 horas, promovendo alterações na umidade do solo e, conseqüentemente, na temperatura do solo, fazendo com que a

temperatura da superfície seja suprida pelo fluxo ascendente de calor no solo devido à redução da radiação solar incidente.

Com o incremento de água no solo, ocorreu aumento na condutividade térmica, promovendo maior resistência do solo às alterações de temperatura. Com isso, a transferência de calor no solo se dá a partir de camadas mais profundas em direção à superfície. Evidencia-se, ainda, valores altamente negativos durante período noturno, devido à ocorrência de precipitação entre às 20:00 e 21:00 horas, registrando os menores valores de G.

Verifica-se, com isso, a ocorrência de fluxo de calor no solo por convecção, em que a transferência de calor ocorre por fluidos em movimento (fluxo de massa), que caracteriza o processo mais importante de transferência de calor em solos úmidos. Contudo, o que se observa é uma combinação da precipitação e atenuação da radiação solar ocasionada pela cobertura das nuvens, a qual proporciona diferença acentuada entre os valores registrados para os dois dias.

Além das condições meteorológicas, outro fator que pode ter influenciado na determinação do fluxo de calor no solo foi o grau de cobertura, visto que, para o período compreendido entre os dias do ano 335 e 339, o solo se encontrava com aproximadamente 25% de cobertura, enquanto que para o período entre os DDA 12 e 17 a cobertura do solo variou de aproximadamente 38 a 60%.

### **3.3. Relação G/Rn sob grau de cobertura variável**

Como se sabe, a radiação líquida ( $R_n$ ) se distribui entre o fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ). A quantificação correta dessa distribuição é necessária para o fechamento do balanço e definição da energia disponível para os fluxos turbulentos H e LE. Essa energia disponível corresponde a ( $R_n - G$ ). Portanto se  $R_n - G$  não é adequadamente quantificado, haverá sub ou superestimativa dos fluxos turbulentos de transporte de calor e vapor d'água da superfície para atmosfera.

Na tentativa de observar o comportamento do fluxo de calor no solo em função da cobertura proporcionada pela superfície (capim braquiária), os dados horários de G foram convertido em médias diárias. Assim, com base nos resultados obtidos

através da média diária dos valores de G, foi avaliado o comportamento desta variável para diferentes percentuais de cobertura do solo.

A Figura 8 mostra o comportamento diário de G com estimativas diárias obtidas a partir de medidas das placas HFT3.1 (REBS) e HFP01 (HUKSEFLUX) em função da evolução do grau de cobertura do solo proporcionada pela vegetação local (*Brachiaria* sp.).

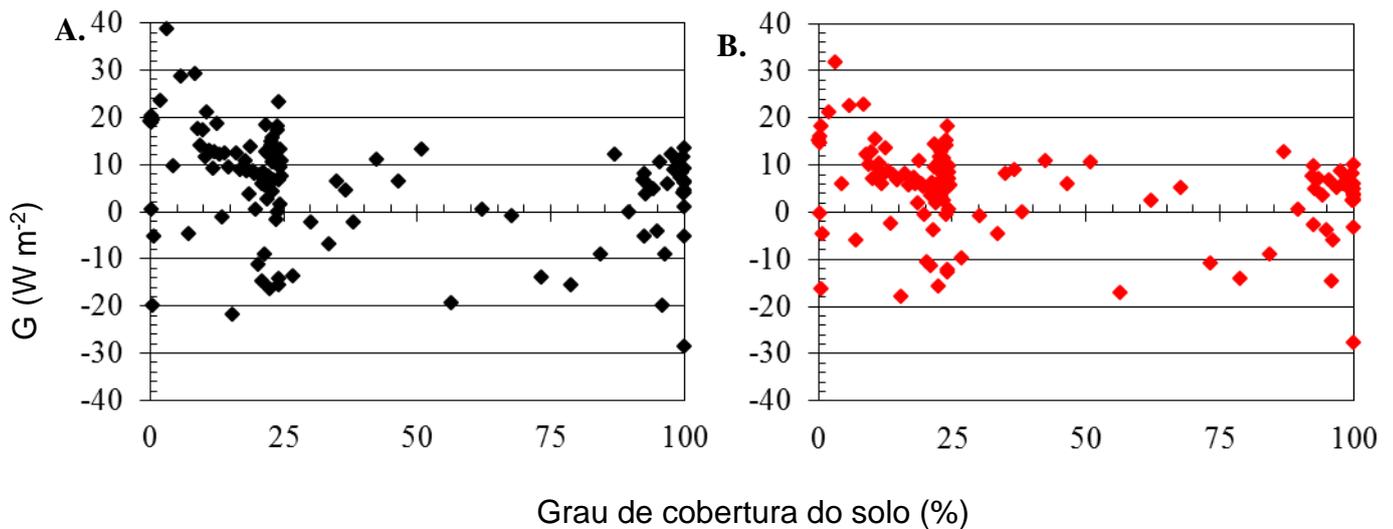


Figura 8. Fluxo de calor no solo diário ( $W m^{-2}$ ) para capim braquiária durante o estudo, com grau de cobertura do solo variando de 0 a 100% para os modelos de placas de fluxo de calor no solo: REBS (A) e HUKS (B).

Observa-se que há maior número de pontos nas proximidades de 25% de cobertura do solo. Isso se deve ao fato do crescimento irregular da cultura, visto que houve um período em que o grau de cobertura do solo reduziu devido longo período sem ocorrência de precipitação.

É possível notar que os valores de G diminuíram com o aumento do grau de cobertura do solo. No início, quando o grau de cobertura do solo era baixo os valores de G foram mais elevados com valores diários que variaram em torno de -20 a 40  $W \cdot m^{-2}$ . Essa variação foi diminuindo conforme o aumento do grau de cobertura do solo ao ponto que ao aproximar de 100% de cobertura, os valores de G chegaram a variar de aproximadamente -5 a 10  $W m^{-2}$ .

O resultado desta análise entra em conformidade com o obtido por PAYERO et al. (2005) na cultura da alfafa, em que os autores observaram essa redução mediante aumento da altura do dossel da cultura, e, por LIMA et al. (2005) na cultura do feijão

caupi ao observarem menores valores de G quando o solo se apresentava com maior cobertura.

Conforme observado na Figura 8, os valores mais elevados do fluxo de calor no solo se concentraram em condições de menor grau de cobertura do solo e reduziram com a elevação da cobertura do solo. Isso significa que no início houve deficiência de energia para cobrir os fluxos turbulentos de calor latente ( $\lambda ET$ ) e calor sensível (H), sendo a maior parte da radiação líquida absorvida e armazenada no solo.

A análise de regressão múltipla foi realizada para derivar uma equação que permita calcular G diário em função do saldo de radiação  $R_n$  ( $W\ m^{-2}$ ), grau de cobertura do solo CS (%) e umidade volumétrica  $\theta_v$  ( $cm^3\ cm^{-3}$ ) para medições das placas HFT3.1 (REBS) e HFP01 (HUKSEFLUX) respectivamente. A análise resultou nas respectivas equações:

$$G = 0,11R_n - 0,16CS - 140,3\theta_v \quad (5a)$$

$$G = 0,10R_n - 0,12CS - 92,2\theta_v \quad (5b)$$

Embora com valor  $p < 0,01$ , a análise de regressão gerou baixos valores do erro padrão da estimativa (SEE) na ordem de 9,13 e 7,9  $W\ m^{-2}$  para REBS e HUKS respectivamente a partir de 124 observações, bem como um coeficiente de correlação na ordem de 0,50 e 0,43 para as respectivas placas de fluxo de calor no solo.

O desempenho de G neste estudo, difere com o encontrado por Payero et al. (2005) ao estudarem a estimativa do fluxo de calor no solo em superfície de grama, em que os autores não obtiveram efeito significativo da altura das espécies nos valores do fluxo de calor no solo.

Baseado nos resultados obtidos do fluxo de calor na superfície do solo, foram calculados os valores médios horários da razão G/ $R_n$  para as seguintes condições de cobertura do solo: solo nu (0 % de cobertura) entre 02 a 04/10/2015, parcialmente coberto ( $\pm 50$  % de cobertura) entre 14 a 16/01/2016 e totalmente coberto (100 % de cobertura) pela vegetação de capim braquiária entre 20 a 22/02/2016.

A Figura 9 apresenta as inter-relações existentes entre a razão G/ $R_n$  e saldo de radiação ( $W\ m^{-2}$ ) para as condições de cobertura do solo estudadas a partir de

estimativas obtidas das medias das placas de fluxo de calor no solo utilizadas, (a presença de valores negativos indica que os sentidos dos fluxos foram levados em consideração).

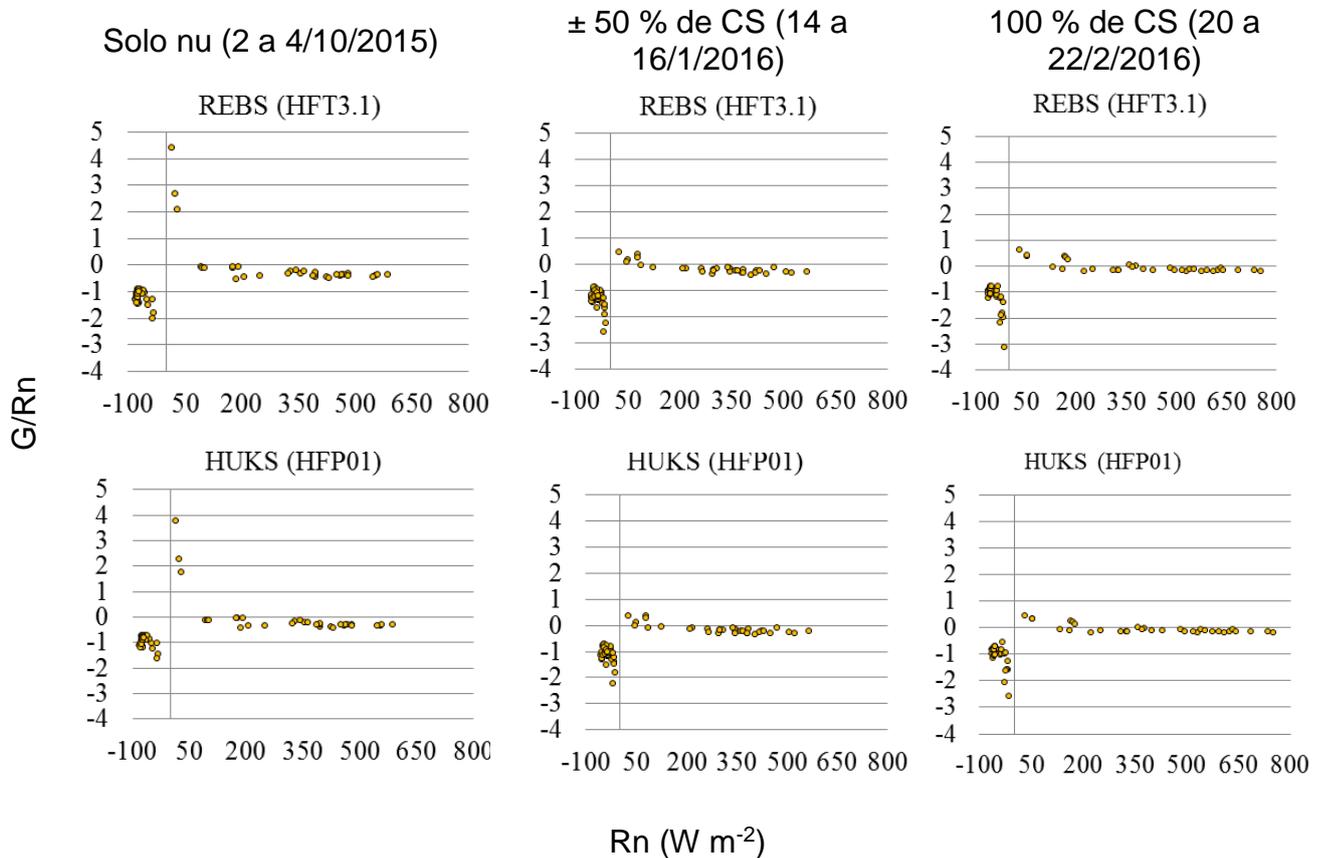


Figura 9. Relação G/Rn horária em função do saldo de radiação (Rn) para superfície com solo nu (0% de cobertura), parcialmente coberto (50% de cobertura) e totalmente coberto (100% de cobertura) por capim Braquiária em Cruz das Almas, Bahia.

É notável que, para a superfície de solo nu, magnitudes da razão G/Rn assumiram valores mais elevados comparando com os demais graus de cobertura do solo. Observa-se que, para pequenos valores positivos de Rn, os valores da relação G/Rn são predominantemente positivos e os mais elevados, atingindo valores de aproximadamente 4, ou seja, para superfície de solo nu G chega a superar Rn em até 4 vezes.

É perceptível que à medida que os valores de Rn aumentam, os valores da razão G/Rn diminuem para a superfície sem cobertura vegetal, chegando a registrar o valor de aproximadamente -0,35. Isto significa que, mesmo com elevados valores do saldo de radiação, maior parte do calor é absorvido pela superfície e armazenado no solo.

Durante período noturno (valores negativos de  $R_n$ ), em que o fluxo de energia ocorre em direção à interface solo-atmosfera, conforme distribuição dos pontos na figura acima, observa-se que a razão  $G/R_n$  assume valores que oscilam em aproximadamente -1.

Para vegetação, cobrindo aproximadamente 50 % da superfície do solo, foi observado que, para pequenos valores positivos de  $R_n$ , a relação  $G/R_n$  atingiu o valor de aproximadamente 0,4, ou seja, para esse percentual de cobertura do solo, o fluxo de calor, na superfície do solo, foi de até 40 % o valor do saldo de radiação ( $R_n$ ). Observa-se, ainda, que, para valores mais elevados do saldo de radiação, a relação  $G/R_n$  apresenta valores em torno de 0 e -0,3.

Para a superfície totalmente coberta pelo capim braquiária, é perceptível que, para pequenos valores positivos de  $R_n$  (até  $50 \text{ W m}^{-2}$ ), o valor da razão  $G/R_n$  é predominantemente positivo, assumindo o valor de aproximadamente 0,38. Isso evidencia que a deficiência de energia para suprir os fluxos turbulentos ( $\lambda ET$  e  $H$ ) do equilíbrio térmico resultante de pequenos valores da radiação líquida pode ser preenchido em aproximadamente 38 % pelo fluxo de calor no solo.

Durante horário de inversão térmica (início da manhã e final da tarde),  $G$  representa uma fração muito mais significativa de  $R_n$ , chegando a assumir mais elevados da razão  $G/R_n$ . Isto se dá porque, durante esses horários, os valores de  $R_n$  são próximos de zero e  $G$  ainda apresenta valores elevados, conseqüentemente, a obtenção de valores mais elevados na relação  $G/R_n$ .

A partir da análise de regressão linear dos dados horários, foi possível calcular a dependência estatística do fluxo de calor no solo fundamentado em informações do saldo de radiação para diferentes condições de graus de cobertura do solo, bem como a quantificação da partição da energia disponível para o aquecimento do solo conforme apresentado na Figura 10, em que a linha sólida representa a regressão linear entre os dois parâmetros.

Observa-se que, para a superfície estudada, as médias dos dados horários de  $G$  e  $R_n$ , para diferentes graus de cobertura do solo, apresentaram boa correlação, sendo que o modelo linear foi o que melhor ajustou os dados, o qual na análise de regressão sempre apresentou valores de  $R^2$  maiores que 90% e valor  $p < 0,01$ . Comportamento semelhante foi observado por Payero et al. (2005) ao avaliarem a

relação entre  $G$  e  $R_n$  para grama com diferentes alturas de planta a partir de dados agrupados a cada 20 minutos.

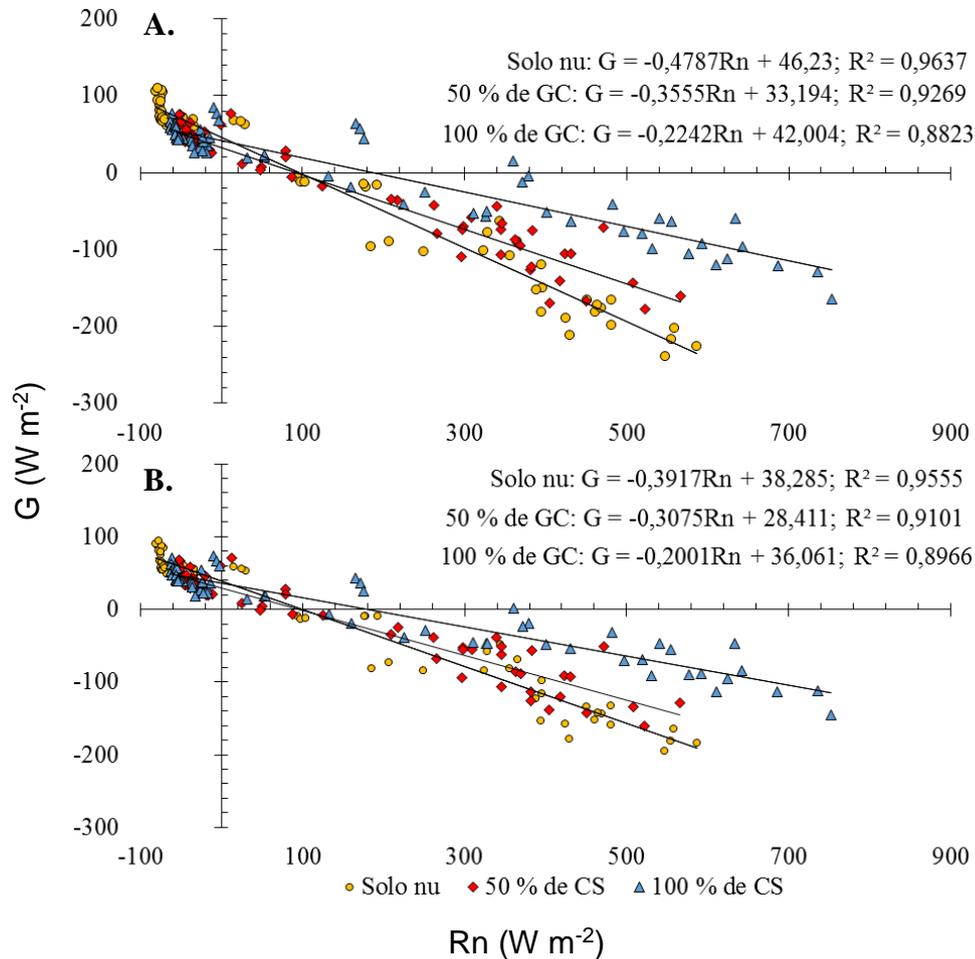


Figura 10. Relação horária entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o fluxo de calor no solo ( $G$ ), ambos em  $W\ m^{-2}$  para diferentes graus de cobertura do solo em campo de capim braquiária com as placas REBS (A) e HUKSEFLUX (B), UFRB, Cruz das Almas, Bahia.

Nota-se que a inclinação da reta diminui com o aumento do grau de cobertura do solo, assumindo valores de -0,48; -0,35 e -0,22 para REBS e valores de -0,39; -0,30 e -0,20 para HUKS sob condição de solo nu, parcialmente, coberto e totalmente coberto pela vegetação. Isso indica que, em função da flutuação dos valores de  $R_n$ , observa-se maiores variações de  $G$  para solo descoberto conforme também observado por Eulestein et al. (2004), seguido da cobertura parcial e total do solo proporcionada pela pastagem.

A intercepção em y, nas equações para os diferentes graus de cobertura, é variável, assumindo valores de 46,23; 33,19 e 42,00  $W m^{-2}$  para REBS e valores de 38,28; 28,41 e 36,06  $W m^{-2}$  para HUKS, indicando que, durante períodos noturnos, em que o valor de  $R_n$  chega a zero o fluxo de calor no solo inverte o seu sentido, dirigindo-se do interior para a superfície do solo.

A porção da radiação líquida utilizada para o fluxo de calor no solo foi de aproximadamente 23, 12 e 1% para condição de solo nu, parcialmente coberto ( $\pm 50\%$ ) e totalmente coberto (100%) por capim braquiária respectivamente. Isso significa que, para essas condições, 67, 88 e 99 % do saldo de radiação foram disponíveis para os fluxos turbulentos de calor latente (LE) e calor sensível (H).

Lima et al. (2005), trabalhando com feijão caupi no brejo paraibano, encontraram o valor médio de 10% de  $R_n$  destinado ao fluxo de calor no solo, cujos maiores valores encontrados foram no início do cultivo, tendo em vista que o solo se encontrava com baixa cobertura vegetal. Por sua vez, Teixeira (2001), avaliando os componentes do balanço de energia para o primeiro ano da cultura da banana, obteve, para a fração do saldo de radiação, 11%, utilizando para o aquecimento do solo.

Hsieh et al. (2009), avaliando as características de G em superfície vegetada por pastagens, encontraram uma fração de 24% da radiação líquida para o fluxo de calor no solo, enquanto que Lima et al. (2013), estudando o balanço de energia na cultura da mamona, observaram redução de 12 a 8% da razão  $G/R_n$  em três anos de estudo.

A partição do saldo de radiação empregada no processo de aquecimento do solo durante o estudo conferem com Kustas et al., (2000), em que afirmam que para uma superfície com alta cobertura vegetal, G representa uma fração de 5 - 10% de  $R_n$ , sendo que essa fração pode ser ainda mais significativa (20 - 40%) sob condição de vegetação esparsa.

Estes resultados concordam com os obtidos por Eulestein et al., (2004), em que encontraram maior fração do saldo de radiação proposto ao fluxo de calor no solo para a superfície de solo nu, ao estudarem influência da cobertura vegetal sobre a fração do fluxo de calor no solo, no equilíbrio de energia da superfície ativa.

Uma análise de regressão linear foi utilizada para buscar uma relação estatística entre o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação para valores horários durante todo o período de estudo (Figura 11), em que a disposição dos pontos de medição indicam a correlação linear existente entre os parâmetros.

Após a análise de regressão linear, foi possível gerar equações que permitem calcular o fluxo de calor no solo em função do saldo de radiação. O coeficiente de determinação para o período estudado foi de 0,87 e 0,85 para REBS e HUKS respectivamente, e valor  $p < 0,01$ , indicando relevante dependência estatística entre os dados analisados.

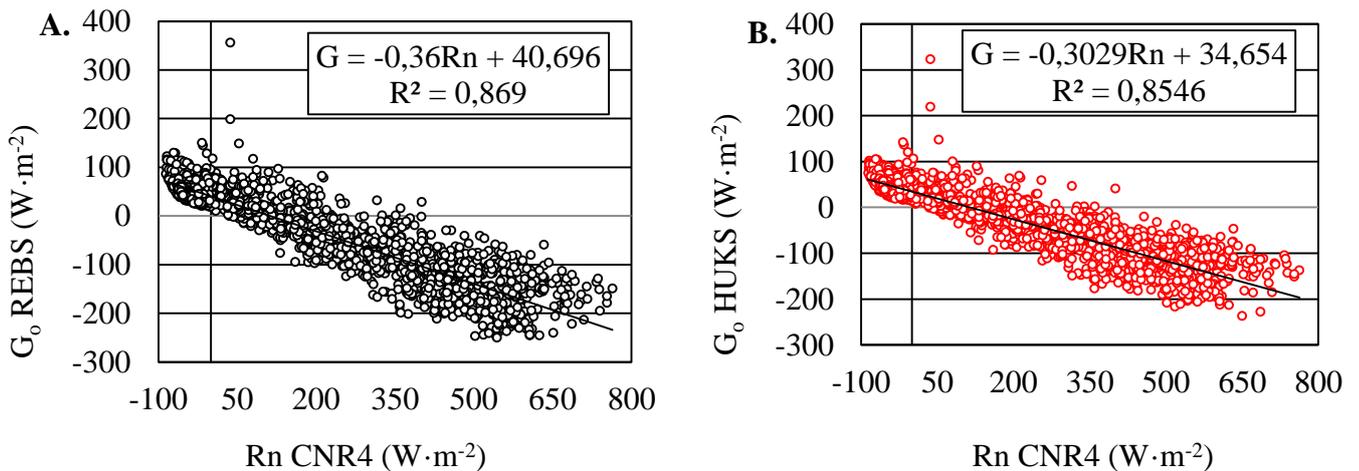


Figura 11. Dependência dos valores horários de fluxo de calor no solo (G) em função do saldo de radiação (Rn) para as placas REBS (A) e HUKSEFLUX (B) compreendido entre 02/10/2015 e 22/02/2016 na UFRB, Cruz das Almas, Bahia, com grau de cobertura do solo variando de 0 a 100%.

Nota-se, ainda, que, para os modelos gerados, a inclinação da reta se apresenta com valores próximos ao longo de todo o período para valores horários de fluxo de calor no solo e saldo de radiação, assumindo os valores de -0,36 e -0,30 para REBS e HUKS respectivamente e intercepta o eixo y com valores de 40,7 e 34,65 para as respectivas placas de fluxo de calor no solo.

#### 4.0. CONCLUSÕES

1. O modelo encontrado a partir da análise de regressão múltipla para estimativa do fluxo de calor na superfície do solo não se ajusta quando baseado em informações do saldo da radiação e grau de cobertura do solo para a vegetação de capim *Brachiária* sp.

2. O grau de cobertura da superfície do solo influencia na densidade do fluxo de calor no solo, quando comparado com superfície descoberta.
3. A partição do saldo de radiação utilizada no processo de aquecimento do solo foi variável em função do grau de cobertura do solo.
4. É possível calcular o fluxo de calor do solo em função dos valores de saldo de radiação para grau de cobertura definido na superfície analisada.

## 5.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. M. D.; SILVA, V. P. R.; MOURA, M. A. L.; SANTOS, A. B.; CARNEIRO, R. G. Influência da liteira no comportamento do fluxo de calor no solo em um fragmento de Mata Atlântica, Alagoas. **Revista Brasileira de geografia Física**. v. 8, n. 5, p. 1294-1302, 2015.

BIUDES, M.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J.S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.24, n.2, p.135-143, 2009.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; ANDRADE, a. M. D.; santos, a. B.; MAIA, R. G. X. Fluxo de calor do solo e saldo de radiação dentro de uma área de mata atlântica em comparação com uma área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 3, Campina Grande, PB, 2013.

CURADO, L. F. A.; RODRIGUES, T. R.; OLIVEIRA, A. G.; NOVAIS, J. A. Z.; de PAULO, I. J. C.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. Z. Analysis of thermal conductivity in a seasonal flooded forest in the northern pantanal. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 28, n. 2, 125-128, 2013.

EULESTEIN, F.; LESNY, J.; CHOJNICKI, B. H.; KEDZIORA, A.; OLEJNIK, J. Analysis of the interrelation between the heat balance structure, type of plant cover and weather conditions. **International Agrophysics**. v. 19, p. 125-130, 2004.

FUCKS, M., Heat flux, in: Klute, A. Method of soil analysis, Part 1. 2 ed. ASA and SSSA, Madison, p. 957-968, 1986.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado. **Bragantia**. v. 60, n. 2, p. 139-147, Campinas, SP, 2001.

HSIEH, C.; HUANG, C.; KIELY, G. Long-term estimation of soil heat flux by single layer soil temperature. **International journal of biometeorology**. v. 53, p. 113-123, 2009.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 249-264, 2000.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; BORGES, E.; SILVA, I. F.; LIRA, C. A. B. O. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 9, n. 4, p. 527-534, Campina Grande, PB, 2005.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O.; SILVA, I. F. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration, energyexchange, yield and water use efficiency of castor grown underrainfed conditions in northeastern Brazil. **Industrial Crops and Products**. v. 50, p. 203-211, 2013.

MOURA, M. A. L.; QUERINO, C. A. S. Variação sazonal do fluxo de calor no solo dentro de um manguezal tropical. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n. 3, p. 296-302, Campina Grande, PB, 2010.

NOVAIS, J. W. Z. *Dinâmica geotérmica do solo de uma floresta de cambarás no pantanal mato-grossense* 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – UFMT, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

NOVAIS, J. W. Z. RODRIGUES, T. G.; CURADO, L. F. A.; OLIVEIRA, S. R. P.; NOGUEIRA, J.S. Variabilidade sazonal horária das propriedades térmicas em gleissolo háplico no norte do pantanal. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 33, n. 1, p. 2563-2570, 2012.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres. 1981. 440p.

PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass. **American Society of Agricultural Engineers**. v. 21, n. 3, p. 401-409, 2005.

PENG, X.; HEITMAN, J.; HORTON, R.; REN, T. Field evaluation and improvement of the plate method for measuring soil heat flux density. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 214, n. 215, p. 341-349, 2015.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G. L.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NUNES, P. C.; SOUZA, L. S.; COUTO, E. G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J. L.; MIRANDA, E. J.; PRIANTE, P. C.; FRITZEN, C. L.; LACERDA, M.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S.; SULI, G. S.; SHIRAIWA, S.; PAULO, S. R.; SILVEIRA, M. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 863-876, 2004.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C. V.; MARQUES FILHO, A. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (Kt), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 204-294, 2011.

SANTANELLO JR, J. A.; FRIEDL, M. A. Diurnal Covariation in Soil Heat Flux and Net Radiation. **American Meteorological Society**. 2003.

SAUER T. J.; HORTON R. Soil heat flux. In: Hatfield JL, Baker JM, editors. *Micrometeorology in agricultural systems*. Agron Monogr, 47. Am Soc of Agron Madison, WI; p. 131–54, 2005.

SCHÖFFEL, E. R.; MENDES, M. E. G. Influence of coverage on the vertical profile of soil temperature. In **XIV Brazilian Congress of Agrometeorology**. In XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Piracicaba. São Paulo Anais, 2005.

SILVA, T. S. M. da; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. **Boletim meteorológico da estação convencional de Cruz das Almas, BA: variabilidade e tendências climáticas**. Cruz das Almas – BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1050036/boletim-meteorologico-da-estacao-convencional-de-cruz-das-almas-ba-variabilidade-e-tendencias-climaticas>. Acesso em: Agosto de 2016.

SOARES, W. A. Análise Comparativa do Fluxo de Calor no Solo em Profundidade e na Superfície. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 4, p. 665-679, 2013.

SOARES, W. A. *Fluxos de água e de energia em feijão macassar e mamona no nordeste do Brasil* 2009. 154 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano da cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 5, n. 1, p. 28-32, Campina Grande, PB, 2001.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography review**. v. 38, p. 55 – 94, 1984.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Eletromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resour. Res.**, v.16, p. 574-582, 1980.

VAREJÃO SILVA, M. A. (2005) Meteorologia e Climatologia, Versão Digital, Recife. 522p. Disponível em < <http://www.agritempo.gov.br/> > Acesso em 06 de mai. 2016.

VENEGAS, P.; GRADÓN, A.; JARA, J.; PAREDES, J. Hourly estimation of soil heat flux density at the soil surface with three models and two field methods. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 112, p. 45-59, 2013.

ZUO, J.; WANG, J.; HUANG, J.; LI, W.; WANG, G. Y. REN, H. Estimation of ground heat flux and its impact on the surface energy budget for a semi-arid grassland. **Sciences in Cold and Arid Regions**. v. 3, n. 1, p. 41-50, 2011.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos sobre fluxo de calor no solo ( $G$ ), utilizando placas de fluxo de calor, visam avaliar o desempenho das mesmas, bem como a quantificação do saldo de radiação ( $R_n$ ) destinada ao aquecimento do solo e, além disso, avaliar as trocas de calor entre solo e atmosfera. Os resultados apresentados neste trabalho caracterizam a performance dos modelos de placas HFT3.1 (REBS) e HFP01 (HUKSEFLUX), mas também a quantificação do saldo de radiação destinado ao fluxo de calor no solo para diferentes graus de cobertura no solo no *Campus* da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia em Cruz das Almas, Bahia.

Torna-se evidente que a escolha de um dos modelos, irão impactar o fechamento do balanço de energia na superfície estudada. Neste contexto, acredita-se que, a partir de estudos de balanço de energia nesta superfície, é possível quantificar o impacto causado pela utilização dos modelos de placas de fluxo de calor. Além disso, ressalta-se a importância da estimativa do calor armazenado na camada acima das placas, pois diferenças foram observadas quando corrigidas para a superfície do solo.

Para concluir, é perceptível a influência da cobertura do solo na determinação do fluxo de calor na superfície do solo, sendo, também, possível determinar a partição do saldo de radiação destinado ao fluxo de calor no solo para a superfície analisada. No entanto, o ajuste matemático encontrado para determinar  $G$  em função de  $R_n$  e grau de cobertura do solo não se adequou corretamente. Desta forma, recomenda-se estimar  $G$  apenas em função de  $R_n$  para grau de cobertura definido.

# Anexos

# Anexo A



**Embrepa**  
Mazdioca e Fruticultura

**Laboratório de Física do Solo**

**Nome do interessado:** João Paulo Chaves Couto  
**Endereço:** UFRB  
 Cruz das Almas  
**Município:**  
 Data: 09/10/2015

**Estado:** BA



**Diante Souza**  
Pesquisador  
Responsável Laboratório de Física do Solo

**Resultados de análises físicas do solo**

| Nº amostra | Lab | Identificação | Composição granulométrica (g/kg) |              |             |            |                | Dispersão com NaOH |       |        |                        |         | Argila H <sub>2</sub> O (g/kg) | Argila Floculação (%) | Retenção de água - U <sub>g</sub> (%) |            |      | Densidade (kg/dm <sup>3</sup> ) | Partículas |            |
|------------|-----|---------------|----------------------------------|--------------|-------------|------------|----------------|--------------------|-------|--------|------------------------|---------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------|------|---------------------------------|------------|------------|
|            |     |               | Ar. muito grossa                 | Areia grossa | Areia média | Areia fina | Ar. muito fina | Areia total        | Silte | Argila | Classificação textural | 0,1 atm |                                |                       | 15 atm                                | Água disp. | Solo |                                 |            | Partículas |
| 16474      |     | 1             | 25                               | 238          | 347         | 209        | 54             | 873                | 37    | 90     | Areia Franca           | #       | #                              | #                     | #                                     | #          | #    | #                               | #          | #          |
| #          | #   | #             | #                                | #            | #           | #          | #              | #                  | #     | #      | #                      | #       | #                              | #                     | #                                     | #          | #    | #                               | #          | #          |
| #          | #   | #             | #                                | #            | #           | #          | #              | #                  | #     | #      | #                      | #       | #                              | #                     | #                                     | #          | #    | #                               | #          | #          |

Rua Embrepa, s/n - CP 007 - 44.380-000 - Cruz das Almas - BA

Tel: (75) 3312-8075 - www.cnpmf.embrepa.br - sac@cnpmf.embrepa.br



Menciões e Fruticultura

**LABORATÓRIO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**  
**RESULTADO DE ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO**

Interessado: **JOÃO PAULO CHAVES**  
Município: **CRUZ DAS ALMAS**

Estado: **BA** Propriedade (Sítio ou Fazenda) **UFRRB**  
Entrada: **25/09/2015**

OBS:

| Registro | Ref. de Amostragem | Resultados Analíticos-Fertilidade Macronutrientes |                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | Micronutrientes    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|----------|--------------------|---|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|          |                    | pH  | P                    | K                  | Ca                 | Mg                 | Ca+Mg              | Al                 | Na                 | H+Al               | SB                 | CTC                | V                  | M                  | O                  | Cu                 | Fe                 | Zn                 | Mn                 |
|          |                    | em água   | em CaCl <sub>2</sub> | mg/dm <sup>3</sup> |
| 15-2149  | UNCA 028           | 5,0   | --                   | 4                  | 0,09               | 0,33               | 0,18               | 0,51               | 0,3                | 0,02               | 1,65               | 0,62               | 2,27               | 27                 | 7,0                | --                 | --                 | --                 | --                 |

DATA EMISSÃO

RESP / LABORATÓRIO DE SOLOS N. PLANTAS

ENGENHEIRO AGRÔNOMO

Rua Emborapa S/N - Cx. Postal 007 Cruz das Almas - Ba. 44386-000  
Fone: 0xx75 3312 3042 e-mail: sac@cpqmaf.embrapa.br

## Anexo B