

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL E IMAGENS LANDSAT
PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DO
ALGODOEIRO IRRIGADO NO OESTE DA BAHIA**

VALÉRIA PEIXOTO BORGES

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA

FEVEREIRO - 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

APLICAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL E IMAGENS LANDSAT PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DO ALGODOEIRO IRRIGADO NO OESTE DA BAHIA

VALÉRIA PEIXOTO BORGES

Engenheira Agrônoma
Escola de Agronomia da Universidade Federal da Bahia, 2006.

Dissertação submetida à Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Agrárias, Área de Concentração: Engenharia e Manejo de Irrigação

Orientador: Prof. PhD. Aureo Silva de Oliveira

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CRUZ DAS ALMAS - BAHIA - 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

B732 Borges, Valéria Peixoto.
Aplicação do algoritmo SEBAL e imagens Landsat para estimativa da demanda hídrica do algodoeiro irrigado no Oeste da Bahia. / Valéria Peixoto Borges. - 2008.
84f.; il.: tab., graf.

Orientador: Prof. PhD. Aureo Silva de Oliveira.
Dissertação: (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, 2008.

1. Algodão – evapotranspiração. 2. Sensoriamento remoto – algodão 3. Algodão – balanço de energia I. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II. Título.

CDD 20 ed. 633.51

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. PhD. Aureo Silva de Oliveira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
(Orientador)

Prof. PhD. Bernardo Barbosa Silva
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Gregório Guirado Faccioli
Universidade Federal de Sergipe

Dissertação homologada pelo Colegiado de Curso de Mestrado em Ciências
Agrárias em
Conferindo o Grau de Mestre em Ciências Agrárias em

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Nalva e Dilson, pela vida, pelo amor, apoio e oportunidade que me concederam de continuar os estudos.

À minha irmã, Viviane, por estar sempre ao meu lado, pela sua alegria e sinceridade.

A Cleyton, pelo seu amor e companheirismo, conforto e estímulo nas dificuldades.

À Lia, Dineia, Aninha e Pedro, grandes exemplos de fé e força, que enquanto estavam fisicamente entre nós, torceram pelas minhas vitórias.

Aos meus tios e primos, que sonharam comigo, incentivaram e hoje são parte desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai Espiritual, fonte da vida, da força e do amor.

Ao Professor Aureo Oliveira, grande Mestre e Amigo, pela confiança, orientação e dedicação, dando-me oportunidades de crescimento profissional, além da amizade e o carinho dispensado especialmente nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Vital Paz, pelos conselhos, pelas oportunidades, por toda alegria e solidariedade.

Ao Professor Francisco Pereira, por ter me convidado a participar do Núcleo de Engenharia de água e Solo (Neas) e pela boa vontade em ensinar e transmitir sua experiência profissional.

Ao Professor Bernardo da Silva, pela co-orientação, bondade e apoio incondicional quando estive em Campina Grande, e disponibilidade sempre que precisávamos.

Ao Senhor Hélio Busato, por ter permitido a realização do trabalho na sua propriedade; ao Engenheiro Agrônomo Lourenço Nery, pela ajuda prestada em todas etapas da dissertação e a todos demais funcionários da Fazenda Busato que, sempre cordialmente, auxiliaram com nosso trabalho.

Ao Professor José Ferreira pela boa vontade e colaboração durante minha estadia em Campina Grande, auxiliando-me no treinamento do SEBAL.

A todos demais professores do Mestrado, especialmente Eugênio Coelho, Ana Cristina Loyola e Carlos Ledo pelas instruções e colaboração com meu aperfeiçoamento profissional.

A Dijaneide Ramos, pelo treinamento com o processamento das imagens.

À bibliotecária Isaelce pela ajuda na elaboração final das referências bibliográficas.

Aos funcionários do Mestrado em Ciências Agrárias, em especial Sidinha, Edmilson e Tiu.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciências Agrárias pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao Conselho de Aperfeiçoamento e Capacitação de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Bahia pelo financiamento da pesquisa.

Aos colegas do Mestrado, em especial os amigos “Tatus” Bruna, Márcio e Daniel, pelas noites de estudo, companheirismo e pela grande amizade que surgiu, um dos maiores presentes advindos do Mestrado.

Aos amigos que estiveram sempre ao meu lado pelo incentivo e carinho, sem os quais seria difícil chegar aqui, em especial Daianny, Flávia, Mariana, Patrícia, Vanessa e todos irmãos da Associação Espírita Obreiros da Fraternidade.

À Antonia Cazaes e família, sempre carinhosos e prestativos.

Aos funcionários do Neas e da Superintendência de Obras, pela alegre convivência.

Aos professores Clovis Peixoto, Maria de Fátima Peixoto, José Fernandes de Melo e Joelito Rezende, que desde a graduação vieram lapidando minhas potencialidades, incentivando-me à carreira acadêmica.

A todos que conviveram comigo neste período e que, de alguma forma, auxiliaram com este trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO	01
Capítulo 1	
OBTENÇÃO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE ALGODOEIRO IRRIGADO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL E IMAGENS TM - LANDSAT 5.....	09
Capítulo 2	
BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO ALGODOEIRO IRRIGADO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL E IMAGENS TM - LANDSAT 5.....	40
CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
ANEXOS.....	82

APLICAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL E IMAGENS LANDSAT PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DO ALGODOEIRO IRRIGADO NO OESTE DA BAHIA

Autora: Valéria Peixoto Borges

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi determinar, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração do algodoeiro irrigado por pivô central, na Fazenda Busato (13,25° S; 43,42° W; 436 m), a 30 km da cidade de Bom Jesus da Lapa, região Oeste da Bahia. Foram adquiridas seis imagens TM - Landsat 5, correspondentes a datas distintas do ciclo de produção da cultura no primeiro semestre de 2007. O saldo de radiação (R_n) e os fluxos de calor sensível (H), de calor no solo (G) e de calor latente (LE) foram determinados por meio do algoritmo SEBAL. Para tal, utilizou-se a irradiância medida pelos sete canais do sensor TM e dados meteorológicos obtidos nas proximidades da área irrigada. Verificou-se que o saldo de radiação variou de 430 W m^{-2} (DDA 148) a 700 W m^{-2} (DDA 84). O intervalo de valores de R_n mais freqüentemente observado nos pivôs foi de 550 a 600 W m^{-2} , no período de máximo desenvolvimento da cultura. Na fase inicial do algodão G atingiu 113 W m^{-2} , enquanto que H alcançou 350 W m^{-2} . Por outro lado, na fase reprodutiva, quando a planta apresentou o maior índice de área foliar, os valores máximos de G e H foram, respectivamente, 60 e 16 W m^{-2} . Valores aproximados de fluxo de calor latente para a fase reprodutiva estiveram entre 450 a 600 W m^{-2} , correspondendo a cerca de 90% de R_n . Logo após o plantio, registrou-se LE de 330 W m^{-2} e na época de colheita em torno de 350 W m^{-2} . Em termos médios, a evapotranspiração do algodoeiro estimada pelo SEBAL foi $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$ nas primeiras semanas após o plantio, atingiu $6,6 \text{ mm dia}^{-1}$ no máximo de cobertura do solo e reduziu para $4,2 \text{ mm dia}^{-1}$ durante a colheita. Os resultados concordaram com outras pesquisas realizadas com algodão em regiões áridas ou semi-áridas.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, balanço de energia, evapotranspiração, algodão

USE OF THE SEBAL ALGORITHM AND LANDSAT IMAGES FOR ESTIMATION OF COTTON WATER USE IN THE WEST REGION OF BAHIA

Author: Valéria Peixoto Borges

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT: This research aimed at estimating by means of SEBAL algorithm and Landsat 5 TM images the radiation and energy balance components and evapotranspiration of center pivot-irrigated cotton fields. The selected area is in the Busato Farm (13,25° S; 43,42° W; 436 m asl), 30 km west of the Bom Jesus da Lapa town, western of Bahia. Six images corresponding to distinct dates over the crop season (first semester of 2007) were used for implementation of SEBAL routines. In each image a reduced portion was selected which included the whole perimeter of the Busato Farm with its 25 center pivots all used to irrigate cotton. The net radiation (R_n), the sensible heat flux (H), the soil heat flux (G) and the latent heat flux (LE) were determined by the SEBAL routines. Irradiation measure by the seven reflective bands of TM – Landsat and weather data from a nearby weather station were the main inputs for all calculations. Results shown that the net radiation R_n varied from 430 W m^{-2} (DOY 148) to 700 W m^{-2} (DOY 84). The $550\text{-}600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ range for R_n was the most frequent and occurred in the period of maximum crop development. In the initial stage of the crop, G reached 113 W m^{-2} and H reached 350 W m^{-2} . In the intermediate stage of the crop (reproductive phase), when LAI reached its maximum, G and H reached the lowest values, i.e., 60 and 16 W m^{-2} , respectively. On the other hand, LE varied from 450 to 600 W m^{-2} in the same stage, which corresponded to 90% of R_n estimated by SEBAL. Few days after planting, LE was 330 W m^{-2} and 350 W m^{-2} in the harvest time. On the average, cotton actual ET estimated by SEBAL was 3.5 mm day^{-1} few weeks after planting, reaching 6.6 mm day^{-1} in the maximum crop development stage, and then moving down to 4.2 mm day^{-1} during harvest period. The results found here are in agreement to other studies with irrigated cotton in arid e semiarid regions of the world.

Key words: remote sensing, energy balance, evapotranspiration, cotton

INTRODUÇÃO

Com área de 14 milhões de quilômetros quadrados, a Região Oeste tornou-se a principal fronteira agrícola do estado. O desenvolvimento desta região faz da Bahia grande produtora nacional de grãos, café, frutas e fibras. Além da grande extensão territorial, a região apresenta clima favorável à agricultura e à pecuária e possui uma bacia hidrográfica de grande suporte para projetos de irrigação (MENDONÇA, 2006).

A lavoura de algodão herbáceo chegou à Região Oeste na década de 90, registrando entre 1998 e 2003 crescimento médio da produção de 56% ao ano (MENDONÇA, 2006). Atualmente, a Bahia é o segundo maior produtor nacional de algodão, posicionando-se atrás do Estado do Mato Grosso. A produção de algodão em pluma, na safra 2005/2006, foi de 298,1 mil ton, com produtividade de 1,33 kg ha⁻¹, em área plantada de 224,8 mil ha. No mesmo ano, a produção brasileira foi de 1.046,5 mil ton, com produtividade de 1,24 ton ha⁻¹, em 845.300 ha cultivados. Estima-se que 90% da produção baiana de algodão deve-se à Região Oeste (REETZ, 2006).

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum*) é uma planta cultivada em mais de 100 países, em área superior a 34 milhões de hectares, a maioria em regime de irrigação, principalmente por infiltração, via sulco ou bacia em nível (BELTRÃO e CARDOSO, 2004). É uma cultura adaptada a condições semi-áridas, pois requer temperaturas na faixa de 18° e 30°C, nunca ultrapassando o limite inferior de 14°C e superior a 40°C (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Temperaturas baixas restringem o crescimento das plantas levando-as à emissão de poucos ramos frutíferos (ROSOLEM, 2001).

A planta do algodão tem desenvolvimento mais complexo que outras culturas, por apresentar hábito de crescimento indeterminado, produzindo simultaneamente estruturas vegetativas e reprodutivas durante quase todo ciclo

(GRIMES e EL-ZIK, 1990). Oosterhuis (1999) apresenta a fenologia do algodoeiro dividida em seis fases: 1) plantio à emergência: 6 dias após plantio (DAP); 2) surgimento da primeira folha verdadeira: 14 DAP; 3) primeiro botão floral: 35 DAP; 4) primeira flor: 65 DAP; 5) primeira maçã: 95 DAP; 6) primeiro capulho: 110 DAP.

A depender do clima e da duração do ciclo, o algodoeiro necessita de 700 a 1.300 mm de água para atender suas necessidades. O maior requerimento de água, 50 a 60% da demanda total, ocorre durante o período de floração, quando a massa foliar está completamente desenvolvida (DOORENBOS e KASSAM, 1979). O manejo adequado da irrigação é essencial para o aproveitamento do potencial da cultura, pois a ocorrência de déficit hídrico pode acarretar diminuição do crescimento da planta, bem como no número de flores. Durante a maturação das maçãs, a falta de água ocasiona produção de fibra com qualidade inferior (ROSOLEM, 2001).

O uso racional da água na agricultura tem implicações em outros campos da economia. Estima-se que cerca de 70% da água potável disponível para o consumo humano é utilizada na irrigação (SECKLER et al., 1998). À medida que a população e a economia crescem, a demanda pela transferência de água utilizada pela irrigação para outros setores também aumenta. Entretanto, a produção de alimentos que deve atender ao crescimento mundial necessita do insumo água, especialmente porque a fronteira agrícola vem diminuindo e áreas até pouco consideradas impróprias para a exploração agrícola estão sendo cultivadas. Portanto, é imprescindível a utilização racional da água, especialmente no uso com irrigação a fim de permitir alocação deste recurso aos demais setores da economia e ao uso doméstico.

Dois medidas são essenciais para usar racionalmente a água na agricultura: melhorar a eficiência dos sistemas de irrigação e aplicar a quantidade ideal de água. A demanda hídrica de uma cultura é determinada principalmente pela evapotranspiração (ET), fenômeno no qual a água passa para a atmosfera, na forma de vapor, pela superfície do solo e pela planta, através dos estômatos e pela água na superfície de galhos e folhas. A evapotranspiração também é utilizada no planejamento da irrigação, leis do uso de água e em estudos de bacias hidrográficas (BASTIAANSSEN et al., 2000).

A medida da evapotranspiração é difícil e onerosa, realizada por meio de lisímetros ou balanço hídrico da superfície vegetada. Por isso, a

evapotranspiração é geralmente determinada através de estimativas. Conforme os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, os métodos para estimar a ET podem ser agrupados em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões (PEREIRA et al., 1997).

A evapotranspiração é um fenômeno regido simultaneamente pelos princípios de conservação de massa e energia na camada limite acima do dossel vegetativo da planta (SEDIYAMA, 1996). Desta forma, a ET pode ser obtida tanto pelo balanço de água na zona de abrangência do sistema radicular das plantas quanto pelo balanço de energia em nível da superfície evaporante.

Ao atingir a atmosfera terrestre, a radiação solar sofre atenuações por gases atmosféricos, partículas em suspensão (aerossóis, poeiras) e pelas nuvens, de forma que apenas parte dela atinge a superfície terrestre, a qual é denominada radiação solar global. Quando a radiação solar incide sobre a superfície, pode tomar três caminhos: ser transmitida, absorvida ou refletida. A razão entre a radiação solar refletida pela superfície com a radiação solar que incide sobre ela é denominada albedo da superfície (α). O albedo varia de 0 a 1, e depende do comprimento de onda da radiação, do ângulo de incidência solar e do comportamento espectral do alvo, entre outros aspectos (CAMPBELL e DIAK, 2005).

A energia solar absorvida pela superfície é convertida em calor, bem como a radiação interceptada na atmosfera por nuvens, vapor d'água ou partículas em suspensão. Assim, a superfície terrestre tanto emite quanto recebe radiação de onda longa. Por conseguinte, tem-se que o saldo de radiação (R_n) em um dado intervalo de tempo refere-se às trocas radiativas de onda curta e onda longa na superfície (CAMPBELL e DIAK, 2005).

O balanço de radiação na superfície da Terra, abrangida pela associação da vegetação natural ou de culturas agrícolas, é de grande importância na determinação das perdas de água e no acúmulo de matéria seca pelos vegetais (SOUZA et al., 1999). O saldo de radiação é destinado fundamentalmente ao aquecimento do ar atmosférico, através do fluxo de calor sensível (H), ao aquecimento do solo, através do fluxo de calor no solo (G) e à evaporação da água, através do fluxo de calor latente (λET). Segundo JURY et al. (1991) em solo seco e nu, o componente λET do balanço de energia é praticamente nulo em relação a R_n , ao passo que numa área vegetada sem deficiência hídrica e em

fase de máximo desenvolvimento vegetativo, λET pode representar até 70% de R_n . Solucionando-se a equação do balanço de energia, por meio da determinação de R_n , G e H é possível obter LE e, por conseguinte, a evapotranspiração.

A evapotranspiração é usualmente determinada pelo o método da FAO Penman-Monteith, segundo o qual calcula-se a evapotranspiração de referência (ET_0), relativa à uma área coberta por grama, sem restrições hídrica e em bom desenvolvimento, apresentando altura em torno de 0,12 m. Para determinar-se a evapotranspiração da cultura em questão, multiplica-se a ET_0 pelo K_c , que é o coeficiente de cultivo da referida cultura. O K_c engloba as características da cultura em relação à resistência superficial ao transporte de vapor d'água, arquitetura e morfologia que influenciam na transpiração, características que variam ao decorrer do desenvolvimento da cultura, de forma que, para cada estágio de desenvolvimento, há um K_c específico.

Em áreas com pouca homogeneidade no que se referente à cobertura vegetal e condições de umidade do solo, o uso da ET_0 e do K_c não é muito adequado, por se tratar de condições fora dos padrões para os quais os coeficientes de cultivo foram desenvolvidos. Neste contexto o uso de técnicas de sensoriamento remoto apresenta a grande vantagem de obter a evapotranspiração a partir das condições da cultura em campo, englobando todos fatores que a determinam. A utilização de imagens de satélite permite o estudo da água derivada para a atmosfera em grande escala espacial, além da análise de outros elementos constituintes da paisagem.

O sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, através da captação e/ou do registro da energia refletida ou emitida pelos alvos (Florenzano, 2002). As informações geradas por sensoriamento remoto orbital têm base nos diferentes comportamentos dos alvos da superfície, em relação à sua interação com a radiação eletromagnética. O padrão de resposta de um alvo à radiação incidente sobre ele é denominado assinatura espectral. São esses padrões diferentes de reflectância que permitem a identificação dos alvos na superfície.

Os dados gerados por sensoriamento remoto são potencialmente úteis na legislação, planejamento e alocação de recursos hídricos, avaliação de impactos ambientais, avaliação do desempenho de sistemas de irrigação. Além disso, podem prover informações sobre uso da terra, dimensão de áreas irrigadas,

desenvolvimento de biomassa, previsão de colheita, escoamento superficial e evapotranspiração (BASTIAANSSEN et al., 2000).

Diversos métodos foram desenvolvidos para o cálculo da evapotranspiração com técnicas de sensoriamento remoto. De acordo com Courault et al. (2003) estes métodos podem ser classificados da seguinte forma: métodos empíricos diretos, onde os dados de sensoriamento remoto são introduzidos nos modelos semi-empíricos para estimar evapotranspiração de maneira direta; métodos indiretos, que usam modelos mais laboriosos que simulam os diferentes termos do balanço de energia; e métodos residuais do balanço de energia, os quais fazem estimativas da evapotranspiração como resíduo da equação do balanço de energia e que são a maioria em operação (SEBAL, SEBI, S-SEBI, SEBS, dentre outros).

O SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land é um método que utiliza relações empíricas e parametrizações físicas para determinar o fluxo de calor latente como resíduo da equação do balanço de energia (BASTIAANSSEN, 1998a e 1998b). O SEBAL requer poucos dados de superfície e cartas de temperatura do solo, albedo e índices de vegetação. Com os produtos gerados, possibilita a obtenção de mapas do saldo de radiação, dos fluxos não radiativos (G, H e LE) e da evapotranspiração.

Courault et al. (2005) apontam como vantagens do SEBAL o fato de não requerer correções atmosféricas no cálculo da temperatura da superfície e sua operacionalidade. Já Bezerra (2006) salienta que não é necessário o conhecimento das culturas na superfície para gerar a evapotranspiração, que é computada no SEBAL com toda influência dos aspectos de manejo, fitossanidade e heterogeneidade da cultura no campo. Entre as desvantagens do método, Gowda et al. (2007) citam a necessidade de adotar um pixel quente e um pixel frio na imagem, como procedimento para obter o fluxo de calor sensível. Segundo esses autores, uma escolha inadequada destes pixels pode acarretar erros na estimativa espacial da evapotranspiração.

O SEBAL foi desenvolvido inicialmente para trabalhar com imagens do satélite Landsat, mas atualmente outros produtos de satélites diferentes vêm sendo utilizados. O sensor TM (Thematic Mapper) foi colocado em órbita em 1982, com o satélite Landsat 5. O TM opera em sete bandas espectrais, sendo três na região do visível, três na região do infravermelho (IV) refletido e uma na

região do IV termal, conforme apresentado na Tabela 1. O sensor TM mede a energia radiante dos alvos sob a forma de radiância espectral, armazenando-a em forma digital com intensidades dos níveis de cinza variando de 0 a 255. A resolução temporal deste satélite é 16 dias, e cada cena gerada tem 185 km x 185 km.

Tabela 1. Características espectrais e espaciais do sensor TM. Adaptado de Moreira (2003)

Bandas	Região do espectro	Faixa espectral	Resolução espacial
		μm	m x m
1	azul	0,45 – 0,52	30
2	verde	0,53 – 0,61	30
3	vermelho	0,62 – 0,69	30
4	IV próximo	0,78 – 0,79	30
5	IV médio	1,57 – 1,78	30
6	IV termal	10,4 – 12,5	120
7	IV médio	2,10 – 2,35	30

Este trabalho tem por objetivo a aplicação do algoritmo SEBAL com imagens Landsat TM 5 para determinação e avaliação espacial e temporal do balanço de energia e da evapotranspiração do algodoeiro irrigado por pivô central, na sub-bacia do rio Corrente (bacia do rio São Francisco, Bahia).

Referências Bibliográficas

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, p. 198-212, 1998a.

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, p. 213-229, 1998b.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MOLDEN, D. J. MAKIN, I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 42, p. 137-155, 2000.

BELTRÃO, N. E. M.; CARDOSO, G. D. Aspectos gerais da cotonicultura brasileira: tipificação de produtores e tamanho de propriedades. **Bahia Agrícola**, Salvador, v.6, n.2, 2004.

BEZERRA, B. G. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. 127f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2006.

CAMPBELL, G. S.; DIAK, G. R. Net and thermal radiation estimation and measurement. In: VINEY, M. K. **Micrometeorology in agricultural systems**. Madison: American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science of America, 2005. 584 p. (Agronomy monograph n. 47).

COURALT, D.; SEGUIM, B.; OLIOSO, A. Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use mesoscale atmospheric models. In: **ICID WORKSHOP ON REMOTE SENSING OF ET FOR LARGE REGIONS**, 2003. 1 CD Rom

COURAULT, D.; SEGUIN, G.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. **Irrigation and Drainage Systems**, Dordrecht, v. 19, p. 223-249, 2005.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper 33**. Roma: FAO, 1979. 193 p.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002

GOWDA, P. H. et al. Remote sensing based energy balance algorithm for mapping ET: current status and future challenges. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, p. 1639-1644, 2007.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 328 p.

MENDONÇA, J. O. O potencial de crescimento da produção de grãos no Oeste da Bahia. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n.2, 2006.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003. 307 p.

MORSE, A. et al. **Application of the SEBAL methodology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing – Final Report**. Idaho: Department of Water Resources – University of Idaho, 2000. 107p.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of a cotton plant. In: CIA, E. et al. **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafos, 1999.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

REETZ, E. ET AL. VERDADEIROS ESPECIALISTAS. In: **ANUÁRIO BRASILEIRO DE ALGODÃO**. Santa Cruz do Sul, 2006.

ROSOLEM, C. A. **Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafos, 2001. 24 p. (Informações agrônômicas n. 95)

SECKLER, D. et al. World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues. In: **RESEARCH report 19**. Colombo: International Water Management Institute, 1998. 40 p.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 4, p. i-xii, 1996.

SOUZA, J. L. de; 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, v.34, n.10, p.1763-1774, 1999.

CAPÍTULO 1

OBTENÇÃO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE ALGODOEIRO IRRIGADO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL E IMAGENS TM - LANDSAT 5

¹Artigo que será submetido ao Comitê Editorial do periódico científico Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

OBTENÇÃO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO EM ÁREA DE ALGODOEIRO IRRIGADO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL E IMAGENS TM - LANDSAT 5

Autora: Valéria Peixoto Borges

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi determinar, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, o saldo de radiação (R_n) à superfície em área de algodão irrigado por pivô central, localizada na Fazenda Busato ($13,25^\circ$ S; $43,42^\circ$ W; 436 m) município de Bom Jesus da Lapa, Bahia. Seis imagens TM - Landsat 5 correspondentes a datas distintas do ciclo de produção da cultura no primeiro semestre de 2007 foram adquiridas para implementação do algoritmo SEBAL. O recorte em cada uma das imagens incluía, entre outros elementos, todo o perímetro da Fazenda Busato com 25 pivôs de algodão irrigado. Na determinação do albedo da superfície (α) e dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) utilizou-se a irradiância dos canais refletivos, enquanto que para a temperatura da superfície (T_s) e radiação de onda longa emitida utilizou-se a irradiância do canal termal. Dados oriundos de estação meteorológica instalada nas proximidades da área irrigada foram utilizados para estimativa do fluxo de radiação de onda longa incidente, enquanto que o fluxo de radiação de onda curta foi determinado por meio de equações astronômicas, juntamente com as estimativas de α e da transmissividade atmosférica. Verificou-se que os índices de vegetação aumentaram com o desenvolvimento da cultura, enquanto α e T_s apresentaram tendência de diminuição ao longo do tempo. O saldo de radiação R_n variou de 430 W m^{-2} (DDA 148) a 700 W m^{-2} (DDA 84). O intervalo de valores de R_n mais freqüentemente observado nos pivôs foi de 550 a 600 W m^{-2} , no período de máximo desenvolvimento da cultura.

Palavras-chave: albedo, índice de vegetação, radiação líquida, algodão

DETERMINATION OF RADIATION BALANCE COMPONENTS OVER IRRIGATED COTTON USING SEBAL AND TM - LANDSAT 5 IMAGES

Author: Valéria Peixoto Borges

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT: This research aimed at estimating the radiation balance components over center-pivot irrigated cotton fields by means of SEBAL algorithm and TM - Landsat 5 images. The selected area is in the Busato Farm (13,25° S; 43,42° W; 436 m asl), 30 km west of the Bom Jesus da Lapa town, western of Bahia. Six TM -Landsat 5 images corresponding to distinct dates over the crop season (first semester of 2007) were used for implementation of SEBAL routines. In each image a reduced area was selected which basically included the area of Busato Farm with its 25 center pivots of irrigated cotton. Surface albedo (α) and vegetation indices (NDVI, SAVI, and LAI) were determined from the irradiance of reflective channels while for the surface temperature (T_s) and incident longwave radiation at the sensor the thermal channel irradiance was used. Weather data from a nearby weather station were used for estimating longwave incident fluxes at the evaporating surface and the shortwave incident fluxes were determined by astronomic equations with estimates of α and atmospheric transmittance. Results shown that the vegetation indices increased with crop development while α and T_s decreased over time as the crop covered the soil. The net radiation R_n varied from 430 W m⁻² (DOY 148) to 700 W m⁻² (DOY 84). The 550-600 W m⁻² range for R_n was the most frequent and occurred in the period of maximum crop development.

Key words: Albedo, vegetation index, net radiation, cotton

INTRODUÇÃO

A energia disponível para os processos de aquecimento do ar, aquecimento do solo, fotossíntese e evaporação da água advém do saldo das trocas radiativas de onda curta e onda longa em um determinado intervalo de tempo. Quando a radiação solar incide sobre a superfície, interage com ela, podendo ser transmitida, absorvida ou refletida. Por meio desses processos, a diferença entre a radiação incidente e a emitida, tanto de onda curta quanto de onda longa contabiliza o saldo de radiação.

O balanço de radiação na superfície da terra é de grande importância na determinação das perdas de água e no acúmulo de matéria seca pelos vegetais. O saldo de radiação é um dos elementos mais relevantes na estimativa da evapotranspiração, utilizado no cálculo da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998). A quantidade de radiação incidente e as características da superfície, entre elas a cobertura vegetal, são determinantes no cômputo da radiação líquida de uma superfície.

A razão entre a energia refletida e a energia incidente sobre a superfície é denominada albedo. O albedo é um dos componentes mais importantes do balanço de radiação (SILVA et al., 2005b; SOUZA, 1999), amplamente utilizado em modelos climatológicos e agrometeorológicos (LEITÃO et al., 2002). Compreende valores entre 0 e 1, e depende do comprimento de onda da radiação, do ângulo de incidência, do comportamento espectral do alvo, entre outros aspectos. Apesar da diversidade do comportamento espectral dos alvos, algumas características são comuns para diversas superfícies. Geralmente quanto menor o ângulo de incidência da radiação, menor o albedo. A vegetação apresenta comumente baixo albedo na região da radiação fotossinteticamente ativa (0,4 a 0,7 μm) e alto poder refletor na região do infravermelho próximo (DIAK e CAMPBELL, 2005).

No estudo das propriedades espectrais da vegetação são propostos diversos índices, os quais são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Estes índices foram criados para ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre. Entre os mais usados está o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI, em inglês (MOREIRA, 2003). Devido a limitações

oriundas da reflexão do solo na determinação do NDVI, Huete (1988) desenvolveu o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI, em inglês). Ambos NDVI e SAVI são determinados por relações com as reflectâncias nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo.

A partir de dados espectrais gerados por sensoriamento remoto, pode-se determinar diretamente o balanço de radiação, visto que essas medidas incorporam fatores como propriedades espectrais das folhas e arquitetura da cultura, que influenciam na interceptação da radiação (INOUE e MORAN, 1997). As técnicas de sensoriamento remoto com imagens de satélite possibilitam também a avaliação de parâmetros biofísicos da vegetação em escala temporal e espacial, e são métodos não-destrutivos.

O SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land (BASTIAANSEN et al., 1998a e b) é um algoritmo desenvolvido para estimar o balanço de radiação e energia da superfície, por meio de imagens multiespectrais de satélite, utilizando poucos dados de superfície. Pesquisas foram realizadas em vários países, mostrando a consistência e a validade dos dados gerados pelo SEBAL, a exemplo dos trabalhos desenvolvidos na Bacia do Rio do Urso nos Estados Unidos (MORSE et al., 2001), na Turquia (BASTIAANSEN, 2000), Ásia (CHANDRAPALA e WIMALASURIYA, 2003) e no Brasil (BEZERRA, 2006; SILVA et al, 2005a e b; COSTA FILHO, 2005).

O objetivo deste trabalho foi determinar o saldo de radiação de áreas irrigadas cultivadas com algodão na sub-bacia do Rio Corrente (Bacia do São Francisco, Bahia), utilizando o algoritmo SEBAL, durante um ciclo de produção. Para tal, foram obtidos o albedo, a temperatura da superfície e índices de vegetação destas áreas.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada a 35 km a oeste da sede do município de Bom Jesus da Lapa ($13^{\circ}15'18''$ S, $43^{\circ}25'05''$ W, 436 m a.n.m), na região Oeste do Estado da Bahia. Esta área compreende a Fazenda Busato; parte do Projeto de Irrigação Formoso, da Codevasf (Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco), no qual a bananeira é a principal cultura; outras propriedades com agricultura irrigada; áreas de vegetação natural e o Rio Corrente, afluente do Rio São Francisco. A Fazenda Busato possui 2.500 ha de algodão irrigado por pivô central, cultivares Delta Penta e Delta Opal. Na Figura 1 encontram-se mais detalhes da área de estudo.

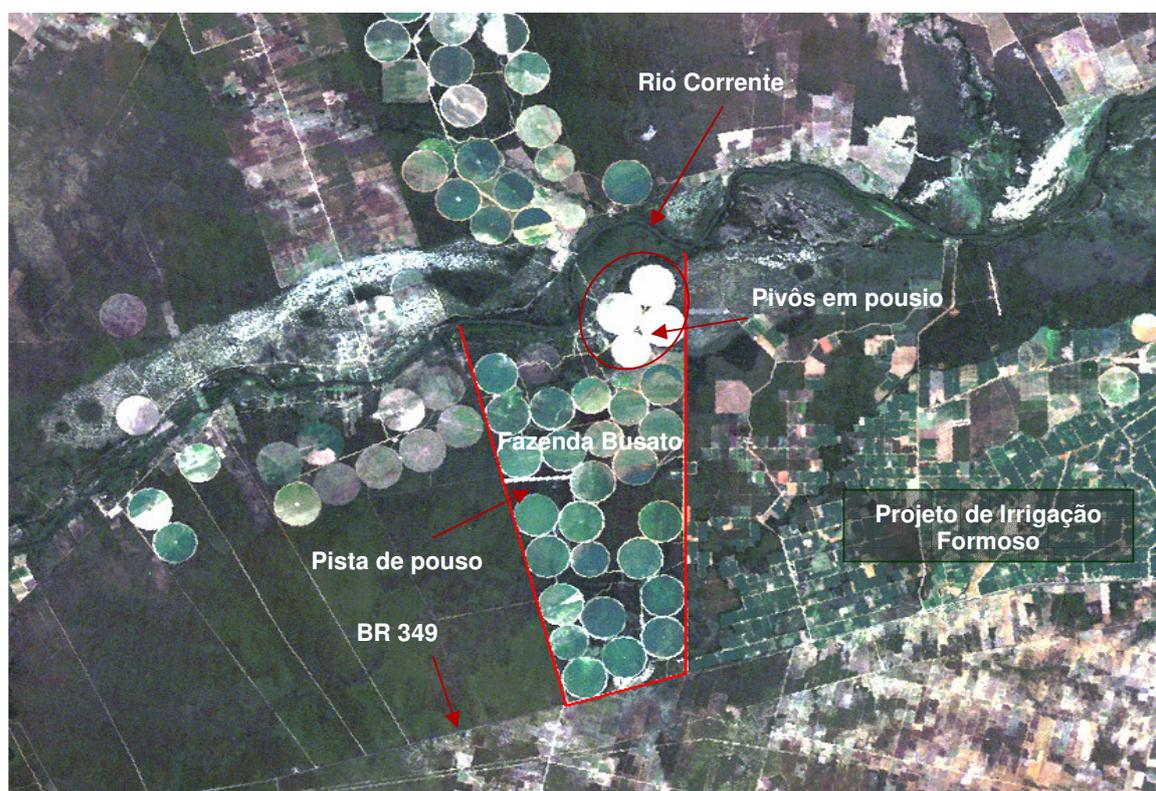


Figura 1. Imagem Landsat TM 5 (composição de bandas 3-2-1) da área de estudo, do dia 26. de abril de 2007 (DDA: 116). Em destaque a Fazenda Busato, delimitada pela linha vermelha e pelo Rio Corrente.

O plantio do algodão ocorreu do dia 08 de janeiro de 2007 (Dia do Ano – DDA 8) ao dia 06 de março (DDA 65), um período, portanto, de 57 dias. O ciclo médio dos cultivares utilizados é em torno de 180 dias (Beltrão, 2003). A colheita começou no mês de junho de 2007 e estendeu-se até o mês de agosto de 2007.

Na Tabela 1 são apresentadas as datas de plantio em cada pivô, os quais são identificados na Figura 2. O manejo da irrigação na Fazenda Busato é realizado com auxílio de um programa computacional, que estima a ET_0 pelo método da FAO Penman-Monteith a partir de dados gerados por uma estação meteorológica instalada na fazenda. O turno de rega diário varia de acordo com a lâmina necessária a ser aplicada.



Figura 2. Identificação dos pivôs na Fazenda Busato.

2. Dados Meteorológicos e Caracterização Climática da Área

Os dados meteorológicos usados foram obtidos em estação meteorológica automática Davis modelo Vantage Pro[®], de propriedade da Fazenda Busato, a qual fornecia dados a cada meia hora, totalizando 48 leituras diárias.

O clima da região de estudo é classificado como semiárido e subúmido a seco, tipologia DdA', segundo metodologia de Thornthwaite & Matther, com estação chuvosa no período de primavera-verão. Os solos predominantes são Latossolos e Cambissolos e a vegetação natural é classificada como Contato Caatinga-Floresta Estacional e Formações Pioneiras com Influência Fluvio-marinha (SEI, 2007). As médias anuais de temperatura, precipitação e evapotranspiração potencial são, respectivamente, 25,3°C, 831 mm e 1418 mm (SEI, 1998).

Tabela 1. Escalonamento do plantio e colheita do algodão na Fazenda Busato, no primeiro semestre de 2007.

Data de plantio/DDA	N° do pivô	Data de colheita / DDA	Ciclo da cultura (dias)
08/01 – 08	23	28/07 - 209	201
09/01 – 09	28	07/08 (setor Oeste) - 219	210
09/01 – 09	28	16/08 (setor Leste) - 228	219
11/01 – 11	15	10/07 - 191	180
11/01 – 11	17	19/07 - 200	189
12/01 – 12	12	06/07 - 187	175
15/01 -15	10 (setor Norte)	14/07 - 195	180
16/01 – 16	24 (setor Oeste)	11/08 – 223	207
16/01 - 16	26	18/08 – 230	214
16/01 – 16	29	14/08 – 226	210
17/01 – 17	14	08/07 – 189	172
18/01 – 18	06	23/07 – 204	186
18/01 – 18	13	01/07 – 182	164
19/01 – 19	7	04/07 – 185	166
19/01 – 19	8 (setor Sul)	04/08 – 216	197
19/01 – 19	24 (setor Leste)	13/08 – 225	206
20/01 – 20	5	07/08 – 219	199
21/01 – 21	20	22/07 – 203	182
21/01 – 21	21	22/07 – 203	182
22/01 – 22	19	20 e 22/07 – 201 e 203	181
23/01 – 23	18	19/07 – 200	177
24/01 – 24	27	22 e 24/08 – 234 e 236	212
26/01 – 26	16	11/07 – 192	166
27/01 – 27	9	09/08 – 221	194
27/01 – 27	10 (setor Sul)	13/07 – 194	167
28/01 – 28	11	27/07 – 208	180
27/02 – 58	25	26/08 – 238	180
01/03 – 60	8 (setor Norte)	27/08 – 239	179
06/03 - 65	22	30/08 – 242	177

3. Imagens de Satélite

As imagens de satélite utilizadas foram geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5 (TM - Landsat 5), órbita 219 e ponto 69, adquiridas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Utilizou-se seis imagens, obtidas em datas distintas do ciclo do algodoeiro cultivado na Fazenda Busato: 20 de janeiro (dia do ano - DDA 20), 25 de março (DDA 84), 26 de abril (DDA 116), 12 de maio (DDA 132), 28 de maio (DDA 148) e 15 de julho (DDA 196), todas do ano de 2007. O satélite tem resolução temporal de 16 dias, e o horário de passagem do satélite sobre a área de interesse ocorria sempre às 9 horas e 56 minutos (tempo solar).

As imagens foram escolhidas dentro do intervalo de tempo que compreendeu o ciclo do algodão na Fazenda Busato. Inicialmente, pretendia-se adquirir ao menos uma imagem a cada mês, afim de melhor detalhar a análise dos componentes do balanço de radiação nas distintas fases fenológicas da cultura. Entretanto, a aplicação do SEBAL requer imagens sem a presença de nuvens e, dentro do referido período, as seis imagens adquiridas foram as únicas adequadas.

O sensor TM mede a radiância espectral dos alvos e armazena-os na forma de níveis de cinza, ou número digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits), tendo uma resolução espacial de 30 m x 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e resolução de 120 m x 120 m no canal termal, banda 6. As características de cada banda do TM - Landsat 5 estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (a: radiância mínima e b: radiância máxima), e irradiancias espectrais no topo da atmosfera. Fonte: CHANDER & MARKHAM (2003).

Bandas	Comprimento de onda μm	Coeficientes de calibração		Irradiância espectral no topo da atmosfera $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$
		a $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	b $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	
1 – azul	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957,0
2 – verde	0,53 – 0,61	-2,84	365,0	1826,0
3 – vermelho	0,62 – 0,69	-1,17	264,0	1554,0
4 – IV próximo	0,78 – 0,79	-1,51	221,0	1036,0
5 – IV médio	1,57 – 1,78	-0,37	30,2	215,0
6 – IV termal	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 – IV médio	2,10 – 2,35	-0,15	16,50	80,67

Todo processamento das imagens foi realizado com o software ERDAS Imagine v. 8.7, da Leica Geosystems. Inicialmente as bandas foram empilhadas, seguindo a ordem crescente, formando um único arquivo de imagem. O recorte da área de interesse possui as seguintes coordenadas geográficas: canto superior esquerdo (43°55'19"Oeste e 13°06'02" Sul); canto inferior esquerdo (43°55'15" Oeste; 13°20'48" Sul); canto superior direito (43°29'24" Oeste; 13°05'55" Sul) e canto inferior direito (43°29'19" Oeste; 13°20'40" Sul). O mesmo recorte foi mantido para todas imagens.

4. Aplicação do SEBAL

Para determinação do saldo de radiação à superfície seguiu-se os procedimentos do algoritmo SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land (BASTIAANSEN, 1998a; ALLEN et al., 2002), sintetizados no diagrama esquemático da Figura 3.

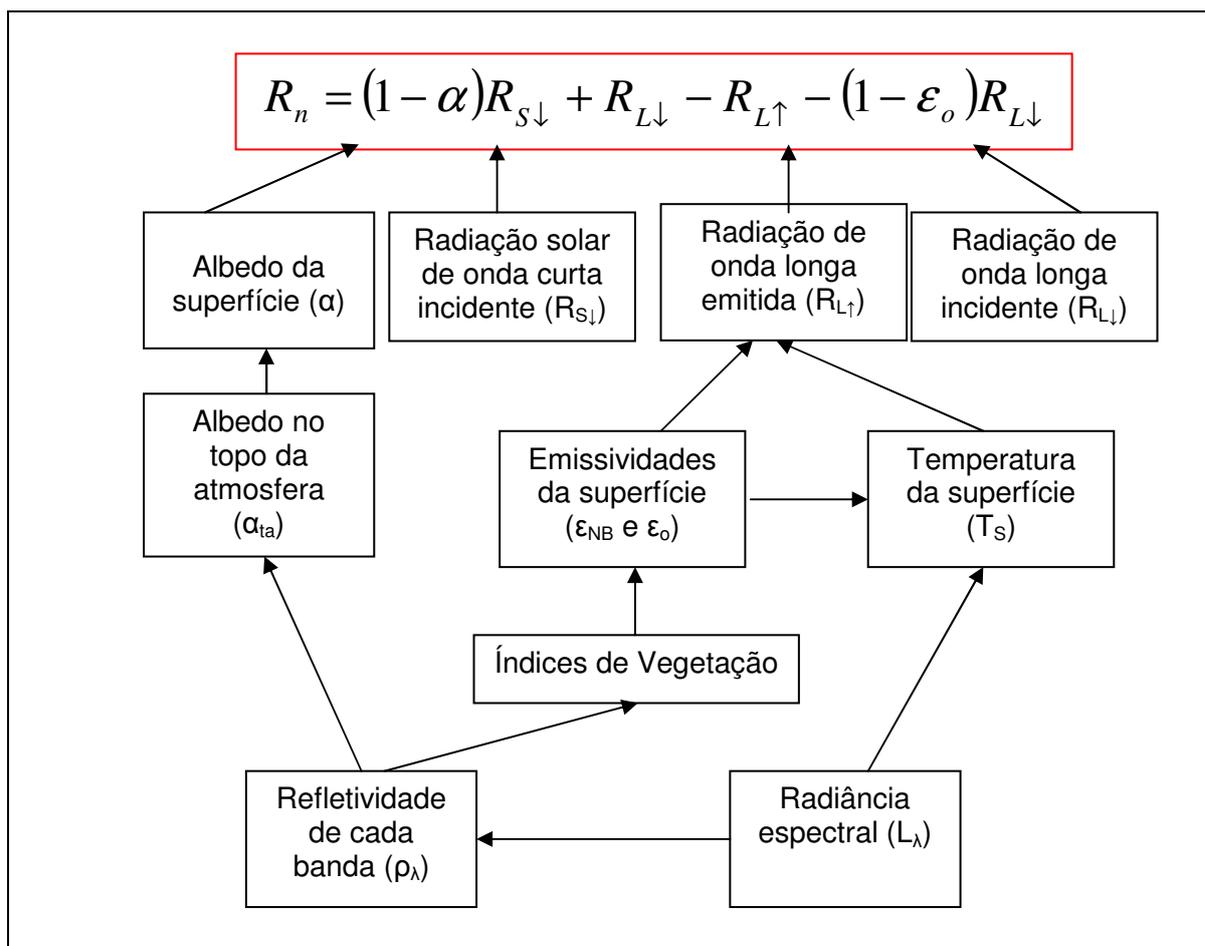


Figura 3. Esquema para o cálculo do saldo de radiação à superfície evaporante.

Para aplicar o algoritmo SEBAL é necessário fazer a calibração radiométrica de cada banda, ou seja, a conversão dos dados armazenados em números digitais (DN) em radiância monocromática ($L_{\lambda i}$). A radiância monocromática compreende a radiação solar refletida (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) ou emitida (banda 6) por unidade de ângulo sólido, de comprimento de onda e de elemento de área projetada na direção do sensor. No cálculo utiliza-se os coeficientes de calibração da Tabela 2, seguindo equação de Markham & Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = \left(\frac{b - a_i}{255} \right) ND + a_i \quad (1)$$

onde a e b - irradiâncias espectrais mínima e máxima ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) conforme Tabela 2, ND - número digital ou intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255) e i corresponde as bandas espectrais (1, 2, 3,.. e 7) do satélite.

As equações 2 a 5, apresentadas a seguir, compreendem as etapas para obtenção do albedo da superfície. A partir da irradiância, calcula-se a reflectância espectral planetária ($\rho_{\lambda i}$), que representa a razão entre o fluxo de radiação solar refletida e o fluxo de radiação solar incidente para cada canal do satélite. A determinação da reflectância é dada por (Bastiaanssen, 1995):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cos Z d_r} \quad (2)$$

em que $L_{\lambda i}$ - irradiância espectral de cada banda; $K_{\lambda i}$ - irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Tabela 2); Z - ângulo zenital solar obtido por meio do cabeçalho das imagens adquiridas e d_r - inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (Allen et al., 1998).

O cálculo do albedo no topo da atmosfera foi feito através de uma combinação linear das reflectâncias espectrais ($\rho_{\lambda i}$) e o respectivo coeficiente de ponderação para cada banda (ϖ_{λ}) de acordo com (Bastiaanssen 1995):

$$\alpha_{toa} = \Sigma(\varpi_{\lambda} \rho_{\lambda}) \quad (3)$$

$$\varpi_{\lambda} = \frac{K_{\lambda i}}{\Sigma K_{\lambda i}} \quad (4)$$

em que K_b - irradiância solar espectral média de cada banda no topo da atmosfera ($W m^{-2} \mu m^{-1}$). Valores de ω_λ são apresentados na Tabela 3 para cada banda.

Tabela 3. Coeficientes de ponderação para o cálculo do albedo no topo da atmosfera, para o sensor TM - Landsat 5

Banda	1	2	3	4	5	6	7
ω_λ	0,293	0,274	0,233	0,157	0,033	-	0,011

Para obtenção do albedo na superfície é necessário corrigir as atenuações atmosféricas (Bastiaanssen, 1995):

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (5)$$

na qual α_{toa} - albedo no topo da atmosfera, α_p - porção média da radiação solar refletida pela atmosfera na direção do satélite, cujo valor varia entre 0,025 e 0,04. Na aplicação do algoritmo SEBAL é recomendado o valor 0,03 para α_p (Bastiaanssen, 2000). A transmissividade atmosférica para condições de céu claro, τ_{sw} foi obtida segundo Allen (1996), levando-se em conta a água precipitável na atmosfera.

Na implementação do SEBAL são determinados três índices de vegetação. O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é calculado tomando-se as reflectâncias do vermelho (ρ_3) e do infravermelho próximo (ρ_4) (Ponzoni & Shimabukuro, 2007):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (6)$$

Para eliminar os efeitos de fundo da reflexão do solo, especialmente devido à umidade, utiliza-se o Índice de Vegetação Ajustado para os efeitos do Solo (SAVI), o qual também utiliza as reflectâncias do vermelho e do infravermelho próximo, calculado pela seguinte equação (Huete, 1998):

$$SAVI = (1 + L) \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (7)$$

em que L - fator de ajuste do SAVI, utilizado neste estudo o valor de 0,1, conforme recomendação de outros autores (Allen et al., 2002; Costa Filho, 2005; Silva et al., 2005b; Bezerra, 2006).

De posse do SAVI, obteve-se o Índice de Área Foliar, definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área de solo ocupado. Em sensoriamento remoto, o IAF é utilizado como indicador da quantidade de biomassa para cada pixel da imagem. Esse índice foi calculado através da equação proposta por Allen et al.(2002):

$$IAF = \frac{Ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

No SEBAL, a temperatura da superfície é computada utilizando-se a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. No entanto, cada pixel não se comporta como um corpo negro, portanto é preciso estabelecer a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal (10,4 - 12,5 μm), ϵ_{NB} . Da mesma forma, no cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície, deve-se incluir a emissividade de banda larga (5 - 50 μm), ϵ_0 . ϵ_{NB} e ϵ_0 são determinados por (ALLEN et al., 2002):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,033 \cdot IAF \quad (9)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (10)$$

Para os pixels com $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$. Para corpos de água ($NDVI < 0$) foram utilizados os valores de $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, conforme Allen et al. (2002).

Para a obtenção da temperatura da superfície (T_s), em Kelvin, foram utilizadas a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda 6}$ e a emissividade ϵ_{NB} , pela seguinte equação (Markham & Baker, 1987):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (11)$$

onde $K_1 = 607,76 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ são constantes de radiação ajustadas à banda termal do TM - Landsat 5.

Após determinação das emissividades e a temperatura da superfície, procedeu-se aos cálculos dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa. A radiação de onda longa emitida por cada pixel ($R_{L\uparrow}$, em $W m^{-2}$) foi computada mediante a equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (12)$$

em que ε_0 - emissividade de cada pixel; σ - constante de Stefan-Boltzman = $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$; T_s - temperatura da superfície em Kelvin.

A radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$), considerada constante em todo o recorte selecionado, também foi computada pela equação de Stefan-Boltzman, como segue:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (13)$$

em que T_a - temperatura do ar, medida na estação meteorológica da Fazenda Busato e ε_a - emissividade da atmosfera, calculada por:

$$\varepsilon_a = 0,85 \times (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (14)$$

O fluxo incidente de radiação de onda curta à superfície evaporante ($R_{S\downarrow}$) foi computado segundo Allen et al. (2002), sendo considerado constante para todos pixels do recorte:

$$R_{S\downarrow} = S \cos Z d_r \tau_{sw} \quad (15)$$

onde S - constante solar = $1367 W m^{-2}$ e os demais termos já definidos anteriormente.

Por fim, o saldo de radiação à superfície (R_n) determinado pixel a pixel, foi calculado pela seguinte equação:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (16)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para albedo, NDVI, temperatura da superfície, radiação de onda longa emitida e saldo de radiação, são apresentados nas figuras a seguir, em cartas com cores correspondentes a intervalos de valores, na ordem crescente do azul-escuro ao vermelho.

Na figura 4 são mostrados os resultados para o albedo da superfície. Na extensão do rio Corrente foram encontrados os menores valores de albedo, em torno de 4 a 6%, não havendo alteração destes valores nas datas avaliadas. Estes resultados coincidem com o albedo encontrado por Bastiaanssen (2000) para água na região da bacia de Gediz na Turquia, bem como por Chandrapala e Wimalasuryia (2003) sobre o mar. Valores acima de 30%, representados pela cor vermelha, foram detectados em áreas de solo exposto, por exemplo a pista de pouso. Costa Filho (2005) encontrou albedo de 35% para pixels representando solo descoberto na região do Perímetro Irrigado Nilo Coelho, bem como Silva et al. (2005a), que registraram albedo na faixa de 30 a 45% nesta mesma área.

Quando a superfície está coberta por vegetação, o albedo diminui em decorrência da maior utilização pelas plantas da energia incidente, seja nos processos de fotossíntese ou transpiração. Observa-se que na carta do dia 20 de janeiro (Figura 4A), onde já houvera o plantio, as plantas ainda apresentavam-se pequenas e o albedo encontra-se na faixa de 20 a 30%. À medida que a cultura se desenvolvia, diminuía a refletância da superfície. A fase de máximo desenvolvimento do algodoeiro ocorre a partir do período de floração, cerca de 70 dias após o plantio - DAP (OOSTERHUIS, 1999). Nesta fase, o albedo registrado encontrava-se na faixa entre 15 e 19%. Tomando como exemplo o pivô 23, aos 76 DAP (DDA 84) apresentou albedo nesta faixa, caracterizado pela cor bege. Na imagem do DDA 196 (Figura 4F), em época de colheita, os valores de albedo aumentaram, caracterizando áreas de vegetação rala, como observa-se nos pivôs 20, 21, 19 e 18. Durante todo período de cultivo, o albedo nos pivôs esteve entre 10 e 30%, predominantemente.

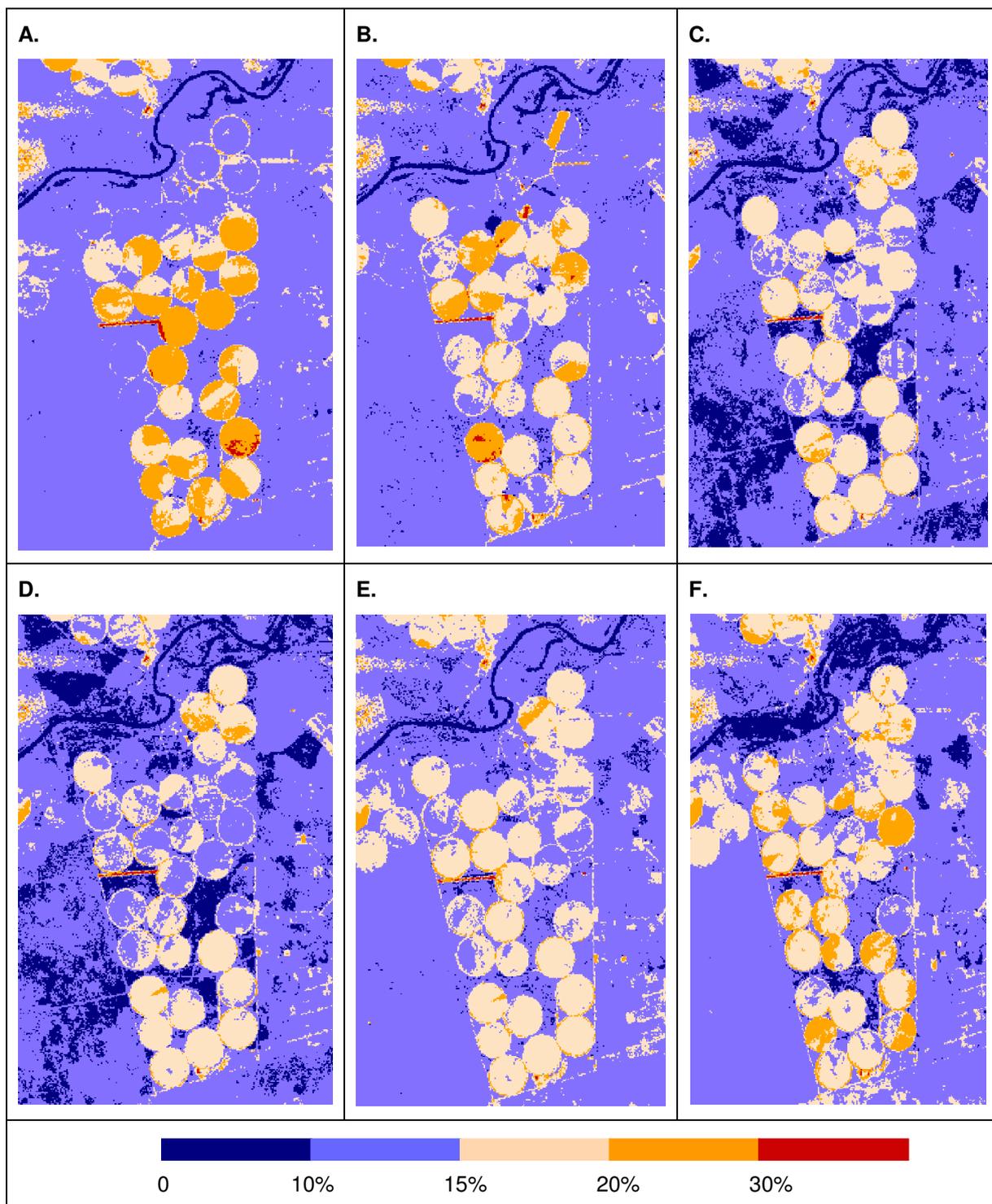


Figura 4. Albedo da superfície. A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

Estes resultados concordam com os encontrados por Bastiaanssen (2000), Costa Filho (2005), Silva et al (2005a e 2005b) e Consoli et al. (2006), para áreas de culturas agrícolas irrigadas, sendo que os últimos autores obtiveram albedo = 11% em pomar de laranja. No entanto, estão abaixo do registrado por Kustas et al. (1990), que foi 22% em cultivo de algodão irrigado.

Os índices de vegetação utilizados neste trabalho operam com o comportamento antagônico da vegetação quanto à refletância nas bandas espectrais do visível e do infravermelho próximo. Quanto maior a densidade foliar sobre uma determinada área, menor será a refletância na banda do visível, em decorrência da absorção da luz visível pelos pigmentos fotossintetizantes. Nessas mesmas condições, maior será a refletância na região do infravermelho próximo devido ao espalhamento múltiplo da radiação nas camadas do dossel de vegetação (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Seguindo esta tendência, observa-se na Figura 5 que o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) aumentou com o crescimento do algodoeiro. Na cena correspondente ao DDA 20 (Figura 5A), a maioria dos pivôs apresentou $NDVI < 0,2$, caracterizando áreas com vegetação rala ou solo exposto. A partir do DDA 116 (Figura 5C), os pivôs que estão na fase reprodutiva, produzindo flores, maçãs e capulhos, apresentaram $NDVI > 0,75$, correspondendo a valores de SAVI acima de 0,68. Nestas condições o IAF foi máximo, em torno de 6,0. Segundo Doorenbos e Kassam (1979) o máximo índice de área foliar é atingido pelo algodoeiro durante o período de floração.

O estudo dos índices é importante na avaliação das necessidades hídricas da cultura, pois supõe-se que os mesmos fatores que os afetam influenciam também o coeficiente de cultivo. Payan e Watts (2005) compararam coeficientes de cultivo gerados por três diferentes métodos com valores de SAVI obtidos durante o ciclo do algodão cultivado na região Noroeste do México. Constataram que, independentemente do método, as curvas de K_c e SAVI têm a mesma tendência. Os valores máximos de SAVI (em torno de 0,7) ocorreram na porção média do ciclo do algodoeiro e os mínimos (0,3 a 0,2), no período de colheita, coincidindo com o SAVI encontrado para essas fases neste trabalho.

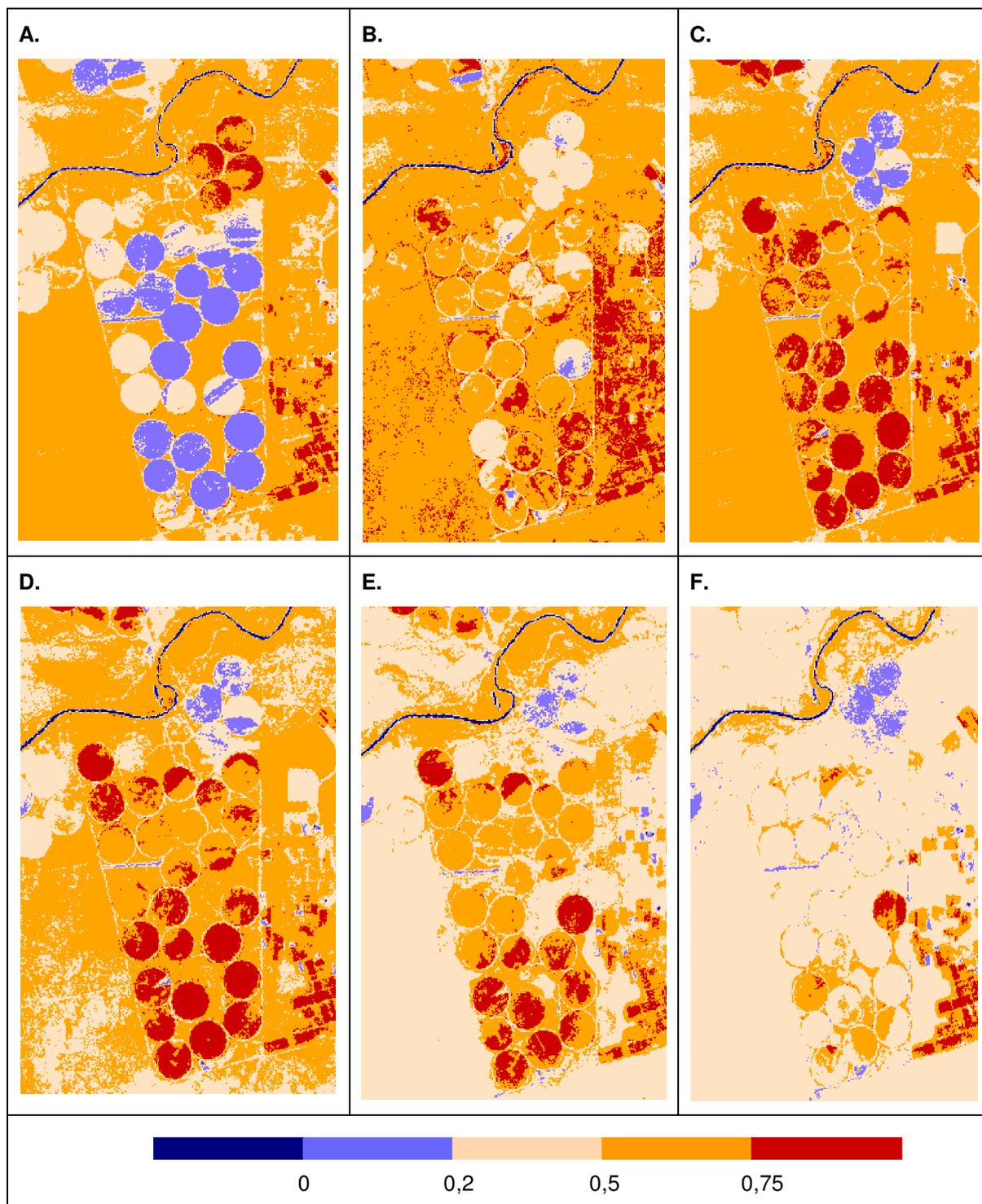


Figura 5. Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

As áreas em tonalidade azul escuro correspondem a água. A água em estado líquido absorve a radiação na faixa do infravermelho próximo (MOREIRA, 2003), o que explica resultados negativos de NDVI.

Outros autores encontraram resultados semelhantes aos apresentados. Por meio de imagens do sensor MODIS, Conrad et al (2007) encontraram, no Uzbequistão, NDVI máximo de 0,6 em cultivos de algodão irrigado, 0,15 e até -0,3 para áreas desérticas e corpos de água, respectivamente. Bezerra (2006) registrou NDVI 0,7 e 0,18 para algodão irrigado e solo exposto, respectivamente, em estudo nas imediações da Chapada do Araripe, Ceará.

A temperatura dos alvos da superfície está representada na Figura 6. As maiores variações na temperatura foram verificadas no mês de janeiro (DDA 20, Figura 6A), com mínima de 22 e máxima de 44°C, que foi a máxima registrada para todas imagens. A menor temperatura registrada foi 19°C, na carta da data de 12 de maio (DDA 132, Figura 6D). A temperatura registrada no rio Corrente ficou em torno de 25°C em janeiro e 20 a 23°C nos meses seguintes.

A cobertura vegetal foi o principal fator de variação da temperatura da superfície. Observa-se que em janeiro, mês do plantio do algodão, predominaram temperaturas entre 30 e 40°C. Nas áreas entre os pivôs, ocupadas por vegetação natural, ocorreram temperaturas menores, entre 25 e 29°C (cor azul claro). Com o desenvolvimento da cultura, podia-se identificar áreas circulares em tons bege e posteriormente azul-escuro, delimitando os pivôs. Nos meses em que o algodoeiro apresentou máximo NDVI (abril e maio), as temperaturas nos pivôs não ultrapassavam 24°C. Nestas condições, de avançado desenvolvimento vegetativo e bom suprimento de água (irrigações diárias), a planta tende a transpirar em capacidade máxima. Assim, boa parte da radiação líquida é destinada à evaporação da água, em detrimento da fração de energia que seria usada para aquecer o solo e o ar. Por isso a temperatura nos pivôs estava entre as mais baixas registradas nas cenas estudadas.

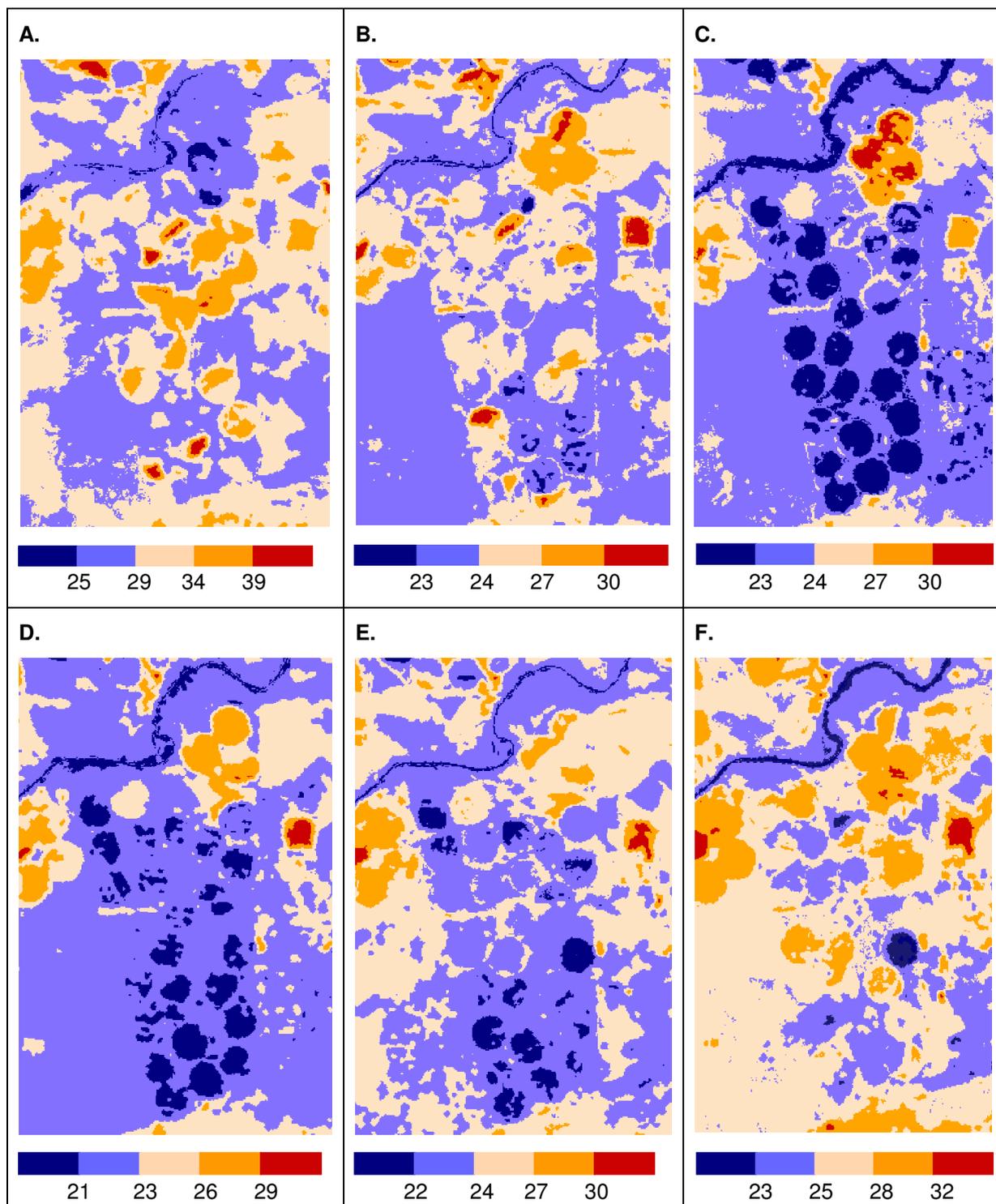


Figura 6. Temperatura da superfície (°C). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

Em solo exposto ou com pouca vegetação, a temperatura passou de 30 °C, registrando-se até mais de 39 °C em 20 de janeiro, quando o solo estava preparado para o plantio. Utilizando imagens Landsat, Costa Filho (2005) encontrou para solo descoberto valores semelhantes para os meses de setembro e outubro, no semi-árido pernambucano e Ramos (2006) registrou temperaturas ainda maiores (44 °C) no distrito de irrigação de Ponto Novo, semi-árido baiano.

Os componentes do balanço de radiação à superfície são apresentados na Tabela 4 e nas Figuras 6 e 7. A radiação de onda curta e a radiação de onda longa incidentes estimadas encontram-se na Tabela 4. Em todas as datas observou-se que a radiação global medida pelo sensor da estação meteorológica da Fazenda Busato foi inferior à estimada. O SEBAL já foi validado por meio de vários trabalhos, e como registrou SILVA et al. (2005), R_s estimada assemelhou-se com o valor medido por uma estação meteorológica na área de estudo (896,5 e 863 $W m^{-2}$, respectivamente). Allen (1996) recomenda que dados de radiação global medidos em campo devam ser avaliados e, se necessário, corrigidos antes de sua utilização, em detrimento de erros na leitura, associados à má calibração do aparelho, poeira ou dejetos de pássaros sobre a cúpula do piranômetro, entre outros. Percebe-se que a diferença entre as leituras permanece em todas datas avaliadas, o que pode sugerir erros na calibração do sensor de campo.

A densidade de fluxo de onda longa incidida não sofreu grandes variações, visto que a houve pequena diferença entre as temperaturas do ar no momento de passagem do satélite, nas distintas datas.

Tabela 4. Temperatura do ar medida em campo (T_{ar}), radiação de onda longa incidida ($R_{L\downarrow}$), radiação de onda curta incidida (R_s), estimadas pelo SEBAL e radiação de onda curta incidida medida em campo.

Data da imagem	T_{ar}	$R_{L\downarrow}$	R_s medida	R_s estimada	Erro	
	°C	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	%
20 de janeiro	32,08	369,9	794,7	913,0	118,3	14,9
25 de março	29,14	359,0	694,4	866,0	171,6	24,7
26 de abril	29,50	361,1	668,5	799,0	130,5	19,5
12 de maio	24,80	337,1	633,6	759,0	125,4	19,8
28 de maio	27,90	353,1	590,5	723,0	132,5	22,4
15 de julho	26,40	343,0	594,9	698,0	103,1	17,3

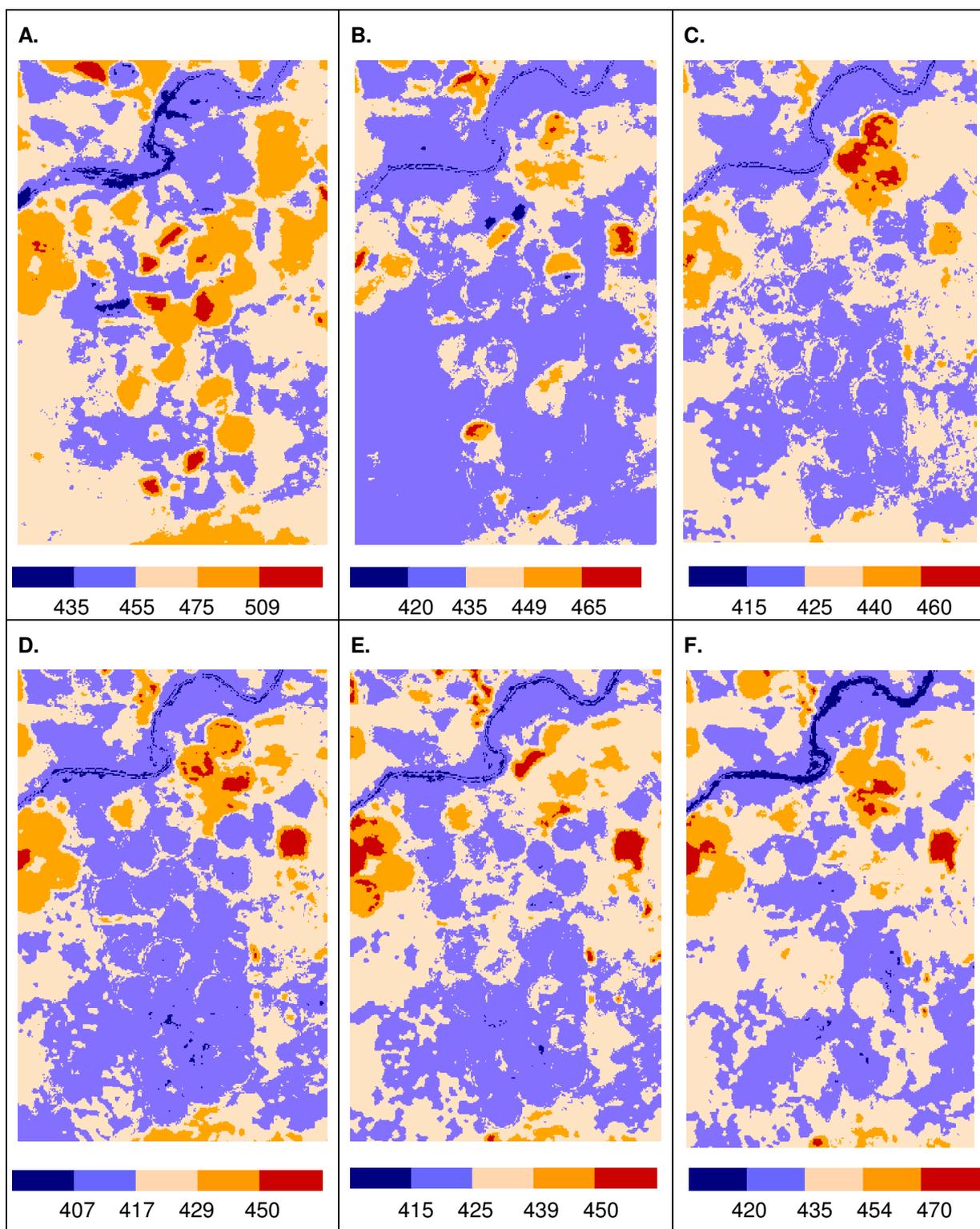


Figura 7. Radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

A densidade de fluxo de onda longa emitida pela superfície (Figura 7) é dependente da temperatura da mesma. A variação deste componente do balanço de energia seguiu a variação da temperatura da superfície, de forma que os menores registros ocorreram na água e nos pivôs com o algodão bem desenvolvido. No DDA 20 (Figura 7A) a radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$) apresentou valores mais altos: na água, entre 420 a 430 $W m^{-2}$, e acima de 470 $W m^{-2}$ em pivôs ainda não semeados. Os menores valores para $R_{L\uparrow}$ para água ocorreram em 12 de maio (401 a 410 $W m^{-2}$), bem como para o algodão (407 a 417 $W m^{-2}$), como verifica-se na Figura 7D. Silva et al. (2005b) encontrou 495 $W m^{-2}$ em solo exposto e até 458 $W m^{-2}$ em área de fruteiras irrigadas. A $R_{L\uparrow}$ é um componente subtrativo do saldo de radiação, portanto quanto menor for, mais energia fica disponível para o meio, inclusive para evapotranspiração. Os menores registros de emissão de onda longa ocorreram quando os índices de vegetação apresentaram valores altos, provavelmente período de maior taxa de transpiração da cultura.

As cartas do saldo de radiação à superfície (R_n) estão apresentadas na Figura 8. A máxima radiação líquida à superfície ocorreu, em todas datas, na água, onde R_n variou de 550 $W m^{-2}$ em julho a 809 $W m^{-2}$ em janeiro. A água apresenta albedo muito inferior aos demais alvos da superfície, portanto, absorve boa parte da energia incidente. Algumas áreas vegetadas entre os pivôs tiveram R_n alto porque o albedo destas superfícies foi baixo, bem como a emissão de radiação infravermelha. Conforme mostra as cartas desses dois componentes, nestas áreas a cor corrente era o azul escuro.

O saldo de radiação obtido nas áreas de algodão variou de 430 $W m^{-2}$ (DDA 148, Figura 8E) a 700 $W m^{-2}$ (DDA 84, Figura 8B). Entretanto, o intervalo mais freqüente foi de 550 a 600 $W m^{-2}$, ocorrendo nos DDA 116 (Figura 8C) e 132 (Figura 8D). Estas datas corresponderam, exceto para os pivôs 25, 22 e 8 setor norte, ao período de floração e lançamento de maçãs no qual o algodoeiro atinge a altura máxima e a interseção de luz acentua-se, devido ao fechamento da copa (ROSOLEM, 2001). Apesar da cobertura vegetal ser maior nesse período, e o albedo da superfície menor, o saldo de radiação não ultrapassou o número registrado para janeiro e março. Desta forma, supõe-se que o elemento que mais influenciou na quantidade de energia disponível para o meio foi o fluxo de energia de onda curta incidente.

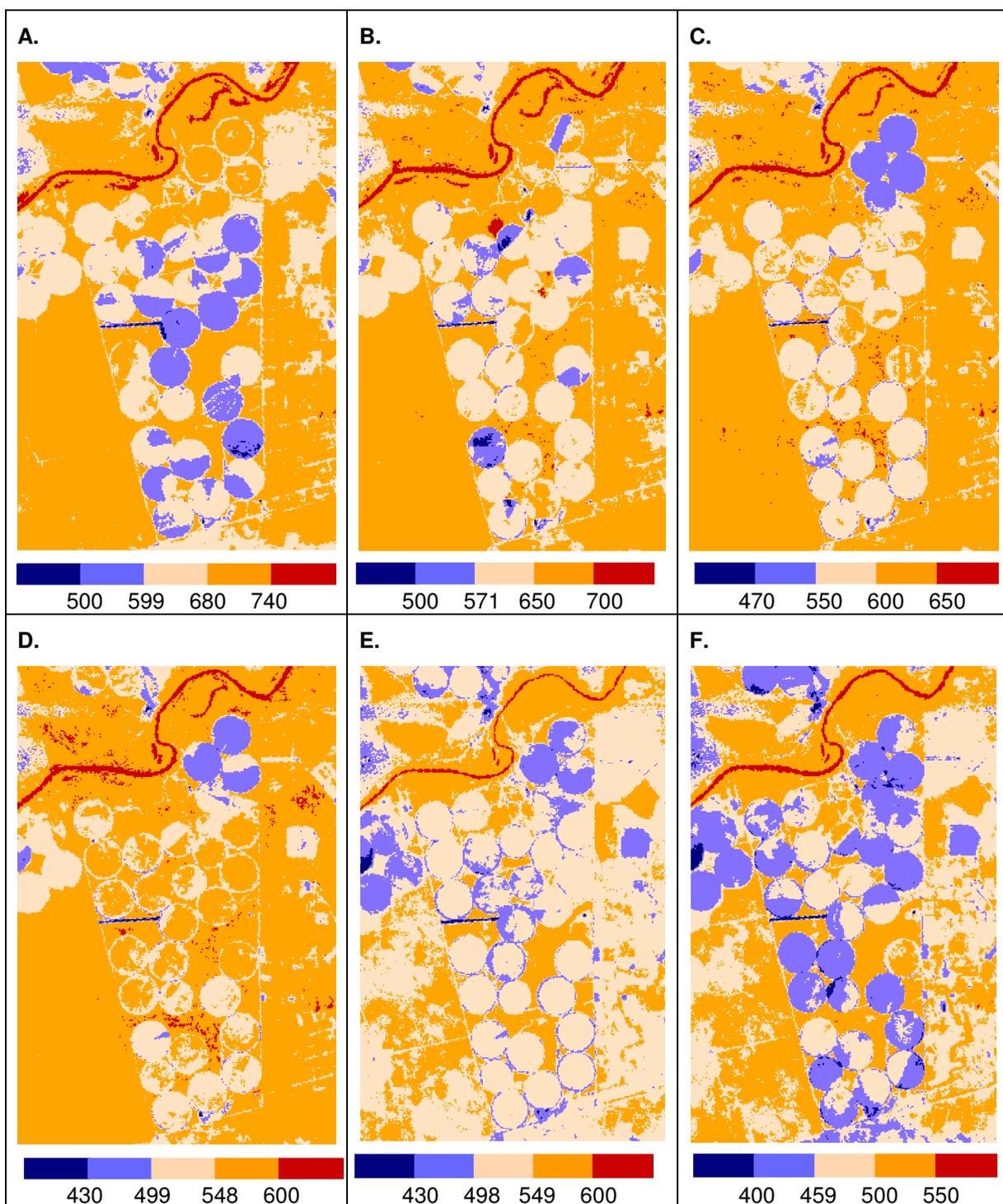


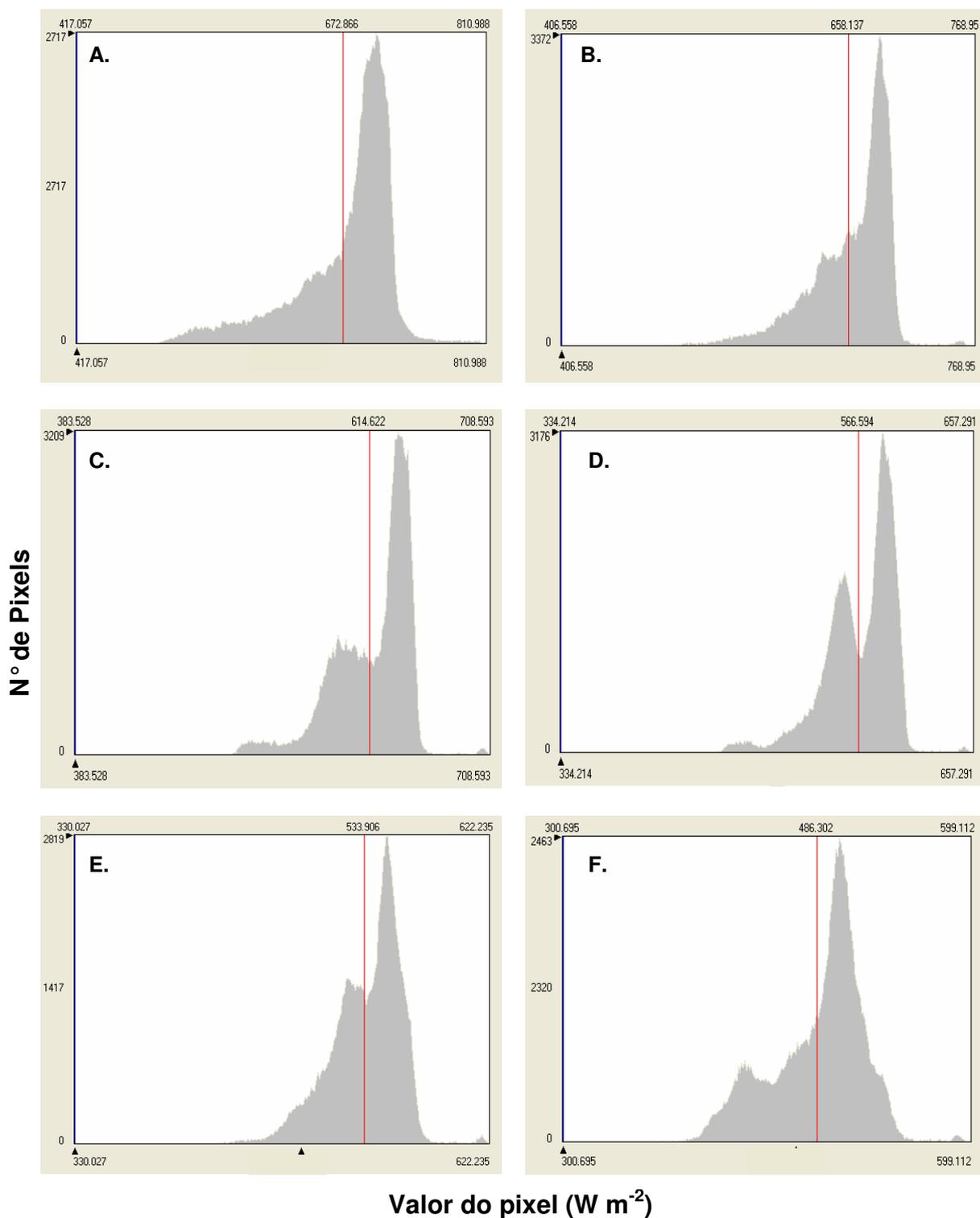
Figura 8. Saldo de radiação à superfície ($W m^{-2}$). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

Menores registros de R_n foram detectados em solo exposto, como observa-se em azul escuro (pista de pouso, por exemplo) ou com vegetação rala em azul claro (pivôs em pouso, antes do plantio e durante a colheita). Nestes pixels, os menores valores de R_n foram da ordem de 305 W m^{-2} , registrados em julho (Figura 8F).

Os resultados estão de acordo com outros citados na literatura. Chavez et al. (2007) obtiveram para corpos d'água e áreas recentemente irrigadas R_n entre 690 a 750 W m^{-2} ; em pixels com alta biomassa sem déficit de água, 600 a 650 W m^{-2} e para solos descobertos 500 a 550 W m^{-2} . Em região do semi-árido brasileiro, Bezerra (2006) encontrou R_n acima de 700 W m^{-2} em espelhos d'água e vegetação densa e 650 a 700 W m^{-2} em áreas com boa cobertura vegetal, destacando-se áreas irrigadas. Com referência a saldo de radiação em algodoeiro, Borges (2002) obtiveram com uso de saldo-radiômetro valores de 600 W m^{-2} , para a cultura durante o crescimento vegetativo; e em torno de 700 W m^{-2} , na fase reprodutiva. Por outro lado, Bastiaanssen (2000) obteve dados inferiores para algodão na Bacia de Gediz, Turquia. Para o dia 26 de junho de 1998, antes de começar a temporada da irrigação, Bastiaanssen (2000) registrou $R_n = 374 \text{ W m}^{-2}$ e as plantas ainda não haviam coberto completamente o solo. No dia 29 de agosto do mesmo ano, após o término da estação de irrigação, o saldo de radiação da mesma área foi 272 W m^{-2} .

Em todos alvos da superfície, a tendência do saldo de radiação foi decrescente, de janeiro a julho. As densidades de fluxo de onda longa emitida e onda longa incidente não apresentaram grandes discrepâncias no tempo. Como já mencionado antes, possivelmente o decréscimo na radiação solar incidente estimada por meio do SEBAL explica a diminuição do saldo com o tempo. Observa-se que as estimativas de R_n condizem com as análises feitas anteriormente: onde albedo, temperatura e onda longa emitida são inferiores, maior é o saldo.

Os histogramas de freqüência do saldo de radiação (Figura 8) mostram que os valores extremos são os menos freqüentes nas cenas, pois representam poucos pixels referentes à água ou à superfície totalmente desprovida de vegetação. A linha vermelha nos histogramas representa o valor médio de R_n em cada recorte. Em nenhuma das imagens a média coincidiu com a moda de maior freqüência.



Valor do pixel ($W m^{-2}$)

Figura 9. Histograma de freqüência do saldo de radiação à superfície. A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

Somente nos dias 20 e 84 não ocorreram duas modas. Nos dias 116 e 132 a moda menor (à esquerda) correspondeu aos pivôs irrigados (algodão e propriedades vizinhas) e a moda maior às áreas de vegetação natural e aos cultivos irrigados do Projeto Formoso. Para estas duas datas, as modas de menor e maior valor são, respectivamente, 588,8 e 634,9 $W m^{-2}$ no dia 116; e 555,9 e 582,4 $W m^{-2}$ no dia 132. A moda de maior valor para os dias 148 e 196 (em ambos histogramas à direita) representaram somente as áreas de vegetação natural, respectivamente, 549,2 e 501,2 $W m^{-2}$. Nestas duas datas, a moda de menor valor correspondeu apenas aos pivôs com algodão: 522,5 $W m^{-2}$ no dia 148 e 432,9 $W m^{-2}$ no dia 196.

CONCLUSÕES

A utilização do SEBAL na determinação do balanço de radiação do algodoeiro no Cerrado baiano mostrou-se satisfatória, visto que os resultados são coerentes com outros reportados na literatura e com as fases da cultura em campo. Os maiores valores de índices de vegetação ocorreram no período referente à fase de floração da cultura; albedo e temperatura da superfície apresentaram tendência decrescente à medida que a cultura desenvolvia; o saldo de radiação à superfície permaneceu entre 550 a 600 $W m^{-2}$ na fase de máximo desenvolvimento da cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G. Assessing Integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Baltimore, v.122, n.2, p.97-106, 1996.
- Allen, R. G., Trezza, R. & Tasumi M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and users manual, version 1.0, 2002, 98p.
- Bastiaanssen, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1995. 273p. Ph.D. Thesis
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A. & Holtslag, A. A. M. A. Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, Amsteradan, v.212-213, p. 198-212, 1998a.
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum H., Wang, J. Moreno, Y. M.J., Roerink, G. J.; van Der Wal, T. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, Amsterdan, v.212-213, p.213-229, 1998b.
- Bastiaanssen, W. G. M. SEBAL Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, Amsterdan, v. 29, p.87-100, 2000.
- Bezerra, B. G. Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL. Campina Grande: UFCG, 2006. 127p. Dissertação Mestrado.
- Campbell, G. S.; Diak, G. R. Net and termal radiation estimation and measurement. In: viney, M. K (ed.). *Micrometeorology in agricultural systems*. Madson: American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science of America, 2005, cap. 4, p. 59-92. Agronomy Monograph n. 47.

- Chander, G.; Markham, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v.41, n., p.2674-2677, 2003.
- Chandrapala, L.; Wimalasuriya, M. Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.58, n., p.89-107, 2003.
- Chavez, J. L. ; Gowda, P. H. ; Marek, T. H. ; New, L. L. Evapotranspiration mapping using METRIC™ for region with highly advective conditions. In.: 2007 ASABE Annual International Meeting, 2007, Minneapolis. Anais... Minneapolis: ASABE, 2007. CD Rom.
- Conrad, C. et al. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. *Irrigation and Drainage Systems*, Dordrecht, v.21, n.3-4 , p.197-218, 2007.
- Consoli, S. et al. Remote sensing to estimate ET-fluxes and the performance of an irrigation district in southern Italy. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.81, n., p. 295-314, 2006.
- Costa Filho, J. F. Avaliação dos componentes do balanço de energia e evapotranspiração em uma região semi-árida usando imagens orbitais Landsat-5 TM e Terra-Modis. Campina Grande: UFCG, 2005. 141p. Tese Doutorado.
- Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Yeld response to water. *Irrigation and Drainage paper 33*. Roma: FAO, 1979. 193 p.
- Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, cidade, v.25, n.3, p.295-309, 1988.

- Inoue, Y., Moran, M., 1997. A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration - a case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopies. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.18, n., p.139–152.
- Kustas, W. P; Moran. S. M; Jackson, R. D; Gay, L. W; Duell, L. F. W; Kunkel, K. E; Matthias, A. D. Instantaneous and daily values of the surface energy balance over agricultural fields using remote sensing and a reference field in an arid environment. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v.32, n., p.125-141, 1990.
- Leitão, M. M. V. B. R; Santos, J. M.; Oliveira, G. M. Estimativa de albedo em três ecossistemas da Floresta Amazônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p.256-261, 2002.
- Markham, B. L. & Barker, J. L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.8, n.3, p. 517-523, 1987.
- Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 2 ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003. 307 p.
- Morse, A., Allen, R. G., Tasumi, M., Kramber, W. J., Trezza, R.; Wright, J. Application of the SEBAL methodology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing. Final Report. Idaho: Idaho Department of Water Resources – University of Idaho, 2001. 142p.
- Oosterhuis, D. M. Growth and development of a cotton plant. In: CIA, E. et al. *Cultura do algodoeiro*. Piracicaba: Potafos, 1999. 286 p.
- Payan, J. G.; Watts, C. J. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*, Dordrecht, v.19, n., p. 301–320, 2005.

Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntesis, 2007. 136 p.

Ramos, D. G. Uso de técnicas de sensoriamento remoto para estimativa do balanço de energia no semi-árido baiano. Cruz das Almas: UFBA, 2006. 70p. Dissertação Mestrado.

Silva, B. B.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, v.20, n.2, p. 243-252, 2005a.

Silva, B. B.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.13, n.2, p. 201-211, 2005b.

SEI. Atributos climáticos do Estado da Bahia. Salvador: SEI, 1998. 85 p. Série Estudos e Pesquisas, n° 38.

SEI. Informações geo-ambientais.

http://www.sei.ba.gov.br/geoambientais/index_geoamb_infogeo.htm?tmp.codpai=gr1&tmp.pesquisa=false%20. 20 Jul. 2007.

Souza, J. L. de; 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, v.34, n.10, p.1763-1774, 1999.

CAPÍTULO 2

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO ALGODOEIRO IRRIGADO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL E IMAGENS TM - LANDSAT 5

¹Artigo que será submetido ao Comitê Editorial do periódico científico Revista Ciência e Agrotecnologia

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO ALGODOEIRO IRRIGADO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL E IMAGENS TM - LANDSAT 5

Autora: Valéria Peixoto Borges

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO: O presente trabalho teve por objetivo determinar os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração do algodoeiro irrigado por pivô central, na Fazenda Busato (13,25° S; 43,42° W; 436 m), região Oeste da Bahia, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Seis imagens TM - Landsat 5 foram adquiridas durante o ciclo de produção da cultura, cobrindo o período de 20 de janeiro a 15 de julho de 2007. Os recortes das imagens incluíam, entre outras áreas, todo perímetro com algodão irrigado da fazenda Busato, com 25 pivôs. O saldo de radiação (R_n) e os fluxos de calor sensível (H) e calor no solo (G) foram determinados por meio do algoritmo SEBAL, e o fluxo de calor latente (LE) foi obtido como resíduo da equação do balanço de energia. Verificou-se que o saldo de radiação nas áreas de algodão irrigado variou de 430 a 700 $W\ m^{-2}$; entretanto, o intervalo de valores mais freqüentemente observado foi de 550 a 600 $W\ m^{-2}$, no pleno desenvolvimento da cultura. Na fase inicial do algodão G atingiu 113 $W\ m^{-2}$, enquanto que H alcançou 350 $W\ m^{-2}$. Por outro lado, na fase reprodutiva, quando a planta apresentou o maior índice de área foliar, os valores máximos de G e H foram, respectivamente, 60 e 16 $W\ m^{-2}$. Valores aproximados de fluxo de calor latente para a fase reprodutiva estiveram entre 450 a 600 $W\ m^{-2}$, correspondendo a cerca de 90% de R_n . Logo após o plantio, registrou-se LE de 330 $W\ m^{-2}$, e na época de colheita em torno de 350 $W\ m^{-2}$. Em termos médios, a evapotranspiração do algodoeiro estimada pelo SEBAL foi 3,5 $mm\ dia^{-1}$ nas primeiras semanas após o plantio, atingiu 6,6 $mm\ dia^{-1}$ no máximo de cobertura do solo e reduziu para 4,2 $mm\ dia^{-1}$ durante a colheita. Os resultados concordaram com outras pesquisas realizadas com algodão em regiões áridas ou semi-áridas.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, fluxos de calor, demanda hídrica.

DETERMINATION OF ENERGY BALANCE COMPONENTS AND EVAPOTRANSPIRATION OVER IRRIGATED COTTON FIELDS USING SEBAL AND LANDSAT 5-TM IMAGES

Author: Valéria Peixoto Borges

Advsor: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT: This research aimed at determining the components of energy balance and evapotranspiration over a center-pivot irrigated cotton field by means of the SEBAL algorithm and Landsat 5 TM images. The area was part of the Busato Farm (13,25° S; 43,42° W; 436 m), located in the west region of Bahia, 35 km west of the Bom Jesus da Lapa town. Six images within the crop season were used, covering the period from January 25 to July 15, 2007. A smaller area was selected in the images which included the whole perimeter of the Busato Farm with its 25 center pivots of irrigated cotton. The net radiation (R_n), the sensible heat (H) flux and the soil heat flux (G) were determined by the SEBAL routines while the latent heat flux (LE) was obtained as a residual of the energy balance equation. The net radiation R_n varied from 430 $W m^{-2}$ (DOY 148) to 700 $W m^{-2}$ (DOY 84). The 550-600 $W m^{-2}$ range for R_n was the most frequent and occurred in the period of maximum crop development. In the crop initial stage, G reached 113 $W m^{-2}$ and H reached 350 $W m^{-2}$. In the crop intermediate stage, with maximum LAI, G and H reached the lowest values, i.e., 60 and 16 $W m^{-2}$, respectively. On the other hand, LE varied from 450 to 600 $W m^{-2}$ in the crop intermediate stage, corresponding to 90% of R_n estimated by SEBAL. Few days after planting, LE was 330 $W m^{-2}$ and 350 $W m^{-2}$ in the harvest time. On the average, cotton actual ET estimated by SEBAL was 3.5 $mm day^{-1}$ in the first weeks after planting, reaching 6.6 $mm day^{-1}$ in maximum crop development stage, and then moving to 4.2 $mm day^{-1}$ over harvesting. The results found here are in agreement to other studies with irrigated cotton in arid e semiarid regions of the world.

Key words: Remote sensing, heat fluxes, crop water use

INTRODUÇÃO

A produção de algodão irrigado vem crescendo mundialmente (MARTIN et al., 2007), possibilitando seu cultivo em ambientes áridos e semi-áridos, que apesar de não apresentarem regularidade de chuvas, proporcionam temperatura e luminosidade satisfatórias. Na Bahia, o avanço da cotonicultura deve-se principalmente às condições climáticas e à estrutura altamente tecnológica adotada pelos produtores (REETZ, 2006), incluindo o manejo da cultura com irrigação.

O algodoeiro é uma planta com características de desenvolvimento bem peculiares. Durante quase todo seu ciclo, diversos eventos ocorrem ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, surgimento das estruturas reprodutivas, crescimento e maturação de frutos. O manejo adequado da irrigação é essencial para o aproveitamento do potencial da cultura, pois a ocorrência de déficit hídrico pode acarretar diminuição do crescimento da planta, bem como no número de flores (ROSOLEM, 2001). Durante a maturação das maçãs, a falta de água ocasiona produção de fibra com qualidade inferior. O consumo total de água do algodoeiro varia de 700 a 1300 mm, com máxima demanda no período de floração (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A sustentabilidade da agricultura irrigada depende do uso eficiente da água, o que envolve discussões acerca do monitoramento das necessidades hídricas das culturas e controle do uso da água (CONSOLI et al., 2006).

A necessidade hídrica de uma cultura é determinada estimando-se a evapotranspiração (ET) e para tal existem diversos métodos. Os métodos fundamentados no balanço de energia estimam o fluxo de calor latente e, conseqüentemente a evapotranspiração, pela obtenção do saldo de radiação e dos fluxos de calor sensível e de calor no solo. A razão de Bowen e a correlação dos turbilhões são exemplos destes métodos.

O saldo de radiação (R_n) é a energia resultante das trocas de radiação entre superfície e atmosfera, em um determinado tempo. Basicamente, R_n é destinado ao aquecimento do ar, aquecimento do solo e evaporação da água, em fluxos energéticos denominados calor sensível, calor no solo e calor latente, respectivamente. A magnitude de R_n depende das características da superfície,

destacando-se a cobertura vegetal, a presença de água no solo, o albedo e a temperatura da superfície, entre outros.

Em grande escala espacial, a utilização de imagens de satélite na determinação das necessidades hídricas das culturas apresenta como vantagem em relação aos métodos pontuais a possibilidade de determinar a evapotranspiração conforme realmente ocorre em campo, englobando todos fatores de planta, solo e atmosfera que a determinam e são bastante variáveis espacialmente.

O SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) é um algoritmo desenvolvido por Bastiaanssen (1998) para estimativa da ET por meio da solução do balanço de energia. Pesquisas realizadas em vários países mostram a consistência e a validade dos dados gerados pelo SEBAL, a exemplo dos trabalhos desenvolvidos na Bacia do Rio do Urso nos Estados Unidos (MORSE et al., 2001), na Turquia (BASTIAANSSEN, 2000), Ásia (CHANDRAPALA e WIMALASURIYA, 2003) e no Brasil (BEZERRA, 2006; SILVA e BEZERRA, 2006; SILVA et al., 2005b; COSTA FILHO, 2005).

O SEBAL requer poucos dados de superfície e imagens de satélite como elementos de entrada, possibilitando a determinação da temperatura, albedo, índices de vegetação para o cálculo de R_n . O calor latente é obtido como resíduo da equação de R_n , a partir da determinação dos fluxos de calor sensível e de calor no solo.

Este estudo teve por objetivo determinar os componentes do balanço de energia (fluxos não-radiativos) e a evapotranspiração do algodoeiro irrigado por pivô central, na sub-bacia do rio Corrente (bacia do rio São Francisco, Bahia), por meio do algoritmo SEBAL e imagens do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada a 35 km a oeste da sede do município de Bom Jesus da Lapa ($13^{\circ}15'18''$ S, $43^{\circ}25'05''$ W, 436 m a.n.m), na região Oeste do Estado da Bahia. Esta área compreende a Fazenda Busato; parte do Projeto de Irrigação Formoso, da Codevasf (Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco), no qual a bananeira é a principal cultura; outras propriedades com agricultura irrigada; áreas de vegetação natural e o Rio Corrente, afluente do Rio São Francisco. A Fazenda Busato possui 2.500 ha de algodão irrigado por pivô central, cultivares Delta Penta e Delta Opal. Na Figura 1 encontram-se mais detalhes da área de estudo.

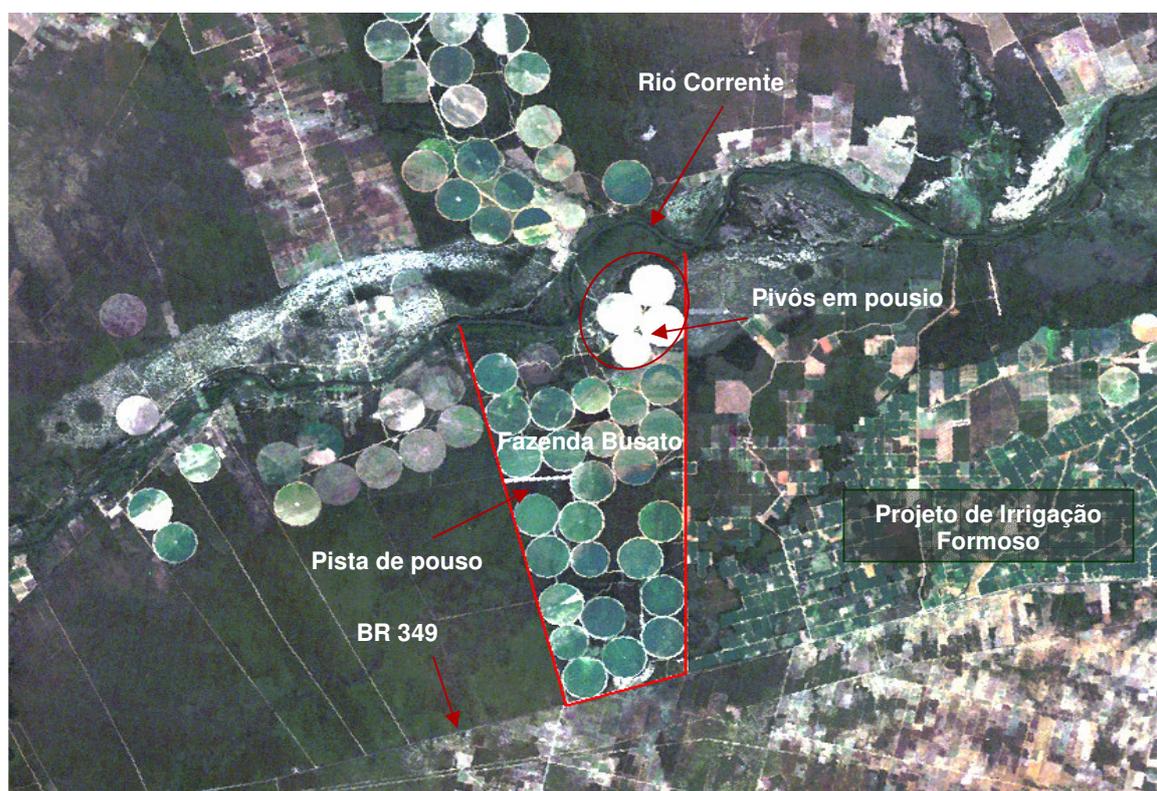


Figura 1. Imagem TM - Landsat 5 (composição de bandas 3-2-1) da área de estudo, do dia 26 de abril de 2007 (DDA 116). Em destaque a Fazenda Busato, delimitada pela linha vermelha e pelo rio Corrente.

O plantio do algodão ocorreu do dia 08 de janeiro de 2007 (Dia do Ano – DDA 8) ao dia 06 de março (DDA 65), um período, portanto, de 57 dias. O ciclo médio dos cultivares utilizados é em torno de 180 dias (Beltrão, 2003). A colheita

começou no mês de junho de 2007 e estendeu-se até o mês de agosto de 2007. A **Tabela 1** mostra as datas de plantio em cada pivô, os quais são identificados na Figura 2. O manejo da irrigação na Fazenda Busato é realizado com auxílio de um programa computacional, que estima a ET_0 pelo método da FAO Penman-Monteith a partir de dados gerados por uma estação meteorológica instalada na fazenda. O turno de rega diário varia de acordo com a lâmina necessária a ser aplicada.

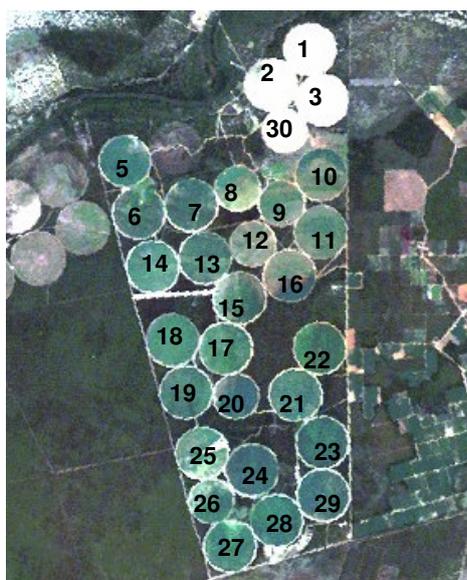


Figura 2. Identificação dos pivôs na Fazenda Busato.

2. Dados Meteorológicos e Caracterização Climática da Área

Os dados meteorológicos usados foram obtidos em estação meteorológica automática Davis modelo Vantage Pro[®], de propriedade da Fazenda Busato, a qual fornecia dados a cada meia hora, totalizando 48 leituras diárias.

O clima da região de estudo é classificado como semiárido e subúmido a seco, tipologia DdA', segundo metodologia de Thornthwaite & Matther, com estação chuvosa no período de primavera-verão. Os solos predominantes são Latossolos e Cambissolos e a vegetação natural é classificada como Contato Caatinga-Floresta Estacional e Formações Pioneiras com Influência Fluvio-marinha (SEI, 2007). As médias anuais de temperatura, precipitação e evapotranspiração potencial são, respectivamente, 25,3°C, 831 mm e 1418 mm (SEI, 1998).

Tabela 1. Escalonamento do plantio e colheita do algodão na Fazenda Busato, no primeiro semestre de 2007.

Data de plantio – DDA	N° do pivô	Data de colheita – DDA	Ciclo da cultura (dias)
08/01 – 08	23	28/07 - 209	201
09/01 – 09	28	07/08 (setor Oeste) - 219	210
09/01 – 09	28	16/08 (setor Leste) - 228	219
11/01 – 11	15	10/07 - 191	180
11/01 – 11	17	16/07 - 200	189
12/01 – 12	12	06/07 - 187	175
15/01 -15	10 (setor Norte)	14/07 - 195	180
16/01 – 16	24 (setor Oeste)	11/08 – 223	207
16/01 - 16	26	18/08 – 230	214
16/01 – 16	29	14/08 – 226	210
17/01 – 17	14	08/07 – 189	172
18/01 – 18	06	23/07 – 204	186
18/01 – 18	13	01/07 – 182	164
19/01 – 19	7	04/07 – 185	166
19/01 – 19	8 (setor Sul)	04/08 – 216	197
19/01 – 19	24 (setor Leste)	13/08 – 225	206
20/01 – 20	5	07/08 – 219	199
21/01 – 21	20	22/07 – 203	182
21/01 – 21	21	22/07 – 203	182
22/01 – 22	19	20 e 22/07 – 201 e 203	181
23/01 – 23	18	19/07 – 200	177
24/01 – 24	27	22 e 24/08 – 234 e 236	212
26/01 – 26	16	11/07 – 192	166
27/01 – 27	9	09/08 – 221	194
27/01 – 27	10 (setor Sul)	13/07 – 194	167
28/01 – 28	11	27/07 – 208	180
27/02 – 58	25	26/08 – 238	180
01/03 – 60	8 (setor Norte)	27/08 – 239	179
06/03 - 65	22	30/08 – 242	177

3. Imagens de Satélite

As imagens de satélite utilizadas foram geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5 (TM - Landsat 5), órbita 219 e ponto 69, adquiridas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Utilizou-se seis imagens, obtidas em datas distintas do ciclo do algodoeiro cultivado na Fazenda Busato: 20 de janeiro (dia do ano - DDA 20), 25 de março (DDA 84), 26 de abril (DDA 116), 12 de maio (DDA 132), 28 de maio (DDA 148) e 15 de julho (DDA 196), todas do ano de 2007. O satélite tem resolução temporal de 16 dias, e o horário de passagem do satélite sobre a área de interesse ocorria sempre às 9 horas e 56 minutos (tempo solar).

As imagens foram escolhidas dentro do intervalo de tempo que compreendia o ciclo do algodão na Fazenda Busato. Inicialmente, pretendia-se adquirir ao menos uma imagem a cada mês, afim de melhor detalhar a análise dos componentes do balanço de radiação nas distintas fases fenológicas da cultura. Entretanto, a aplicação do SEBAL requer imagens sem a presença de nuvens e, dentro do referido período, as seis imagens adquiridas foram as únicas adequadas.

O sensor TM mede a radiância espectral dos alvos e armazena-os na forma de níveis de cinza, ou número digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits), tendo uma resolução espacial de 30 m x 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e resolução de 120 m x 120 m no canal termal, banda 6. As características de cada banda do TM - Landsat 5 estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (a: radiância mínima e b: radiância máxima), e irradiancias espectrais no topo da atmosfera. Fonte: Chander e Markham (2003).

Bandas	Comprimento de onda μm	Coeficientes de calibração		Irradiância espectral no topo da atmosfera $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$
		a $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	b $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	
1 – azul	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957,0
2 – verde	0,53 – 0,61	-2,84	365,0	1826,0
3 – vermelho	0,62 – 0,69	-1,17	264,0	1554,0
4 – IV próximo	0,78 – 0,79	-1,51	221,0	1036,0
5 – IV médio	1,57 – 1,78	-0,37	30,2	215,0
6 – IV termal	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 – IV médio	2,10 – 2,35	-0,15	16,50	80,67

Todo processamento das imagens foi realizado com o software ERDAS Imagine v. 8.7, da Leica Geosystems. Inicialmente as bandas foram empilhadas, seguindo a ordem crescente, formando um único arquivo de imagem. O recorte da área de interesse possui as seguintes coordenadas geográficas: canto superior esquerdo (43°55'19"Oeste e 13°06'02" Sul); canto inferior esquerdo (43°55'15" Oeste; 13°20'48" Sul); canto superior direito (43°29'24" Oeste; 13°05'55" Sul) e canto inferior direito (43°29'19" Oeste; 13°20'40" Sul). O mesmo recorte foi mantido para todas imagens.

4. Aplicação do SEBAL

O SEBAL requer imagens com canais refletivos na região do visível, infravermelhos próximo e médio, e infravermelho termal, para determinação do albedo da superfície, índices de vegetação e temperatura da superfície. O saldo de radiação (R_n) é computado a partir da soma dos fluxos de radiação incidente, refletida e emitida pela superfície. O saldo de radiação de onda curta é determinado por meio de equações astronômicas juntamente com as estimativas da transmissividade atmosférica e do albedo. A radiação de onda longa incidente é modelada com base na temperatura do ar no momento de passagem do satélite e determina-se a radiação de onda longa emitida com a temperatura e emissividade da superfície. Os procedimentos para a determinação de R_n estão descritos em Allen et al. (2002). A seguir é apresentada a metodologia para determinação dos fluxos energéticos de calor sensível, calor no solo e calor latente.

O fluxo de calor no solo G ($W\ m^{-2}$) foi determinado segundo a equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa os valores próximos ao meio-dia:

$$G = T_s \left[(0,0038 + 0,0074\alpha) (1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n \quad (1)$$

onde T_s : temperatura da superfície ($^{\circ}C$), α : albedo da superfície, NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e R_n : saldo de radiação à superfície, todos computados pixel a pixel. Em corpos d'água, onde NDVI é menor que zero, considerou-se $G = 0,3 R_n$ (SILVA e BEZERRA, 2006; SILVA et al., 2005).

O fluxo de calor sensível H ($W\ m^{-2}$) refere-se à transferência de calor para o ar por convecção e condução, devido a diferenças de temperatura, sendo

função do gradiente de temperatura, rugosidade da superfície e da velocidade do vento. A estimativa de H é o procedimento principal no SEBAL, pois é um processo iterativo, onde se considera, inicialmente, a atmosfera em equilíbrio neutro e, posteriormente, é identificada a condição de estabilidade e realizadas as correções necessárias. O termo H foi estimado com base na velocidade do vento, velocidade de fricção e temperatura da superfície, usando-se uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis (BASTIAANSEN, 1998a). Matematicamente, o fluxo de calor sensível pode ser calculado pela seguinte equação para o transporte de calor:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

onde ρ : densidade do ar úmido (kg m^{-3}), calculada segundo Arya (1998); C_p : calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); dT : diferença de temperatura entre dois níveis próximos à superfície ($^{\circ}\text{C}$) e r_{ah} : resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s m^{-1}).

Na obtenção de H por meio do SEBAL é necessário identificar dois pixels, denominados “pixels âncora”, para determinar a variação de dT entre dois níveis de referência e r_{ah} em todos os pixels da área de estudo. O esquema apresentado na Figura 3 resume os procedimentos iterativos para o cálculo de H.

Com base na altura média da vegetação ao redor da estação meteorológica (h) obteve-se o coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum (z_{0m}) em metros, segundo equação de Brutsaert (1982):

$$z_{0m} = 0,12 h \quad (3)$$

onde h neste estudo foi considerado igual a 0,2 m.

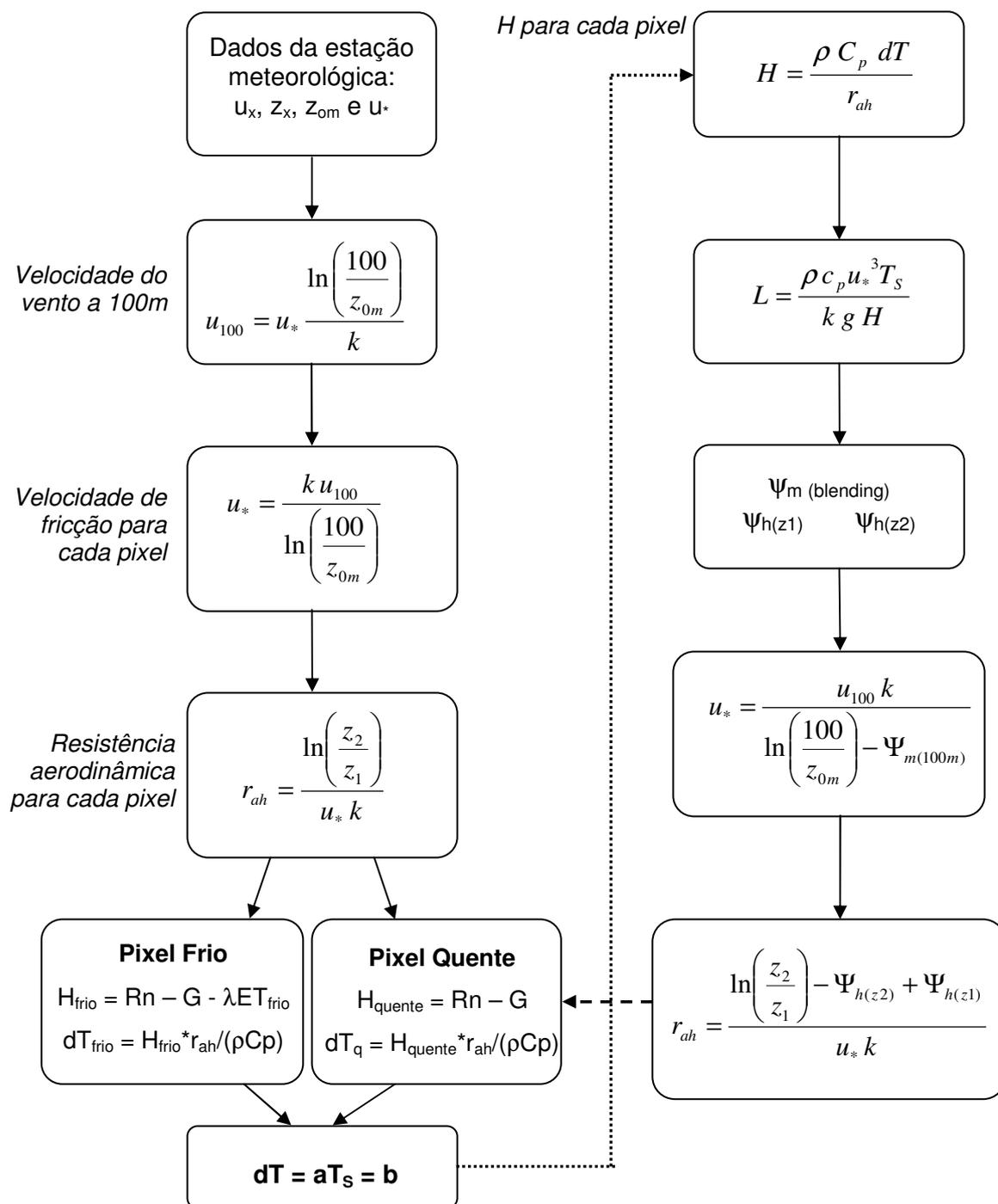


Figura 3. Processo iterativo para determinação do fluxo de calor sensível (H).

A velocidade de fricção u_* (m s^{-1}) foi computada usando o perfil logarítmico do vento para a condição de estabilidade neutra:

$$u_* = \frac{k u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (4)$$

onde k : constante de von Karman (0,41), u_x : velocidade do vento (m s^{-1}) na altura z_x (neste estudo $z_x = 2 \text{ m}$) e z_{0m} é a coeficiente de rugosidade (m). Ainda considerando a atmosfera em estabilidade neutra, computou-se a velocidade do vento para o nível $x = 100 \text{ m}$ (BASTIAANSSEN, 1995):

$$u_{100} = u_* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (5)$$

Na Tabela 3 são apresentadas a velocidade do vento a 2 m medida na estação meteorológica da Fazenda Busato e as velocidades de fricção e do vento a 100 m para condições de estabilidade neutra da atmosfera, em cada data.

Tabela 3. Velocidade do vento a 2 m de altura (u_2) medida na estação meteorológica e estimativas da velocidade de fricção (u_*) e velocidade a 100 metros (u_{100}) em cada data avaliada.

Parâmetro	DDA 20	DDA 84	DDA 116	DDA 132	DDA 148	DDA 196
u_2	0,86	1,72	0,50	1,33	2,04	1,31
u_*	0,080	0,159	0,046	0,123	0,083	0,046
u_{100}	1,62	3,24	0,94	2,51	1,68	0,94

A 100 m de altura (blending height) assume-se que a velocidade do vento é constante em toda a cena estudada, por considerar-se que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis. Admitindo-se esta hipótese, obteve-se a velocidade de fricção u_* (m s^{-1}) para cada pixel através da equação:

$$u_* = \frac{k u_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)} \quad (6)$$

onde z_{0m} (m) foi computado para cada pixel em função do SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo), segundo equação desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62 \text{ SAVI}) \quad (7)$$

De posse dos valores de u^* para cada pixel estimou-se a resistência aerodinâmica r_{ah} ($s \text{ m}^{-1}$) também para condição de estabilidade neutra da atmosfera pela seguinte expressão:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* k} \quad (8)$$

onde z_1 e z_2 : alturas acima da superfície, neste estudo consideradas $z_1 = 0,1 \text{ m}$ e $z_2 = 2,0 \text{ m}$ e k : constante de von Karman (0,41).

A diferença de temperatura próxima à superfície dT para cada pixel foi determinada através da relação:

$$dT = a + bT_s \quad (9)$$

onde a e b : coeficientes da relação linear entre dT e T_s , computados através dos pixels âncora (quente e frio).

O pixel “frio” foi escolhido em uma área bem irrigada, onde se assumiu que o fluxo de calor sensível é nulo ($H_{frio} = 0$) e o fluxo de calor latente LE_{frio} dado por $(Rn - G)$. O pixel “quente” foi escolhido em uma área de solo exposto, admitindo-se fluxo de calor latente nulo ($LE_{quente} = 0$) e o calor sensível H_{quente} dado por:

$$H_{quente} = Rn - G = \frac{\rho c_p (a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (10)$$

onde T_s , Rn , G e r_{ah} , já definidos anteriormente, foram obtidos no pixel quente da imagem.

Neste ponto, conhecendo-se os valores de T_s , Rn , G , C_p , ρ e r_{ah} para o pixel quente, obtém-se $a + bT_s = r_{ah} (Rn - G) / (\rho c_p)$. Como no pixel frio $dT = 0$, ou seja, $a + bT_s = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de a e b . Na seqüência pode-se então obter H , segundo a equação 2, pixel a pixel.

Os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão somente, como valores iniciais de um processo iterativo, o qual irá ajustá-lo, identificando nas etapas seguintes a condição de estabilidade de cada pixel.

O comprimento de Monin-Obukhov – L (m), utilizado para definir as condições de estabilidade da atmosfera, foi calculado pela seguinte expressão (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2000; Allen et al., 2002):

$$L = \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{k g H} \quad (11)$$

na qual ρ : densidade do ar úmido (kg m^{-3}); c_p : calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); u_* : velocidade de fricção (m.s^{-1}) em cada pixel, T_s : temperatura da superfície (K) em cada pixel, g : módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ m s}^{-2}$) e H : fluxo de calor sensível (W m^{-2}) em cada pixel, obtido inicialmente considerando condição de neutralidade.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (Ψ_m) e de calor (Ψ_h) deverão ser considerados. Para isto, utilizou-se as formulações (Bastiaanssen, 1995, Morse et al., 2000; Allen et al., 2002) apresentadas a seguir.

Se $L < 0$ (condição de instabilidade):

$$\Psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}^2}{2} \right) - 2 \text{ARCTAN}(x_{(100m)}) + 0,5\pi \quad (12)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2} \right) \quad (13a)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right) \quad (13b)$$

$$x_{(100m)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{100}{L} \right)^{0,25} \quad (14a)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{2}{L} \right)^{0,25} \quad (14b)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (14c)$$

Se $L > 0$ (condição de estabilidade):

$$\Psi_{m(100m)} = -5 \left(\frac{100}{L}\right) \quad (15a)$$

$$\Psi_{m(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L}\right) \quad (15b)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L}\right) \quad (15c)$$

Se $L = 0$ (condição de neutralidade), $\Psi_m = 0$ e $\Psi_h = 0$.

O valor corrigido para a velocidade de fricção u^* (m s^{-1}), computado em cada interação é dado por:

$$u_* = \frac{u_{100} k}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right) - \Psi_{m(100m)}} \quad (16)$$

onde u_{100} : velocidade do vento a 100 m (m s^{-1}), k : constante de von Karman (0,41), z_{0m} : coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e $\Psi_{m(100m)}$: correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100 m.

Com u^* retificado, calculou-se o valor corrigido da resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (s m^{-1}) através da seguinte equação (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2000; Allen et al., 2002):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* k} \quad (17)$$

onde $z_2 = 2,0$ m, $z_1 = 0,1$ m e $\Psi_{h(z_2)}$ e $\Psi_{h(z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente.

Com os novos valores de r_{ah} e u^* retornou-se ao cálculo da função da diferença de temperatura, repetindo todo o procedimento, como mostra o fluxograma da Figura 3. As iterações são realizadas até que os valores de dT e r_{ah} converjam para valores constantes no pixel quente.

O fluxo de calor latente LE ($W\ m^{-2}$) foi obtido como parte residual da equação do balanço de energia, pela simples diferença entre o saldo de radiação, o fluxo de calor do solo e o fluxo de calor sensível, dado por:

$$LE = Rn - G - H \quad (18)$$

onde LE : fluxo de calor latente instantâneo, determinado no momento da passagem do satélite.

Para determinar a evapotranspiração (ET) diária, inicialmente calculou-se a evapotranspiração horária (ET_h), dividindo-se o fluxo de calor latente (LE) obtido através da equação 18 pelo calor latente de vaporização da água, $\lambda = 2,45 \times 10^6\ J\ kg^{-1}$ (ALLEN et al., 2002) :

$$ET_h = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (19)$$

onde 3600 é o fator de conversão de segundos para hora.

Em seguida obteve-se a fração de evapotranspiração de referência (FET_o). FET_o é similar ao coeficiente de cultivo (kc), utilizada para extrapolar a ET_h para escala diária.

$$FET_o = \frac{ET_h}{ET_{oh}} \quad (20)$$

onde ET_h é determinado pela equação 19 e ET_{oh} é a evapotranspiração de referência no momento de passagem do satélite.

Considerando que FET_o é constante para o período diurno, ou seja, $FET_o = FET_{o_dia}$, a evapotranspiração diária da cultura foi estimada como se segue:

$$ET_{24} = FET_o \times ET_{o_24} \quad (21)$$

onde ET_{o_24} é a evapotranspiração diária de referência. Tanto ET_{o_24} quanto ET_{oh} foram determinados pela equação FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), com os dados da estação meteorológica da Fazenda Busato, empregando-se a radiação global diária e instantânea estimadas segundo a equação de Angström (ALLEN et al., 1998) e o SEBAL, respectivamente. Tal medida deveu-se aos dados de radiação obtidos pela estação meteorológica da Busato apresentarem-se, em todas datas, inferiores ao valor estimado pelo SEBAL para radiação instantânea, conforme discutido no Capítulo 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cartas do saldo de radiação à superfície (R_n) são apresentadas na Figura 6. A máxima radiação líquida da superfície ocorreu, em todas as datas, no leito do rio, de 550 W m^{-2} em julho a 809 W m^{-2} em janeiro. O saldo de radiação obtido nas áreas de algodão irrigado variou de 430 (DDA 148) a 700 W m^{-2} (DDA 84). Entretanto, o intervalo mais freqüente foi de 550 a 600 W m^{-2} , ocorrendo nos DDA 116 e 132. Estas datas corresponderam, exceto para os pivôs 25, 22 e 8 setor norte, ao período de floração e lançamento de maçãs, no qual o algodoeiro atinge a altura máxima e a interseção de luz acentua-se, devido ao fechamento da copa (ROSOLEM, 2001). Menores registros de R_n foram detectados em solo exposto, como se observa em azul escuro (pista de pouso, por exemplo) ou com vegetação rala em azul claro (pivôs em pousio, antes do plantio e durante a colheita). Nestes pixels, os menores valores de R_n foram da ordem de 305 W m^{-2} , registrados em julho.

Os resultados estão de acordo com outros citados na literatura. Chavez et al. (2007) obtiveram para corpos d'água e áreas recentemente irrigadas R_n entre 690 a 750 W m^{-2} ; em pixels com alta biomassa sem déficit de água, 600 a 650 W m^{-2} e para solos descobertos 500 a 550 W m^{-2} . Em região do semi-árido brasileiro, Bezerra (2006) encontrou R_n acima de 700 W m^{-2} em espelhos d'água e vegetação densa e 650 a 700 W m^{-2} em áreas com boa cobertura vegetal, com destaque para as áreas de algodão irrigadas. Com referência ao saldo de radiação em algodoeiro, Borges (2002) obtiveram com uso de saldo-radiômetro valores de 600 W m^{-2} para a cultura durante o crescimento vegetativo e em torno de 700 W m^{-2} , na fase reprodutiva. Por outro lado, Bastiaanssen (2000) obteve dados inferiores para algodão na Bacia de Gediz, Turquia. Para o dia 26 de junho de 1998, antes de começar a temporada da irrigação, Bastiaanssen (2000) registrou $R_n = 374 \text{ W m}^{-2}$ e as plantas ainda não haviam coberto completamente o solo. No dia 29 de agosto do mesmo ano, após o término da estação irrigada, o saldo de radiação da mesma área foi 272 W m^{-2} .

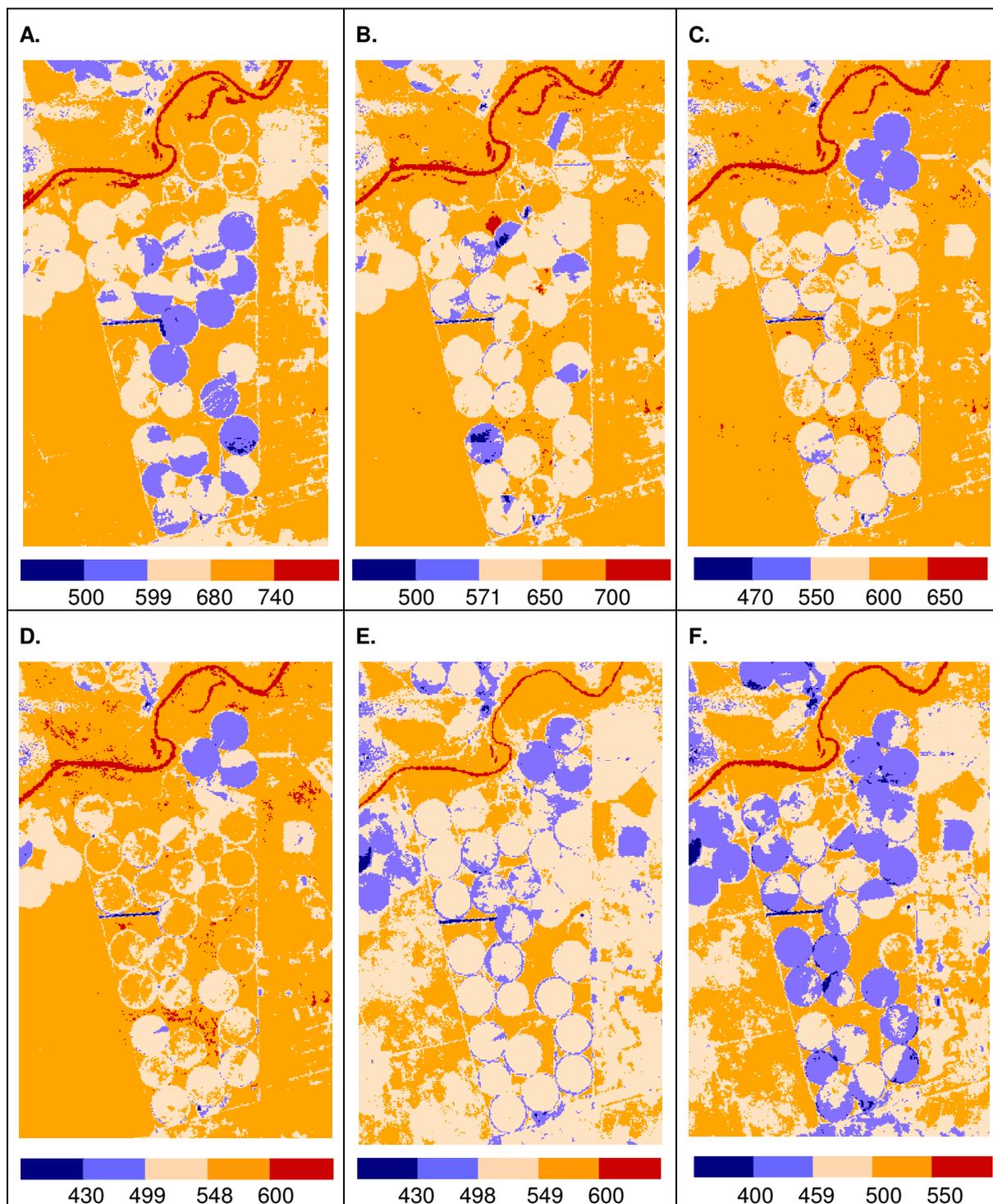


Figura 4. Saldo de radiação à superfície ($W m^{-2}$). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

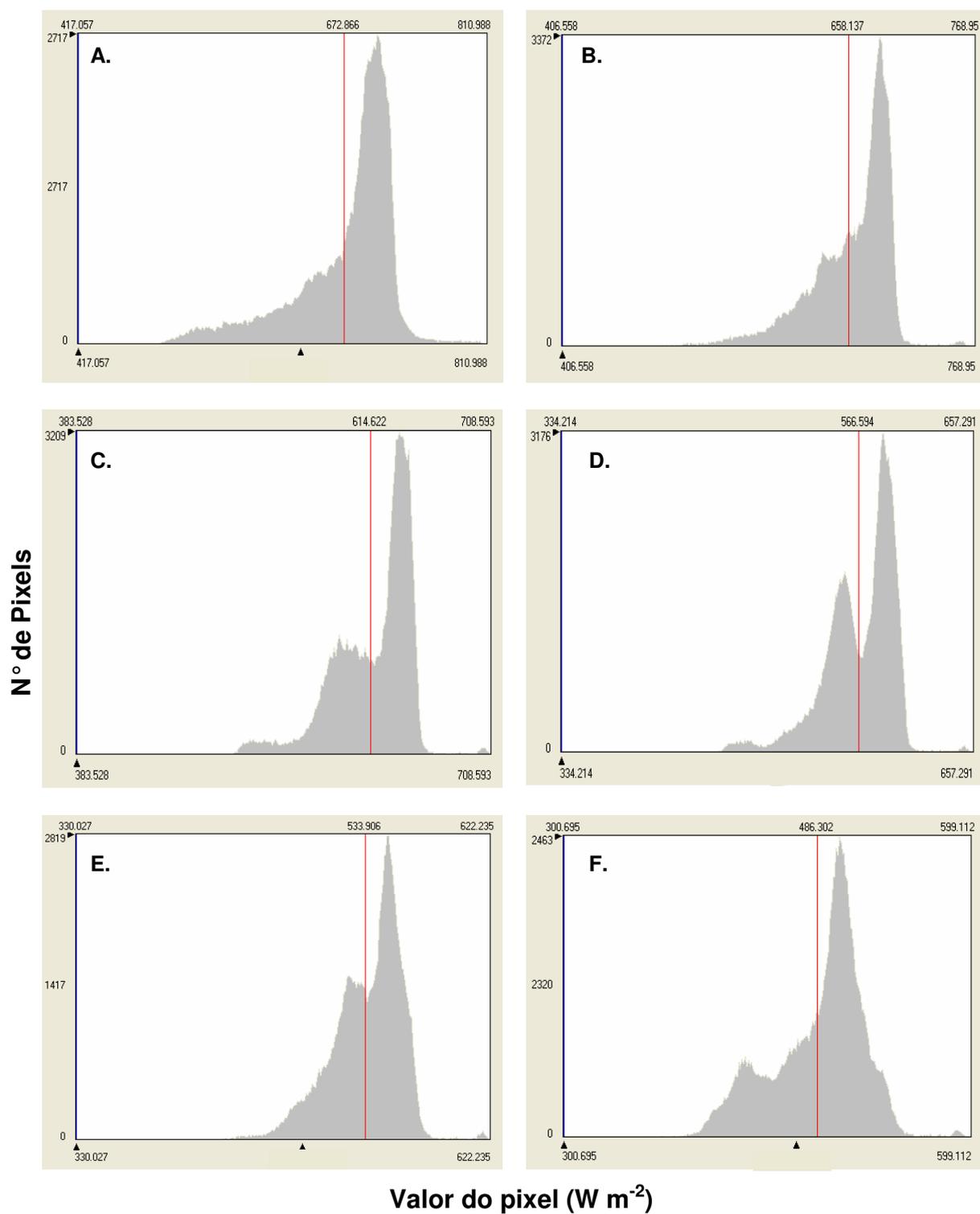


Figura 5. Histograma de frequência do saldo de radiação à superfície. A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 de 2007.

Os histogramas de frequência do saldo de radiação (Figura 7) mostram que os valores extremos são os menos frequentes nas cenas, pois representam poucos pixels referentes à água (extrema direita) ou à superfície totalmente desprovida de vegetação. A linha vermelha neste e nos demais histogramas que serão apresentados representa o valor médio em cada recorte. São observadas duas modas na distribuição dos valores de R_n nos histogramas, com exceção aos dias 20 e 84. A moda de menor valor (à esquerda) correspondeu aos pivôs de algodão e a moda de maior valor às áreas de vegetação natural.

O fluxo de calor no solo (G) está representado nas cartas da Figura 5. Para a água, Allen et al. (2002) sugeriram usar $G = 0,5R_n$ em lagos profundos e claros, e no caso de águas mais turbidas em leitos mais rasos a relação G/R_n deveria ser menor que 0,5. Neste estudo, considerou-se que $G = 0,3R_n$ para água, conforme utilizado em demais trabalhos (COSTA FILHO, 2005; SILVA, 2005; BEZERRA, 2006).

Em todas as datas a maior densidade de fluxo de calor no solo foi encontrada na extensão do rio Corrente, variando de 168 W m^{-2} no dia 196 a valores acima de 230 W m^{-2} no dia 20, seguindo a variação do saldo de radiação no ciclo estudado. Bezerra (2006) e Silva (2005) registraram valores nessa faixa, com $G = 190 \text{ W m}^{-2}$ em açudes e corpos d'água, e no lago da represa de Sobradinho, respectivamente. Já Costa Filho (2005) encontrou $G > 216 \text{ W m}^{-2}$ em água e Chavez et al. (2007) G entre 370 e 380 W m^{-2} no Lago Meredith, no Texas, EUA.

As áreas aparecem bem delimitadas nas cartas segundo o uso do solo. Como G é resultado do albedo, temperatura da superfície e da cobertura vegetal, seu valor foi superior em áreas caracterizadas por pouca vegetação ou solo exposto, e decresceu à medida que o algodoeiro desenvolvia. Na fase inicial do algodão (dia 20) G atingiu 113 W m^{-2} , posteriormente não ultrapassou 60 W m^{-2} durante desenvolvimento vegetal e reprodutivo (dias 84 a 148) e na colheita ocorreu ligeiro aumento para 66 W m^{-2} . Estes dados assemelham-se com resultados de Bezerra (2006) que encontrou no máximo 75 W m^{-2} para fluxo de calor no solo em áreas irrigadas. Bastiaanssen (2000) obteve $G = 82 \text{ W m}^{-2}$ em cultivo de algodão, ainda com cobertura parcial de solo, antes do início do período de irrigação. Na mesma área, após a temporada de irrigação, com a cultura cobrindo o solo, o fluxo de calor no solo foi 29 W m^{-2} . Chavez et al. (2007)

registraram G de 80 a 100 $W m^{-2}$ em solo descoberto e 25 a 40 $W m^{-2}$ para culturas com alta biomassa. Com valores semelhantes estavam os pivôs com algodão no período de floração e desenvolvimento de maçãs, nas cartas aparecendo em azul-escuro.

Os histogramas de frequência de fluxo de calor no solo são apresentados na Figura 8. Os pixels referentes à superfície coberta por água encontram-se na moda de maior valor, na extrema direita dos histogramas. Nos dias 132, 148 e 196 os histogramas apresentaram somente mais uma moda, coincidente com a média ($61 W m^{-2}$) neste último. Para os dias 132 e 148 as modas foram 57,02 e 61,8 $W m^{-2}$, respectivamente, e corresponderam às áreas de vegetação natural. Nas demais datas a moda de menor valor (à esquerda) compreendeu pixels com vegetação natural, com valores de 81,6; 55,3 e 59,5 $W m^{-2}$ para os respectivos dias 20, 84 e 116. À direita desta moda, ocorreu outra, alusiva à pixels com solo exposto, com G igual a 94,5; 73,0 e 85,4 $W m^{-2}$, para o dias 20, 84 e 116, respectivamente.

Para obtenção do fluxo de calor sensível em cada pixel da cena, é necessário, como já descrito na metodologia, a adoção de dois “pixels âncora” (pixel frio e pixel quente), para determinar os coeficientes da relação linear da diferença de temperatura entre a superfície e o ar próximo à superfície por meio do processo iterativo. Na seleção desses pixels, utilizou-se as cartas de temperatura da superfície, NDVI e o recorte das bandas empilhadas, para identificar as características da superfície. No dia 20, o pixel quente foi escolhido em um pivô da Fazenda Busato, antes do plantio do algodão, e o pixel frio em pivô localizado próximo ao rio, que estava ainda com cultivo da safra anterior. Nas demais datas, o pixel quente estava em solo descoberto, dentro da área do Projeto Formoso, e o pixel frio nos pivôs de algodão. Na Tabela A1 em Anexo são caracterizados os pixels quente e frio escolhido em cada data. O NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) nos pixels frios foi maior que 0,78, correspondendo a IAF (Índice de áreas foliar) = 6,0. Os pixels quentes escolhidos tiveram NDVI entre 0,03 e 0,15, apresentando IAF máximo de 0,06 (DDA 116).

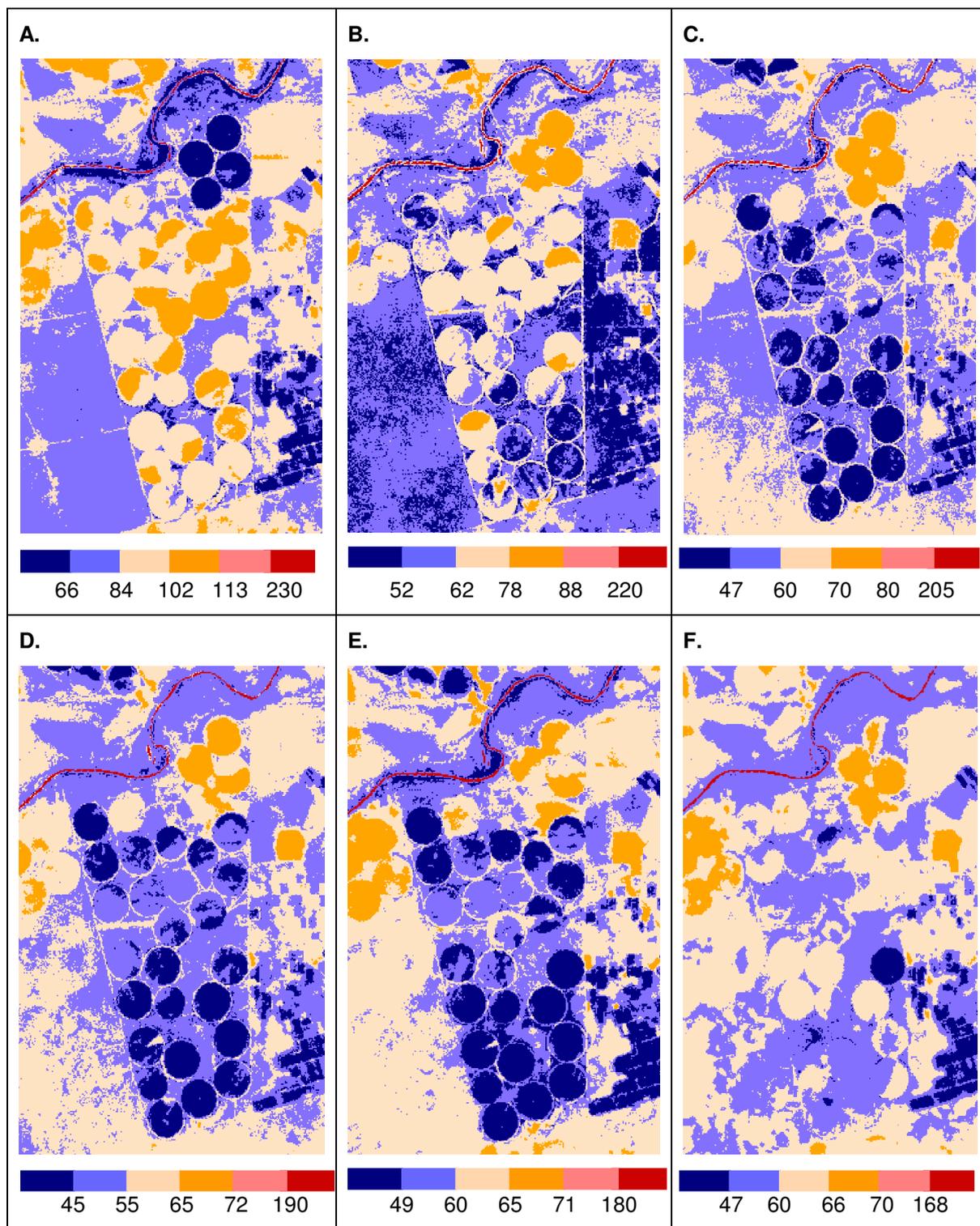


Figura 6. Fluxo de calor no solo – G (W m^{-2}). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

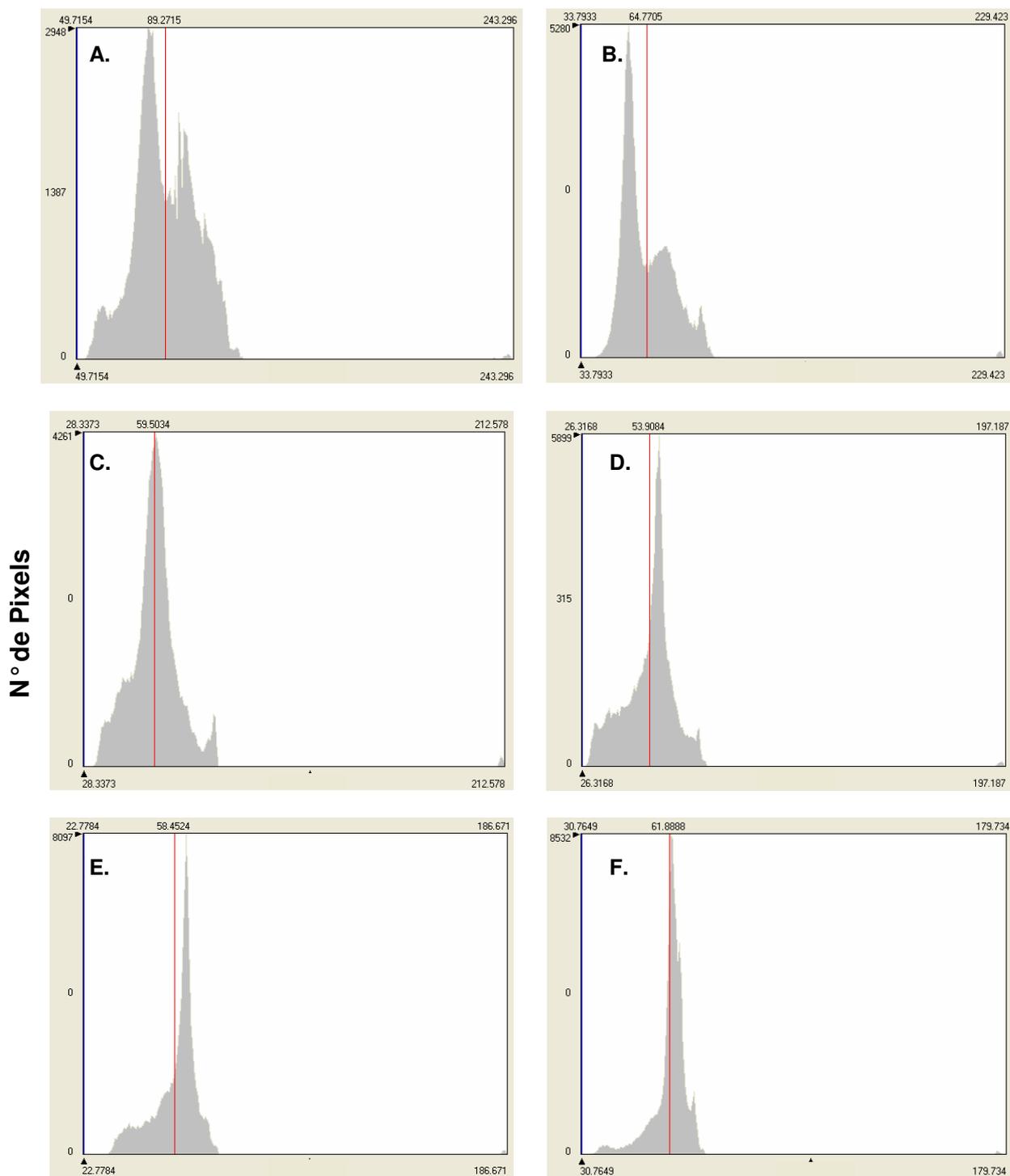


Figura 7. Histograma de frequência do fluxo de calor no solo. A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

O fluxo de calor sensível nos pixels frios foi abaixo de 1 W m^{-2} , e alguns valores negativos foram registrados. Nos pixels quentes, H alcançou valores entre 247 e 465 W m^{-2} . Este resultado aproxima-se dos encontrados em pixels escolhidos como quente por Costa Filho (2005), que registrou $H \approx 475 \text{ W m}^{-2}$ e Chavez et al (2007) com $H = 425,6 \text{ W m}^{-2}$. Bastiaanssen obteve para os pixels frios $H = 1,3$ e $0,9 \text{ W m}^{-2}$ e nos pixels quentes 284,4 e $103,2 \text{ W m}^{-2}$, nos dias 171 e 241, respectivamente.

A diferenças de temperatura (dT) foram computadas pixel a pixel, depois de 17 iterações no dia 196 e 12 interações nos demais dias, de acordo com as equações:

$$dT_{(20)} = -17,02 + 0,68T_s \quad (22)$$

$$dT_{(84)} = -18,13 + 0,80T_s \quad (23)$$

$$dT_{(116)} = -19,56 + 0,90T_s \quad (24)$$

$$dT_{(132)} = -16,06 + 0,80T_s \quad (25)$$

$$dT_{(148)} = -16,72 + 0,80T_s \quad (26)$$

$$dT_{(196)} = -14,55 + 0,66T_s \quad (27)$$

A máxima diferença de temperatura entre a superfície e o ar próximo a ela foi 10,14; 23,34; 10,64; 10,32; 10,88 e 9,35 °C, respectivamente para os dias 20, 84, 116, 132, 148 e 196.

O leito do rio e áreas de solo bem coberto com culturas irrigadas estão representados pela cor azul escuro nas cartas de calor sensível (Figura 8). Como se observa na carta referente ao DDA 20, os pivôs com cultivos da safra passada estão bem destacados, e assim procede com os pivôs cultivados com algodão, durante seu desenvolvimento. Com já esperado, em solo exposto ou com pouca vegetação foram encontrados os maiores resultados para H. Observa-se no DDA 20 que pivôs onde o algodão havia sido plantado há poucos dias (pivôs 15, 17 e 23) apresentaram, predominantemente, H entre 190 e 350 W m^{-2} , enquanto que no DDA 116, H foi no máximo 16 W m^{-2} no algodão. Bastiaanssen (2000) encontrou resultados próximos, reportando de 15 a 34 W m^{-2} de fluxo de calor sensível em algodão irrigado e, para solo descoberto, $H = 80 \text{ W m}^{-2}$. No Deserto de Gobi, China Ma et al. (2004) encontraram fluxo de calor sensível médio de 140

$W m^{-2}$, correspondente a 40% do saldo de radiação, enquanto que em oásis os resultados para H foram entre 60 e 80 $W m^{-2}$, cerca de 13% da radiação disponível.

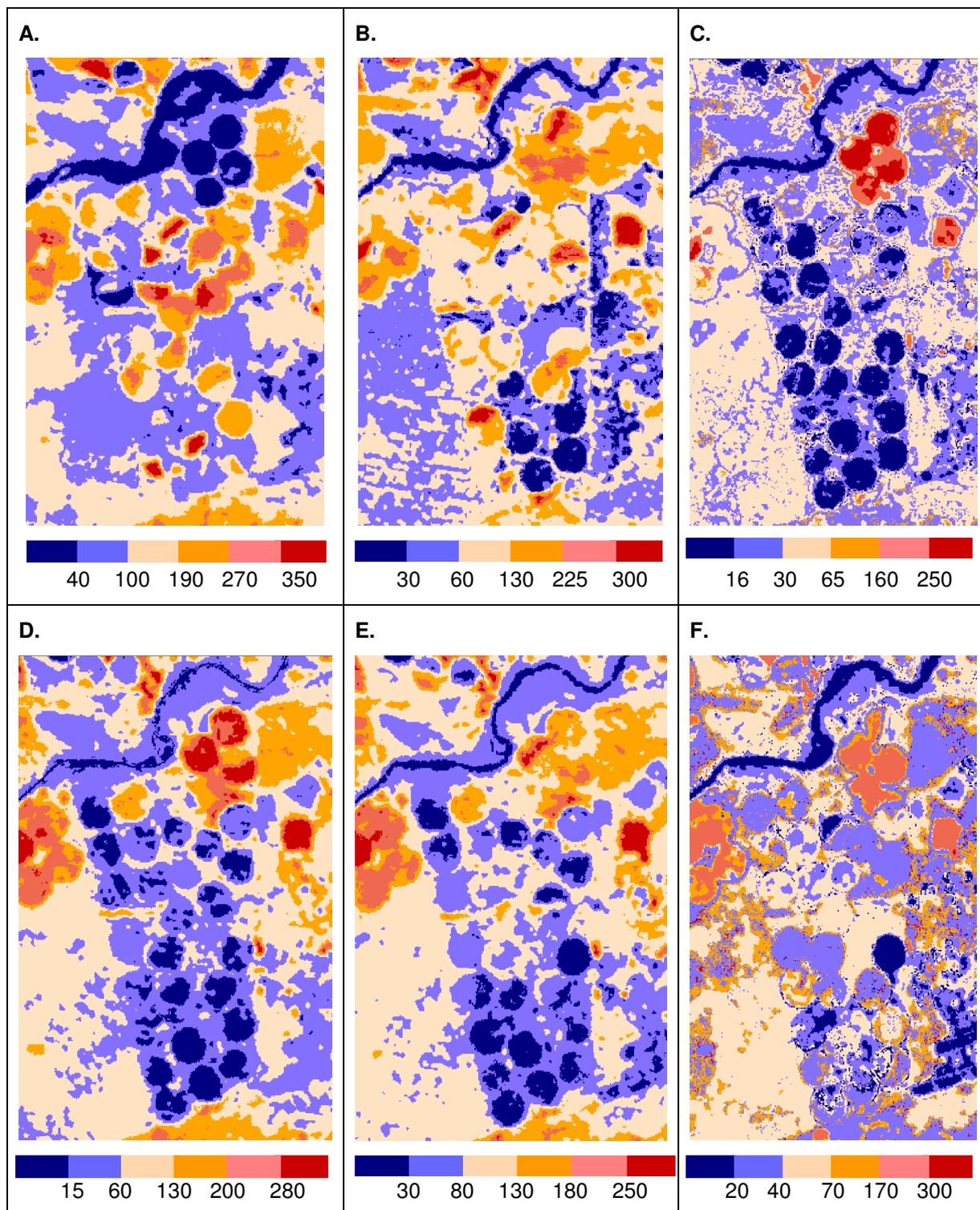


Figura 8. Fluxo de calor sensível – H ($W m^{-2}$). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

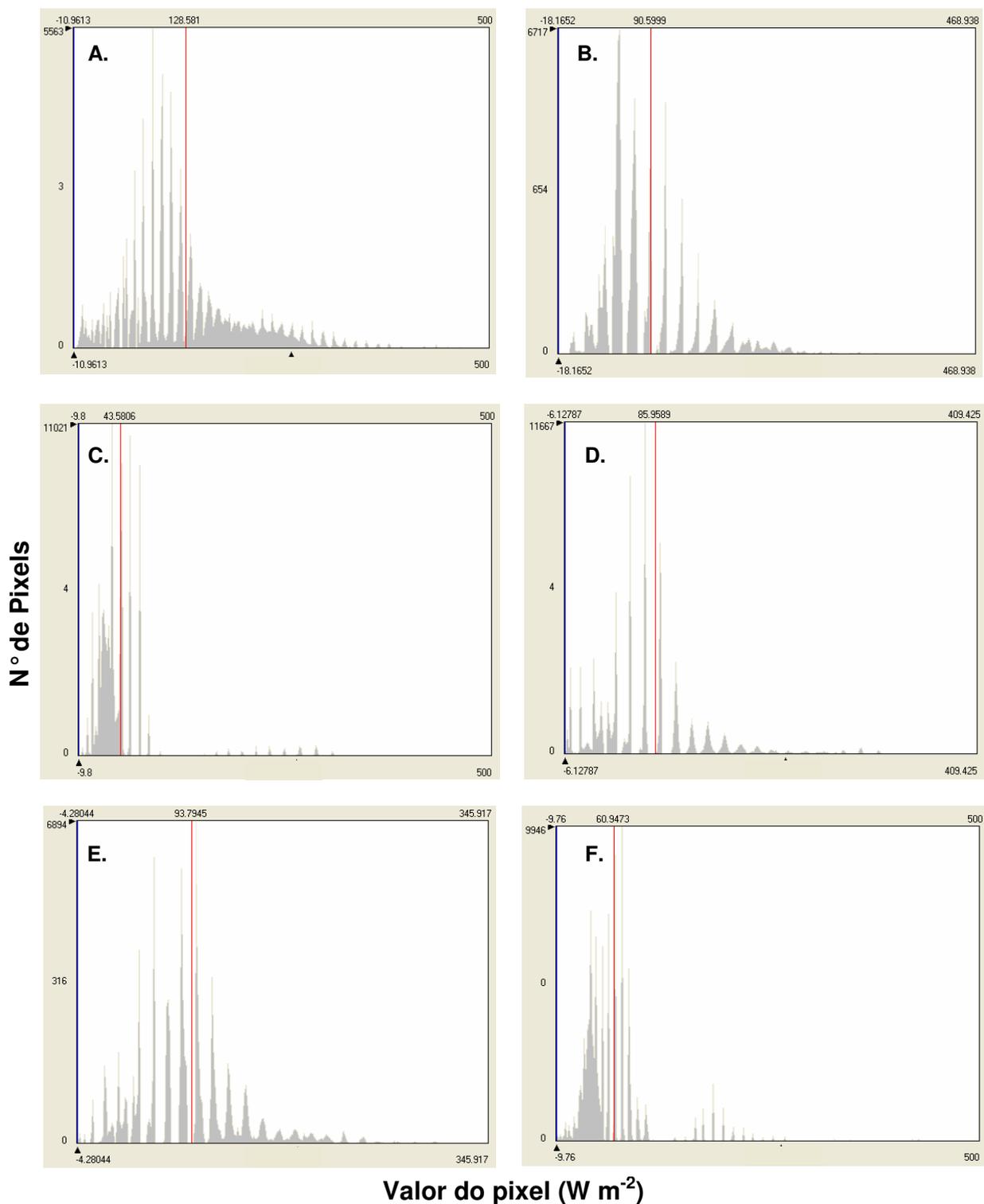


Figura 9. Histograma de freqüência do fluxo de sensível. A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

Os valores extremos de H não sofreram grandes variações entre as datas avaliadas, verificando-se na Figura 9 que os menores resultados estiveram entre -18,2 (DDA 84) e -4,28 W m⁻² (DDA 148) e os mais altos entre 345,9 (DDA) e 500 W m⁻² (DDA 20, 116 e 196). Os valores negativos referem-se à pixels onde a temperatura da superfície foi inferior à temperatura do pixel frio, geralmente o leito do rio, mas ocorrendo também nos pivôs e nas áreas de vegetação natural.

A Figura 10 apresenta as imagens geradas para o fluxo de calor latente (LE). Em comportamento inverso ao fluxo de calor sensível, os maiores resultados de LE foram obtidos na vegetação às margens do rio e nos pivôs de algodão. Nos DDA 116, 132 e 148 o algodoeiro apresentou os mais altos valores para os índices de vegetação utilizados no cômputo da radiação líquida, conforme os resultados apresentados no Capítulo 1. De acordo com os índices de vegetação, a cultura nestas datas apresentava-se com alto grau de cobertura. Nestas condições de desenvolvimento e sob irrigação, o saldo de radiação na área cultivada é dirigido principalmente à evaporação da água, em detrimento dos fluxos para aquecer o solo e o ar.

Os valores de LE estiveram no intervalo aproximado de 450 a 600 W m⁻², com a cultura totalmente desenvolvida no campo, representados pelas cores rosa e vermelho. Em solo descoberto a exemplo da pista de pouso, o fluxo de calor latente esteve abaixo de 200 W m⁻², conforme reportado por Ma et al (2004), com LE = 130 W m⁻² em região desértica. Para áreas com pouca vegetação LE esteve entre 100 e 350 W m⁻², como observa-se nos pivôs em pousio durante todo ciclo. Outros autores registram LE respectivamente para solos descobertos ou com vegetação rala e para áreas irrigadas de: 50 e 550 W m⁻² (Bezerra, 2006); menores que 104 W m⁻² e entre 588 e 633 W m⁻² (Costa Filho, 2005); 229,1 e 408,4 W m⁻² (Silva e Bezerra, 2005).

Em algodão irrigado, Moran et al. (1989), combinando imagens TM Landsat 5 e dados meteorológicos, obtiveram valores de 650 W m⁻². Com medições na superfície do fluxo de calor latente em algodoeiro após ser irrigado, Rodrigues (2003) encontrou LE = 580 W m⁻² em ambiente semi-árido. Os resultados de ambos autores assemelham-se aos registrados no presente trabalho.

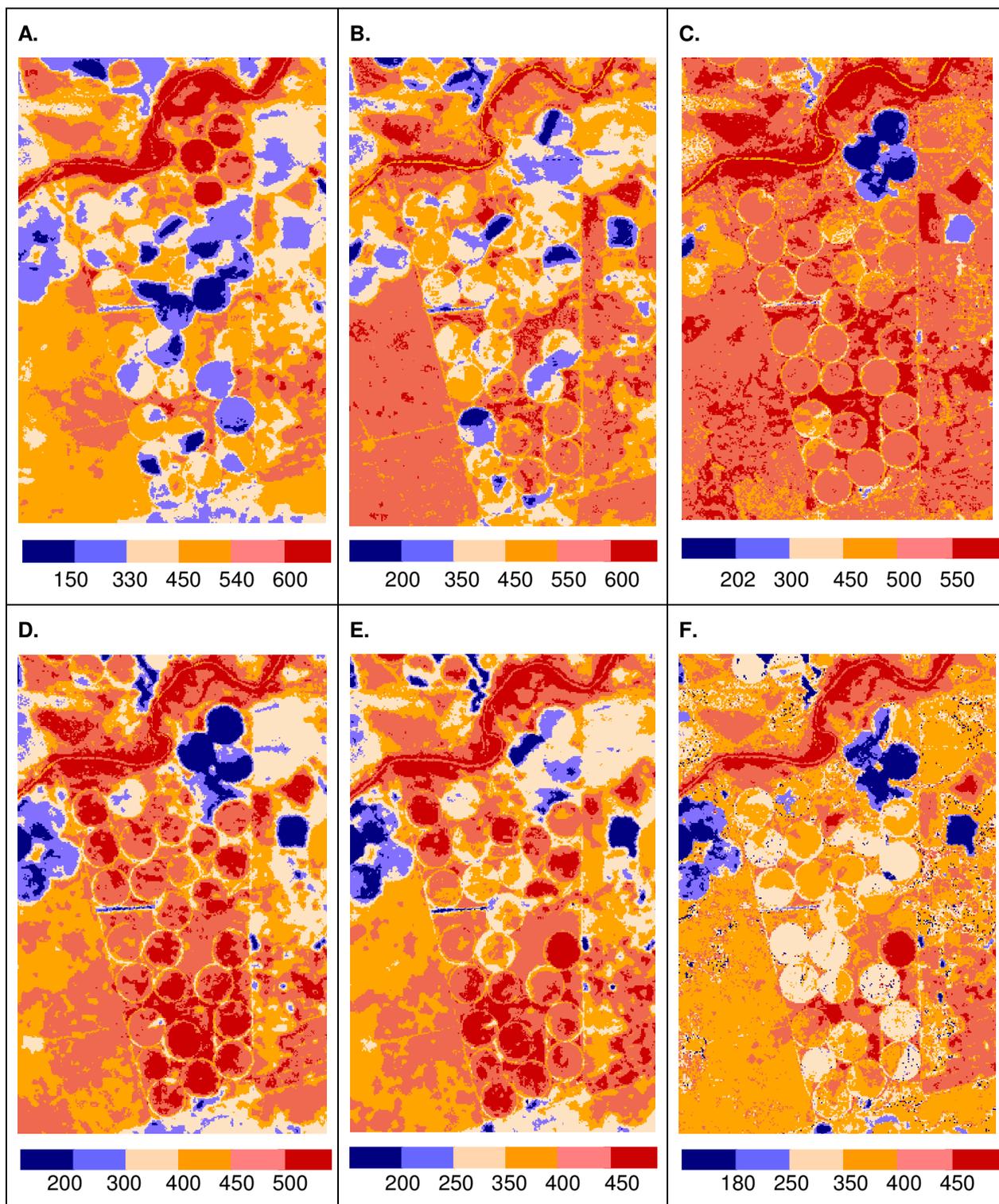


Figura 10. Fluxo de calor latente - LE ($W m^{-2}$). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

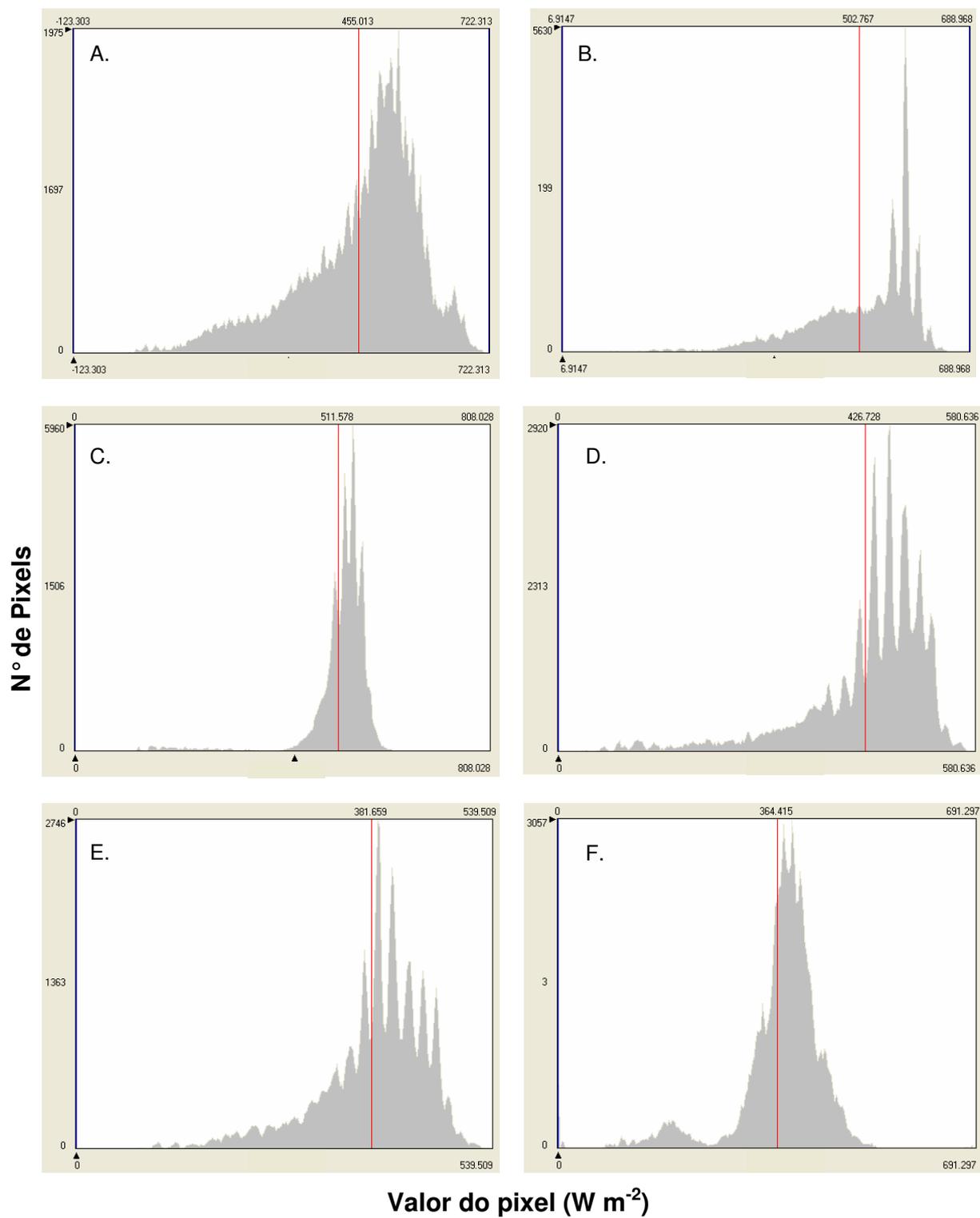


Figura 11. Histograma de freqüência do fluxo de latente. A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

No pixel quente fluxo de calor latente variou de $6,18 \text{ W m}^{-2}$ no DDA 196 a $155,13 \text{ W m}^{-2}$ no DDA 20. Para o pixel frio encontrou-se valores entre 456 e 650 W m^{-2} . Resultados de Costa Filho (2005) constataram LE de aproximadamente 0 e 620 W m^{-2} , nos pixels quente e frio. No trabalho de Bastiaansseen (2000) o valor de LE no pixel quente e frio para o dia 26 de junho foi de $0,5 \text{ W.m}^{-2}$ e $535,4 \text{ W m}^{-2}$, enquanto que para o dia 29 de agosto os valores encontrados foram de 0 e $337,3 \text{ W m}^{-2}$.

Dados mais freqüentes de calor latente posicionaram-se próximos à média, exceto nos dias 20 e 84 (Figura 11). A maior freqüência de valores nos dias 20, 148 e 196 refere-se às áreas de vegetação natural, representadas nas cartas das referidas datas pela cor laranja. Nos dias restantes, as modas de maior freqüência correspondem à superfícies de vegetação natural e dos pivôs com algodão, em cor rosa nas cartas de fluxo de calor latente.

A evapotranspiração diária originada pelo SEBAL (ET_S) é mostrada na Figura 12. Pixels de superfície descoberta ou com pouca vegetação alcançaram até 6 mm dia^{-1} , como observado nos pivôs em pousio no dia 84 e nos pivôs localizados ao norte, na imagem do dia 20, quando não haviam sido semeados. Após o dia 84, a as máxima registradas em superfícies com pouca cobertura vegetal foram 4 e 5 mm (pivôs em pousio e pista de pouso, por exemplo). A vegetação natural apresentou ET_S entre 6 e 8, predominantemente. Nos pivôs cultivados com algodão, a ET_S variou de 2 a 9 mm dia^{-1} ; entretanto, o intervalo mais freqüente foi 6 a 7 mm dia^{-1} , conforme observa-se nas cores rosa e vermelha predominantes nas cenas.

Para melhor análise dos fluxos não-radiativos e da evapotranspiração durante o ciclo do algodoeiro, fez-se um recorte do pivô 17 com cerca de 440 pixels, garantindo apenas superfície cultivada com algodão. A data de plantio do pivô 17 foi no DDA 11 e sua colheita no DDA 200, motivo pelo qual foi escolhido, pois todo seu ciclo foi contemplado no intervalo entre a primeira e a última imagem adquirida. Pelo fato da aplicação do SEBAL requerer imagens em condições de céu claro, não foi possível realizar-se um exame mais apurado do desenvolvimento da cultura e suas necessidades hídricas, mediante a determinação dos fluxos de calor à superfície. Para tal, seria necessário a aquisição de ao menos uma imagem por mês, de forma que os resultados poderiam ser melhor adequados às fases fenológicas da cultura.

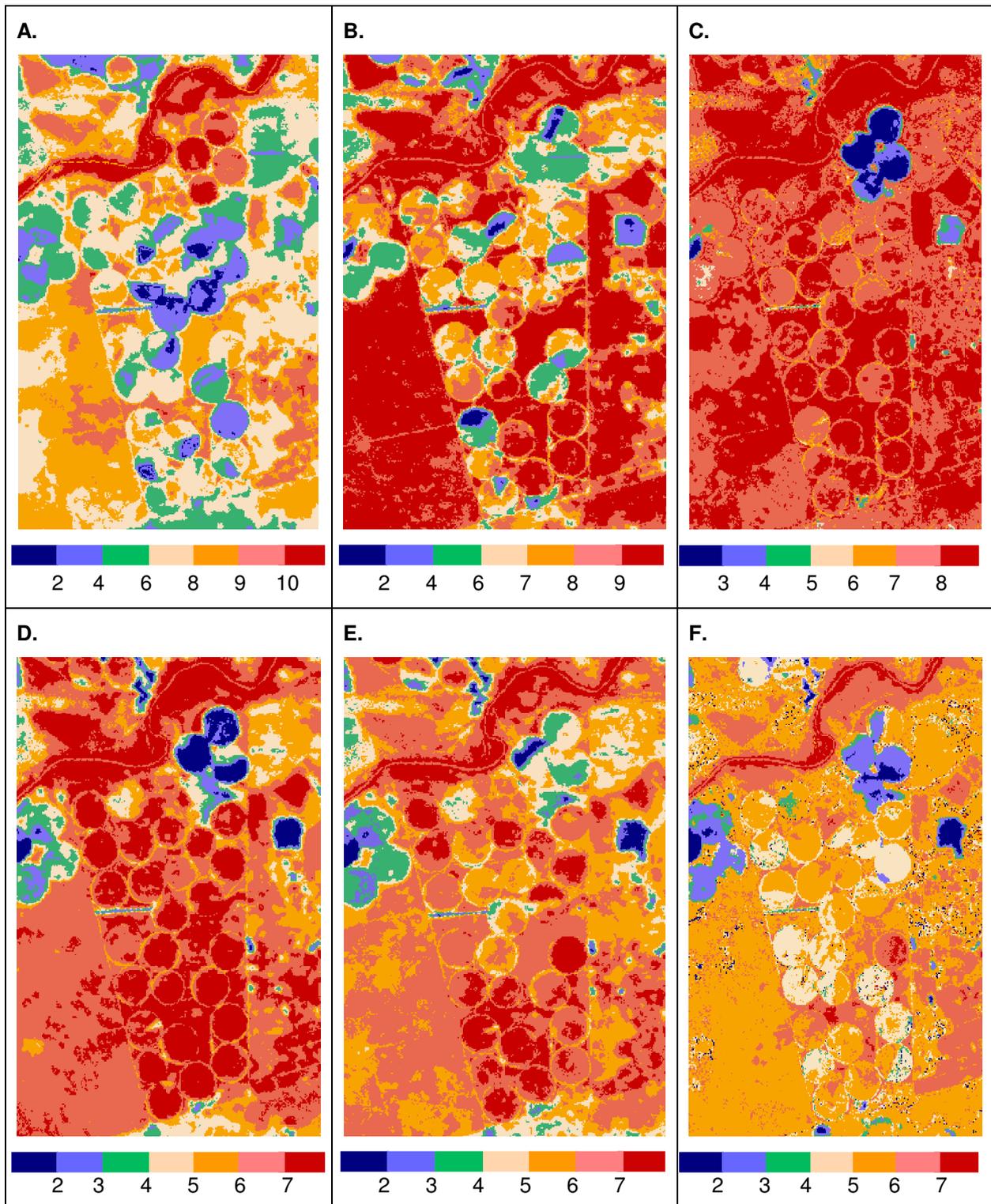


Figura 12. Evapotranspiração diária - ET (mm dia^{-1}). A: DDA 20; B: DDA 84; C: DDA 116; D: DDA 132; E: DDA 148 e F: DDA 196 do ano de 2007.

Na tabela A2, disponível nos Anexos, encontram-se os dados estatísticos de saldo de radiação, calor sensível, calor no solo, calor latente e evapotranspiração para o recorte realizado no pivô 17. O coeficiente de variação no DDA 20 foi alto (>40%) tanto para o fluxo de calor sensível quanto para o calor latente, provavelmente porque a superfície apresentava-se bastante heterogênea, com estande variável entre plantas já estabelecidas e outras ainda em fase de plântula. A partir dos outros dias, com o crescimento da cultura, o fluxo de calor latente passa a variar menos, enquanto que para o fluxo de calor sensível foram registrados CV acima de 100%. Estas discrepâncias ocorrem principalmente pela presença de pixels com $H < 0$, que podem ocorrer quando a temperatura da superfície destes pixels for menor que a temperatura do pixel escolhido como frio. Outra justificativa pode ser a contribuição de calor sensível trazido em massas de ar sobre o dossel vegetal. Chavez et al. (2007), determinando a evapotranspiração em áreas com condições de advecção de calor sensível, encontraram no pixel frio escolhido (área de milho irrigado), calor sensível negativo, explicando esse resultado pela hipótese de que a temperatura do ar era superior à temperatura do dossel, significando aporte extra de calor sensível ao local. No presente trabalho condições advectivas de calor sensível são possíveis, pois a propriedade está situada em uma região de clima semi-árido e há uma grande área não irrigada próxima dos seus limites. Nos DDA 132 e 196, H apresentou valores mínimos negativos e, no momento e passagem do satélite, os vento foi de direção Sul, partindo de uma região de solo descoberto.

A Figura 13 mostra as variações do saldo de radiação e dos fluxos durante o ciclo do algodoeiro. O fluxo de calor latente acompanhou o crescimento da cultura, registrando ápice nos dias 116 e 132, quando também foram registrados os maiores resultados para os índices de vegetação (Capítulo 1). Entre 60 e 190 dias após o plantio eventos diversos ocorrem ao mesmo tempo na planta, havendo lançamento de flores, maçãs e posteriormente, abertura de capulhos (GRIMES e EI-ZINK, 1990). De acordo com Rosolem (2001), nesta fase as plantas atingem o máximo de área foliar e acentua-se a demanda por água e, segundo Doreenbos e Kassam (1979), a planta consome em torno de 50 a 60% de toda água requerida no ciclo.

Nos dias 116 e 132 a percentagem de LE em relação a R_n foi 90%, concordando com Bastiaansen (2000), que registrou, em dossel de algodão

irrigado com alto grau de cobertura do solo, de 70 a 90% da energia líquida destinada para evaporação de água. Segundo o referido autor, a fração evaporativa pode ser considerada um método para indicar as condições de umidade da zona radicular e de suprimento hídrico da cultura, visto que antes da estação irrigada, as plantas de algodão apresentavam cobertura parcial do solo e a fração evaporativa nestas condições foi 40% de Rn. Os resultados aqui encontrados apontaram para 45,2% a percentagem de LE 12 dias após o plantio.

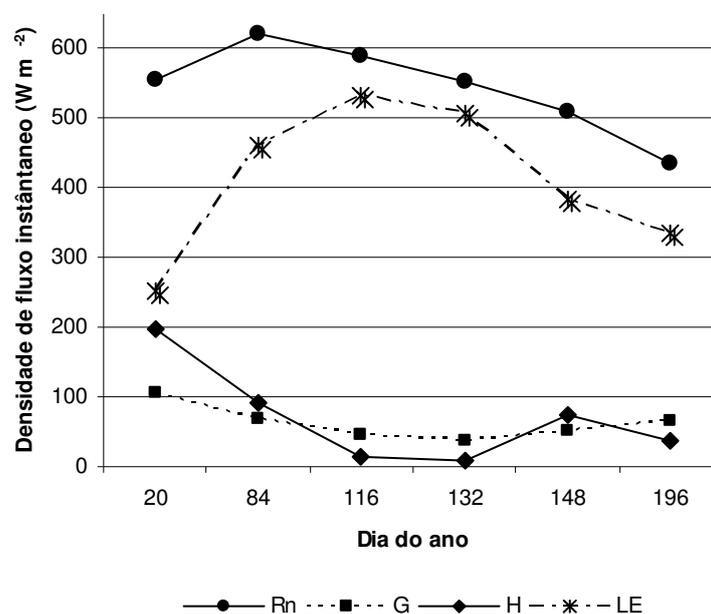


Figura 13. Valores médios dos fluxos de calor no solo (G), calor sensível (H), calor latente (LE) e saldo de radiação (Rn) para o pivô 17, no instante de passagem do satélite.

O fluxo de calor no solo não apresentou grandes mudanças, obtendo-se percentagens entre 7 e 19%, esta última 12 dias depois do plantio. O fluxo de calor sensível foi inferior ao fluxo de calor no solo nos dias 116 e 132, provavelmente pelas hipóteses já apresentadas, devido à condições advectivas de calor sensível ou por apresentar temperatura de superfície inferior à encontrada no pixel frio de mesma data. Observa-se que a depressão na curva de H equivale exatamente ao pico da curva de LE, que por ser resíduo da equação do balanço de energia, acumula os erros de estimativas, ou no caso de aporte de calor sensível fica demonstrado a energia excedente para evapotranspiração. Os percentuais de H estiverem em torno de 35% no dia 20, 2% nos dias 116 e 132,

14% nos dias 84 e 148, voltando a decrescer no dia 196, contabilizando apenas 8% do saldo de radiação. Para algodão irrigado, em fase de máximo desenvolvimento, Bastiaanssen (2000) obteve dados semelhantes, com percentuais de H e G de 12 e 11%, respectivamente. Na mesma área, quando as plantas estavam em desenvolvimento, sem suprimento da irrigação, estes fluxos representaram 51 e 22% do saldo de radiação. Kustas (1990), com observações micrometeorológicas, encontraram para algodão, com 20% de cobertura vegetal os seguintes resultados: LE = 54%, H = 21% e G = 25% do saldo de radiação.

A evapotranspiração calculada para escala diária e na hora de passagem do satélite é apresentada na Tabela 4, juntamente com a média da evapotranspiração estimada pelo SEBAL para pivô 17.

Tabela 4. Evapotranspiração de referência horária (ET_{o_h}) e diária (ET_{o_d}); evapotranspiração empregada na Fazenda Busato (ET_{Busato}); e evapotranspiração estimada pelo SEBAL (ET_{SEBAL}) no pivô 17, em mm.

DDA	ET_{o_h}	ET_{o_d}	Kc^1	ET_{Busato}	ET_{SEBAL}
20	0,669	6.32	0,8	5,06	3,49
84	0,619	5.47	0,8	4,38	5,97
116	0,570	4.82	1,15	5,54	6,60
132	0,496	4.12	1,15	4,74	6,19
148	0,502	4.28	1,15	4,92	4,82
196	0,461	3.93	0,6	2,36	4,18

¹Kc recomendado para algodão 'Delta Opal' pelo programa computacional utilizado no manejo da irrigação na Fazenda Busato.

De acordo com os estágios fenológicos do algodoeiro descritos por Grimes e El-Zink (1990) e Oosterhuis (1999), no dia 20 as plantas estariam em fase de estabelecimento em campo, ainda sem as estruturas vegetativas completas. A evapotranspiração devia-se, portanto, mais à evaporação de água do solo do que pela transpiração das plantas. No dia 84, a planta já teria alcançado o ápice do desenvolvimento vegetativo, e estaria lançando flores. Entre os dias 116 e 132, além do surgimento das flores, estariam ocorrendo conjuntamente a formação e desenvolvimento das maçãs, bem como abertura de capulhos. Durante estes eventos, a evapotranspiração da cultura estimada pelo SEBAL atingiu o máximo de todo ciclo, conforme também afirmam Doreenbos e Kassam (1979) e Rosolem

(2001). Na fase final, compreendendo abertura dos capulhos à colheita, a necessidade hídrica da cultura caiu, pois o principal processo que ocorre na planta é a translocação de fotossintatos para o produto comercial, sendo interessante a suspensão do fornecimento de água, com objetivo de facilitar a desfolhação e evitar perda de qualidade das fibras.

Conrad et al. (2007) reportou resultados bastante concordantes em cultivos de algodão na Ásia Central. No estágio inicial da cultura a evapotranspiração esteve entre 1,5 e 2,0 mm dia⁻¹; na fase de crescimento vegetativo entre 2,5 e 5,0 mm dia⁻¹; atingiu a máxima demanda (em torno de 6,5 mm dia⁻¹) com a planta em total desenvolvimento; e na colheita, 2 mm dia⁻¹. A evapotranspiração obtida pelo SEBAL, em campo de algodão irrigado com pleno desenvolvimento, foi em torno de 6,0 mm dia⁻¹, segundo assinalam Bezerra (2006) e Nagler et al (2005) e 7,0 mm dia⁻¹, conforme Payan e Watts (2007). Em cultivos de algodão na Califórnia e no Arizona, Grimes e El-Zik (1990) encontram evapotranspiração de 3,3 e 4,8 mm dia⁻¹ quando da abertura das primeiras flores. Com o solo completamente coberto pelo solo, a ET observada na Califórnia e no Arizona foi, respectivamente, 8,1 e 9,6 mm dia⁻¹. Para algodão irrigado no Texas, sob condições advectivas de calor sensível, Chavez et al. (2000) obteve evapotranspiração diária de 6,1 mm dia⁻¹, com plantas em estágio parcial de desenvolvimento.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho com o SEBAL são compatíveis com informações reportadas na literatura para a cultura do algodão nas diferentes fases fenológicas. Verificou-se na fase inicial do ciclo os seguintes valores aproximados para os fluxos não radiativos: $G = 113 \text{ W m}^{-2}$, $H = 350 \text{ W m}^{-2}$ e $LE = 330 \text{ W m}^{-2}$. Para condições de pleno desenvolvimento da cultura foram registrados $G = 60 \text{ W m}^{-2}$, $H = 16 \text{ W m}^{-2}$, e LE entre 450 e 600 W m^{-2} , ocasião na qual representava cerca de 90% do saldo de radiação. Valores médios de ET foram $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$ durante o estabelecimento da cultura em campo, $6,6 \text{ mm dia}^{-1}$ na floração e $4,2 \text{ mm dia}^{-1}$ no período de abertura dos capulhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56**, 1998. 300p.
- ALLEN, R. G., TREZZA, R.; TASUMI M. **Surface energy balance algorithms for land**. Advance training and users manual, version 1.0, 98 p., 2002.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. SanDiego: Academic Press, 1988. 307 p.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 1995, 273p.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A. & HOLTSLAG, A. A. M. A. Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

BEZERRA, B. G. balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL. 127f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2006.

BORGES, P. F. Crescimento, Desenvolvimento e Balanço de Radiação do Algodoeiro Herbáceo BRS – 201 em Condições Irrigadas. 87f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2002.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the Atmosphere**, D-Reidel, Norwell, Mass., 299p. 1982.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, v. 41, p. 2674-2677, 2003.

CHANDRAPALA, L.; WIMALASURIYA, M. Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. **Agricultural water management**, v. 58, p. 89-107, 2003.

CHAVEZ, J. L. ; GOWDA, P. H. ; HOWELL, T. A.; MAREK, T. H.; NEW, L. L. Evapotranspiration mapping using METRIC™ for region with highly advective conditions. In.: 2007 ASABE Annual International Meeting. **Anais...** Minneapolis: ASABE, 2007.

CONRAD, C.; DECH, S. W.; HAFEEZ, M.; LAMERS, J.; MARTIUS, C.; STRUNZ, G. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 21, n. 3-4 , p. 197-218, dez, 2007.

CONSOLI, S. ; D'URSO, G. ; TOSCANO, A. Remote sensing to estimate ET-fluxes and the performance os an irrigation district in southern Italy. **Agricultural water management**, v. 81, p. 295-314, 2006.

COSTA FILHO, J. F. Avaliação dos componenteS do balanço de energia e evapotranspiração em uma região semi-árida usando imagens orbitais Landsat-5 TM e Terra-Modis. 141f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2005.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yeld response to water. **Irrigation and drainage paper 33**. Roma: FAO, 1979. 193 p.

GRIMES, Q. W.; EL-ZIK, K. M. Cotton. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American society of agronomy / Crop science society of America / Soil science society of America, p 741-773, 1990. Agronomy monograph n° 30.

KUSTAS, W. P. Estimates of evapotranspiration with a one-and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. **Journal of applied meteorology**, v. 29, p. 704-715, 1990.

MA, Y-m; MENENTI, M.; TSUKAMOTO, O.; ISHIKAWA, H; WANG, J-m; GAO, Q-z. Remote sensing parameterization of regional land surface heat fluxes over arid

area in Northwestern China. **Journal of arid environments**, v. 57, p. 117-133, 2004.

MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; RAYMOND, L. H. GAY, L. W. SLATER, P. N. Mapping Surface Energy Balance Components by Combing Thematic Mapper and Ground-Based Meteorological Data. **Remote sensing of environment**. v. 30, p.77-87, 1989.

MORSE, A., ALLEN, R. G., TASUMI, M., KRAMBER, W. J., TREZZA, R.; WRIGHT, J. Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing. **Final Report**, 220 p, 2001.

NAGLER, P.L.; SCOTT, R.L.; WESTENBURG, C.; CLEVERLY, J.R.; GLENN, E.P.; HUETE, A.R. Evapotranspiration on Western U.S. Rivers Estimated Using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and Data from Eddy Covariance and Bowen Ratio Flux Towers. **Remote Sensing of the Environment**, v. 97, p. 337-351, 2005.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of a cotton plant. In: CIA, E. Et al. **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafos, 1999. 286 p.

PAYAN, J. G.; WATTS, C. J. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 301–320, 2005.

REETZ, E. et al. Verdadeiros especialistas. In: editores. **Anuário brasileiro de algodão 2006**. Santa Cruz do Sul: Gazeta, 2006. 144 p.

RODRIGUES, M. F. G. Necessidades Hídricas, Crescimento e Desenvolvimento do Algodoeiro, cultivar BRS 201. 132f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2003.

ROSOLEM, C. A. **Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro**. Potafos: Piracicaba, 2001. 24 p. (Informações agronômicas n° 95)

SEI. **Atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador: SEI, 1998. 85 p. Série Estudos e Pesquisas, n° 38.

SEI. **Informações geo-ambientais**. Disponível em: http://www.sei.ba.gov.br/geoambientais/index_geoamb_infogeo.htm?tmp.codpai=gr1&tmp.pesquisa=false%20. Acessado em: julho de 2007.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005a.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM – Landsat 5. **Revista brasileira de agrometeorologia**, v. 14, p. 174-186, 2006.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005b.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entre as potencialidades do SEBAL está a viabilidade de determinar a demanda hídrica das culturas englobando aspectos reais da vegetação em condições de campo. O emprego para manejo de irrigação é ineficiente devido unicamente à resolução temporal dos satélites mais comumente utilizados, que não permitem a aquisição de imagens diariamente. Outra carência do método é a necessidade de imagens sem nuvens, o que no caso deste trabalho, limitou a análise mais detalhada do desenvolvimento do algodão, suprimindo informações que poderiam ser mais bem definidas em intervalo menor de tempo. Entretanto, sua aplicabilidade em grande escala, no manejo de bacias hidrográficas, é bastante interessante, possibilitando investigação dos componentes da paisagem, gerando informações úteis na gestão e alocação de recursos hídricos.

A continuidade de pesquisas semelhantes com algodão ou outras culturas deve incluir determinações em campo da evapotranspiração e dos fluxos não radiativos por métodos independentes, com intuito de validar as estimativas geradas pelo SEBAL. Recomenda-se também a avaliação de parâmetros biofísicos da vegetação em campo, para melhor identificar os eventos que caracterizam as fases fenológicas, bem como o estado da lavoura, em termos de fitossanidade, suprimento de água, entre outros.

ANEXOS

Tabela A1. Caracterização do pixel quente (PQ) e do pixel frio (PF) escolhido em cada data. T: temperatura, Rn: saldo de radiação, G: fluxo de calor no solo; α : albedo da superfície, NDVI: índice de vegetação da diferença normalizada, SAVI: índice de vegetação ajustado para o solo, IAF: índice de área foliar.

DDA		Latitude	Longitude	T (K)	Rn ($W m^{-2}$)	G ($W m^{-2}$)	H($W m^{-2}$)	LE($W m^{-2}$)	α (%)	NDVI	SAVI	IAF
20	P Q	13° 14' 40,78" S	43° 42' 5,96" W	312,79	518,52	116,43	246,96	155,13	0,25	0,13	0,12	0,04
	P F	13° 12' 32,89" S	43° 42' 1,31" W	298,00	703,89	55,01	-0,91	649,79	0,15	0,78	0,69	6,00
84	P Q	13° 16' 13,23" S	43° 38' 18,41" W	307,99	588,08	101,33	465,08	21,67	0,15	0,14	0,11	0,02
	P F	13° 16' 11,47" S	43° 42' 08,62" W	295,8	631,43	39,36	-0,44	592,51	0,19	0,83	0,77	6,00
116	P Q	13° 17' 31,86" S	43° 32' 31,88" W	306,75	521,19	89,83	414,20	17,33	0,18	0,15	0,13	0,06
	P F	13° 16' 36,58" S	43° 41' 57,55" W	294,91	584,95	36,00	0,18	548,76	0,18	0,82	0,76	6,00
132	P Q	13° 13' 08,72" S	43° 35' 11,49" W	305,94	539,97	79,43	438,25	22,29	0,07	0,07	0,04	0,00
	P F	13° 16' 58,29" S	43° 41' 58,07" W	293,11	545,17	31,89	-0,93	514,21	0,18	0,81	0,75	6,00
148	P Q	13° 13' 13,07" S	43° 35' 17,70" W	307,59	520,21	78,36	420,96	20,89	0,08	0,03	0,02	0,00
	P F	13° 15' 16,94" S	43° 41' 49,18" W	294,01	521,76	33,64	0,00	488,12	0,18	0,80	0,73	6,00
196	P Q	13° 15' 17,03" S	43° 38' 21,67" W	309,62	422,28	75,90	340,20	6,18	0,15	0,12	0,10	0,00
	P F	13° 16' 22,50" S	43° 42' 45,17" W	295,36	491,78	34,57	0,80	456,42	0,17	0,79	0,72	6,00

Tabela A2. Dados estatísticos do saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor latente (LE) e evapotranspiração (ET) obtidos em recorte do pivô 17.

DDA	Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Moda	Desvio padrão	CV
20	Rn	511,08	649,63	556,53	554,92	580,35	25,54	4,59
	G	94,89	113,53	106,11	108,43	111,06	5,95	5,61
	H	58,63	322,07	197,70	218,14	256,21	85,52	43,26
	LE	86,86	443,71	251,32	233,22	135,65	110,88	44,12
	ET	1,2063	6,16	3,49	3,24	1,88	1,54	44,13
84	Rn	551,88	665,34	620,77	619,69	622,35	14,28	2,30
	G	52,04	80,31	68,38	69,16	69,71	5,32	7,78
	H	31,83	144,95	92,21	88,39	88,39	25,70	27,87
	LE	369,68	571,34	460,18	455,54	428,76	41,84	9,09
	ET	4,80	7,41	5,97	5,91	5,56	0,543	9,09
116	Rn	517,57	603,20	589,85	589,48	589,73	5,10	0,86
	G	36,19	59,26	44,99	44,93	45,56	3,63	8,07
	H	0,18	38,98	13,64	15,04	6,70	7,41	54,33
	LE	481,66	555,70	531,22	531,12	544,42	12,99	2,45
	ET	5,99	6,91	6,60	6,60	6,76	0,16	2,42
132	Rn	531,16	565,96	553,88	553,86	558,89	5,33	0,96
	G	30,98	51,64	37,21	37,27	37,44	2,44	6,56
	H	-2,31	59,02	9,67	8,48	-1,11	11,54	119,34
	LE	426,19	530,07	507,00	511,00	518,71	15,81	3,12
	ET	5,21	6,47	6,19	6,24	6,34	0,19	3,07
148	Rn	490,01	528,78	510,46	510,31	510,16	6,06	1,19
	G	40,90	57,98	51,20	51,78	50,98	3,30	6,45
	H	42,02	117,47	74,57	73,85	87,99	14,96	20,06
	LE	329,13	437,46	385,06	384,99	409,95	22,12	5,74
	ET	4,12	5,48	4,82	4,82	5,13	0,28	5,81
196	Rn	400,41	464,47	436,56	435,7	435,44	8,79	2,01
	G	64,84	67,63	66,09	66,06	65,59	0,55	0,83
	H	-9,76	500	37,61	34,04	36,04	39,35	104,63
	LE	0	633,72	334,06	334,19	336,67	34,11	10,21
	ET	0	7,93	4,18	4,18	4,21	0,43	10,29

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)