

DINÂMICA DO BALANÇO DE ENERGIA SOBRE O AÇUDE ORÓS E SUAS ADJACÊNCIAS¹

FRANCISCO DIRCEU DUARTE ARRAES^{2*}, EUNICE MAIA DE ANDRADE³, BERNARDO BARBOSA DA SILVA⁴

RESUMO - Este trabalho investiga a dinâmica das componentes do balanço de energia no açude Orós e suas adjacências, pelo emprego do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL, bem como faz uma análise da relação existente entre o albedo, o NDVI, o saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxos de calor sensível e latente. Foram estudados os seguintes usos do solo: Vegetação nativa densa, Irrigação e Antrópica (áreas degradadas). Foram utilizadas oito imagens do LANDSAT 5 – TM, cedidas pelo INPE, referentes à órbita/ponto 217/ 64, para os dias 24/08/1992, 14/08/1994, 02/07/1996, 11/07/1999, 17/08/2001, 06/07/2003, 14/07/2006 e 20/08/2008. As referidas imagens foram processadas utilizando o software Erdas IMAGINE 9.0. Em seguida foi aplicado o algoritmo SEBAL para se quantificar o fluxo de calor latente a partir do balanço de energia da superfície que tem como componentes o saldo de radiação (Rn), o fluxo de calor no solo (G) e o fluxo de calor sensível (H). As energias na forma de calor sensível e latente apresentaram tendências similares nas áreas de vegetação nativa densa e irrigada, sendo os maiores aumentos do calor sensível registrados nas últimas três imagens na área antropizada. Todas as componentes do balanço de energia analisados apresentaram respostas distintas para os diferentes usos do solo, expressando que o balanço de energia pode ser aplicado para detecção de mudanças de padrões de uso da terra.

Palavras-chave: Uso da terra. SEBAL. Sensoriamento remoto.

DYNAMIC OF ENERGY BALANCE OVER ORÓS RESERVOIR AND NEIGHBORING AREAS

ABSTRACT - This paper aimed to investigate the dynamic of energy balance components over Orós reservoir and neighboring areas using Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and TM-Landsat 5 images. Also, the relation among albedo, NDVI, net radiation, sensible and latent heats and soil heat flux were analysed. The studied land uses were: Dense vegetation, irrigation fields and degraded areas (human activities). Eight images of 217/64, orbital/point, for the following data: 08/24/1992, 08/14/1994, 07/02/1996, 07/11/1999, 08/17/2001, 07/06/2003, 07/14/2006 e 08/20/2008 were used. The images were processed using the software Erdas IMAGINE using 9.0IMAGE. The SEBAL algorithm was applied to quantify the latent heat flux from the surface energy balance, which is composed of net radiation (Rn), soil heat flux (G) and sensible heat flux (H). The energy in form of sensible and latent heat showed similar tendencies for irrigated fields and dense native vegetation. The highest increase of sensible heat was registered on the degraded areas (human activities) in the last three years. All of the components of the energy balance presented distinct tendencies over the studied land use, expressing that the energy balance can be used to identify the changes on the land use pattern.

Keywords: Land use. SEBAL. Remote Sensing.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 25/12/2010; aceito em 23/08/2011.

Parte da dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola do primeiro autor.

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Departamento Engenharia de Biosistemas, ESALQ-USP, av. Pádua Dias 11, Agronomia, CEP 13418-900, Piracicaba - SP; dirceuarraes@usp.br

³Departamento de Engenharia Agrícola, CCA/UFC, Caixa Postal 12168, 60455970, Fortaleza – CE; eandrade@pq.cnpq.br

⁴Departamento de Ciências Atmosféricas, CTRN/UFCG, Caixa Postal 10041, 58429-140, Campina Grande – PB; bernardo@dca.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Em escala global, as mudanças nos padrões de uso da terra e na cobertura vegetal estão ocorrendo em passos acelerados, sobretudo nos trópicos. Tais mudanças nos ecossistemas terrestres estão fortemente associadas aos processos de desenvolvimento socioeconômico, principalmente em países subdesenvolvidos, onde não se encontram planejamentos para a ocupação do território, nem projetos e estudos para explorar de maneira sustentável os recursos naturais.

No Brasil, o processo de exploração agropecuária constitui a maior força de alteração da paisagem. Com a expansão das fronteiras agrícolas no Brasil, estudos sobre as mudanças nos padrões de uso e cobertura do solo têm despertado interesse, tanto dentro do meio científico como de agências governamentais e organizações não governamentais, devido ao acelerado processo de mudança das últimas décadas e aos possíveis impactos ambientais e sócio-econômicos dessas mudanças, que causam preocupações desde o nível local até o global (VALENTE; VETTORAZZI, 2002; AMARAL et al., 2009).

Tradicionalmente, o levantamento e a qualificação dos fatores de uso e ocupação das terras são dificultados por demandarem fluxos expressivos de informações, que requerem alocação, detalhamentos, organização, interpretação e, principalmente, armazenamento adequado que assegure a confiabilidade do banco de dados geográficos (BOLFE et al., 2009). As técnicas de sensoriamento remoto constituem uma ferramenta poderosa para o estudo e pesquisa dos inúmeros problemas relacionados com os recursos naturais, pois através de sua principal característica, a repetitividade, o problema do mapeamento em intervalos curtos de tempo é suprido. Em adição a este fato, nas últimas décadas, o emprego de imagens de satélite vem se estabelecendo como um instrumento de fundamental importância nos estudos sobre o balanço de energia e de água, identificação de áreas em processo de degradação, desmatamento de reservas e monitoramento de rebanhos entre outros (ROMÁN et al., 2010).

Tendo em vista que as alterações no padrão do uso do solo, também promovem mudanças na partição das componentes do balanço de energia, torna-se possível se quantificar as implicações da mudança do uso da terra por meio das variações temporais das componentes do balanço de energia. De uma maneira simples, pode-se dizer que a retirada da cobertura vegetal de uma área tem como consequência a redução de fluxo de calor latente e o aumento do fluxo de calor sensível, resultando em aumento nas temperaturas da superfície e do ar.

Para se estimar as diferentes componentes do balanço de energia à superfície com imagens de satélites, alguns algoritmos têm sido formulados, dentre eles o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm*

for Land), proposto por Bastiaanssen et al. (1998), sendo posteriormente aprimorado por Allen et al. (2002). O SEBAL vem sendo utilizado por vários pesquisadores em diversas partes do mundo, tais como: Bastiaanssen et al. (1998); Bastiaanssen (2000); Droogers e Bastiaanssen (2002); Silva et al. (2005b); Silva e Bezerra (2006); Bezerra et al. (2008) e Teixeira et al. (2009). O algoritmo SEBAL necessita de poucos dados de superfície e de imagens de satélite nas bandas visível, infravermelho próximo e infravermelho termal (BASTIAANSSEN et al., 1998; BASTIAANSSEN, 2000).

O objetivo deste trabalho é avaliar a dinâmica das componentes do balanço de energia no em torno do açude Orós nos últimos 16 anos, pelo emprego do algoritmo SEBAL, bem como fazer uma análise da relação entre o saldo de radiação, fluxos de calor no solo, sensível e latente com diferentes coberturas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende as áreas adjacentes do açude Orós, onde águas do Rio Jaguaribe são barradas na divisa da bacia do Alto e Médio Jaguaribe, localizada no sul do Estado do Ceará entre as coordenadas geográficas 5° 23' S e 7° 23' S e 38° 47' W e 40° 51' W. O açude Orós é o segundo maior reservatório do Estado do Ceará com um volume máximo de armazenamento da ordem de 2 bilhões de metros cúbicos (Figura 1), sendo suas principais finalidades: o abastecimento das cidades localizadas no Médio e Baixo Jaguaribe, irrigação, piscicultura, culturas agrícolas e turismo. Além desses usos, a água do açude Orós é também usada para o abastecimento da cidade de Fortaleza.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen é BSw'h', semiárido quente com chuvas de verão/outono e temperatura média mensal superior a 18 °C. Os dados da precipitação pluviométrica acumulada até a data da passagem da satélite dos anos estudados em três estações inseridas na área de estudo (Tabelas 1, 2 e 3) foram obtidos junto à Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME. Para o cálculo da precipitação média acumulada na região nos diferentes anos utilizou-se o método dos polígonos de Thiessen (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

As componentes do balanço de energia em torno do açude Orós foram obtidas empregando-se o algoritmo SEBAL. A pesquisa foi realizada em oito imagens do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, as quais foram fornecidas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE, sendo as mesmas adquiridas sob a condição de céu claro, para os dias 24/08/1992, 14/08/1994, 02/07/1996, 11/07/1999, 17/08/2001, 06/07/2003, 14/07/2006 e 20/08/2008. As referidas imagens correspondem à órbita/ponto 217/64, tendo seu horário de passagem ocorrido em

torno das às 09 h e 30 min, horário local. A partir da classificação de uso da terra realizado por Arraes (2010) optou-se por fazer uma investigação nos seguintes usos do solo: vegetação nativa densa, área irrigada e antrópica (áreas degradadas). Optou-se trabalhar com estes três usos por serem os predominantes na região do entorno do açude Orós.

O saldo de radiação à superfície foi estimado empregando-se a equação do balanço de radiação à superfície detalhadamente descritas em Bastiaanssen et al. (1998), Allen et al. (2002) e Silva et al. (2005b).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (1)$$

em que: $R_{s\downarrow}$ ($W\ m^{-2}$) é a radiação de onda curta incidente, α é o albedo (adimensional) corrigido de cada pixel, $R_{L\downarrow}$ ($W\ m^{-2}$) é a radiação de onda longa incidente pela atmosfera na direção de cada pixel, $R_{L\uparrow}$ ($W\ m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ε_o (adimensional) é a emissividade de cada pixel.

O fluxo de calor no solo G ($W\ m^{-2}$) foi obtido a partir da equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

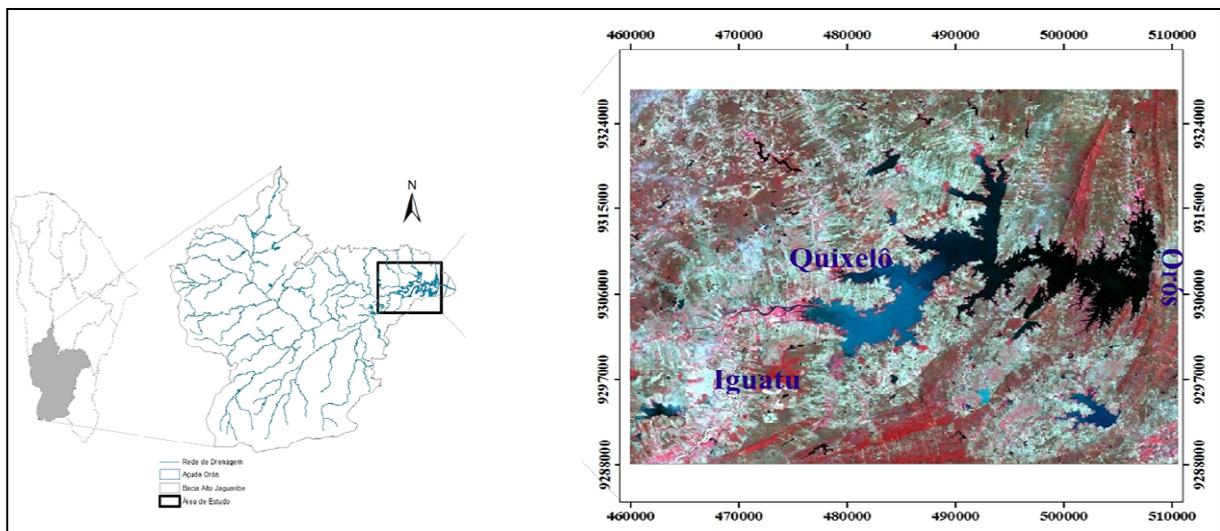


Figura 1. Localização da área de aplicação do SEBAL.

Tabela 1. Valores da precipitação pluviométrica mensal no posto de Orós nos anos em estudo até o dia da passagem do Satélite Landsat 5.

Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Total (mm)
24/08/1992	136,5	93,7	109,1	154,8	4,5	24,5	0,0	0,0	523,1
14/08/1994	104,9	76,4	142,2	203,1	121,9	225,9	0,0	0,0	874,4
02/07/1996	52,6	83,9	140,7	269,0	187,4	0,9	2,0	-	736,5
11/07/1999	28,3	76,5	278,1	106,4	230,2	4,8	0,0	-	724,3
17/08/2001	79,9	59,9	156,1	31,2	5,6	19,0	0,0	0,0	351,7
06/07/2003	57,8	118,4	163,8	88,8	47,4	0,0	0,0	-	476,2
14/07/2006	69,2	87,3	123,6	270,2	183,2	18,8	17,0	-	769,3
20/08/2008	51,9	49,6	369,4	179,9	47,6	2,0	0,0	0,0	700,4

Tabela 2. Valores da precipitação pluviométrica mensal no posto de Iguatu nos anos em estudo até o dia da passagem do Satélite Landsat 5 – TM.

Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Total (mm)
24/08/1992	180,0	145,8	157,5	147,0	30,0	12,0	0,0	0,0	672,3
14/08/1994	159,0	110,0	162,0	246,0	136,5	191,5	0,0	0,0	1005,0
02/07/1996	104,0	124,0	86,0	314,0	260,0	11,0	0,0	-	899,0
11/07/1999	64,0	74,5	230,5	136,0	270,5	20,0	12,0	-	807,5
17/08/2001	59,5	67,5	219,5	102,5	26,0	80,5	11,0	29,0	595,5
06/07/2003	83,0	328,0	284,0	134,0	61,0	61,0	0,0	-	951,0
14/07/2006	62,5	138,5	87,0	194,0	55,0	15,0	7,0	-	559,0
20/08/2008	137,0	294,0	448,0	298,5	126,0	0,0	0,0	0,0	1303,5

Tabela 3. Valores da precipitação pluviométrica mensal no posto de Quixelô nos anos em estudo até o dia da passagem do Satélite Landsat 5 – TM.

Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Total (mm)
24/08/1992	190,0	96,5	94,5	146,5	7,0	6,0	23,5	0,0	564,0
14/08/1994	38,0	84,5	99,0	138,8	132,0	42,0	0,0	0,0	534,3
02/07/1996	91,8	76,5	157,4	279,5	184,2	0,0	0,0	-	789,4
11/07/1999	31,0	31,0	251,0	135,0	164,0	0,0	0,0	-	612,0
17/08/2001	132,0	56,0	206,0	181,3	18,0	94,0	0,0	0,0	687,3
06/07/2003	76,0	141,0	198,0	48,5	96,0	17,0	0,0	-	576,5
14/07/2006	21,0	117,0	59,0	267,0	124,0	0,0	7,0	-	595,0
20/08/2008	129,0	121,0	498,0	231,0	131,0	0,0	20,0	0,0	1130,0

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n \quad (2)$$

em que: T_s (°C) é a temperatura da superfície; α o albedo corrigido do pixel; NDVI o índice de vegetação por diferença normalizada e R o saldo de radiação para o momento da passagem do satélite sobre a área de estudo. De acordo com Allen et al. (2002), o fluxo de calor sobre massas de água corresponde a $0,5R_n$. No entanto, neste trabalho, seguiu-se a recomendação de Silva e Bezerra (2006), onde o fluxo de calor na superfície de massas de água é dado por $0,3R_n$, uma vez que o leito do São Francisco e o lago de Sobradinho apresentam características distintas das observadas na região de estudo de Allen et al. (2002). Contudo, Silva e Bezerra (2006) alertam para a necessidade de um estudo específico que melhor caracterize os valores de G .

O fluxo de calor sensível (H) é a etapa mais complexa do SEBAL, sendo obtido através de processo iterativo. Para iniciar o mesmo, considera-se a atmosfera em equilíbrio neutro, sendo na sequência identificada a condição de estabilidade e então, são promovidas as correções necessárias. O fluxo de calor sensível (H) é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando a calibração interna das diferenças de temperatura próxima à superfície segundo Bastiaanssen et al. (1998):

$$H = \frac{\rho \cdot c_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (3)$$

em que: ρ (kg m^{-3}) é a massa específica do ar úmido, c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) é o calor específico do ar, dT (K) é a diferença de temperatura próximo à superfície e r_{ah} (s m^{-1}) é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor.

A resistência aerodinâmica é inicialmente determinada considerando-se uma condição de estabilidade neutra da atmosfera. A diferença de temperatura é determinada por meio de um processo interno de calibração, consistindo na seleção de dois *pixels*, de condições extremas de temperatura e umidade, denominados pixels âncora, “quente” e “frio”. No *pixel* frio, o fluxo de calor sensível é considerado

nulo, enquanto que no *pixel* quente, considera-se o fluxo de calor latente nulo (BASTIAANSEN et al., 1998). O valor final de H foi obtido após realizar processo iterativo considerando a correção da condição de estabilidade atmosférica. Para isso, determinou-se a velocidade de fricção corrigida e um novo valor de resistência aerodinâmica, que por sua vez, foi utilizado na repetição do processo, partindo-se do cálculo de dT , até atingir uma convergência entre dois valores sucessivos de velocidade de fricção corrigida. O procedimento detalhado de determinação de dT e da correção da estabilidade atmosférica encontra-se em Silva e Bezerra (2006).

O fluxo de calor latente instantâneo (LE , W m^{-2}) foi obtido como resíduo da equação do balanço de energia, a qual está apresentada na sequência:

$$LE = R_n - G - H \quad (4)$$

em que todas as componentes do balanço de energia são instantâneos, ou seja, seus respectivos valores são válidos para o momento da passagem do satélite.

Com o intuito de analisar as possíveis influências da precipitação e do tempo nas imagens em estudo, foi realizado um teste de média para cada variável e cada uso da terra, usando os critérios estabelecidos por Scott-Knott. Este teste visa a separação de médias de tratamentos em grupos distintos, através da minimização da variação dentro do grupo e maximização da variação entre grupos. Os resultados são facilmente interpretados, devido à ausência de ambiguidade (BORGES; FERREIRA, 2003). Desta forma este procedimento resulta em maior objetividade e clareza.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante dos resultados obtidos, se observou tendência de aumento nas médias do albedo a partir da imagem referente ao ano de 1996, principalmente para as áreas antrópicas (Figura 2), que apresenta aumento de 30% em relação à média inicial, observada na imagem de 1992. Esta variação se explica pela mudança do uso da terra (SHUSEN; DAVIDSON, 2007), ou seja, uma área anteriormente explorada com agricultura foi abandonada ou substituída

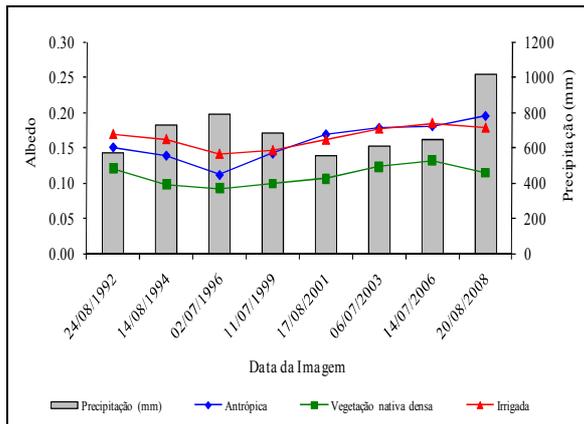


Figura 2. Média do albedo para os distintos usos do solo e a precipitação acumulada média na data passagem do satélite nas estações localizadas na área de estudo.

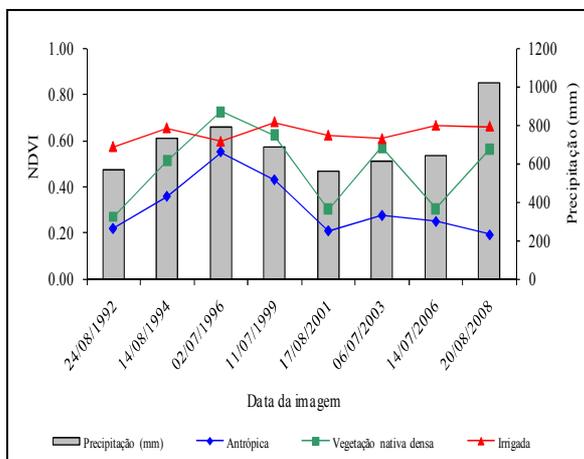


Figura 3. Média do NDVI para os distintos usos do solo e a precipitação acumulada média na data passagem do satélite nas estações localizadas na área de estudo.

por construção, alterando assim o albedo da superfície.

Para as quatro primeiras imagens utilizadas na pesquisa as maiores médias do albedo foram registradas nas áreas irrigadas (Figura 2). Observa-se, também, que o mesmo apresentou média de 15 a 18%. Esta variação pode ser explicada pelo próprio desenvolvimento da cultura, conseqüente mudança no ângulo de incidência da luz sobre a vegetação (LEITÃO et al., 2002). Variação de 15 a 25% foi observada por Silva et al. (2005a) em áreas com frutíferas irrigadas. Ainda de acordo com a Figura 3, se observa que o albedo não responde diretamente ao total precipitado até o dia da passagem do satélite, apontando para a existência de outros fatores determinantes do albedo. O albedo da superfície do solo exerce um controle na quantidade de energia de onda curta absorvida pela superfície da terra, conseqüentemente, passa a ser um importante modulador do balanço de radiação à superfície.

Os valores médios do albedo na área com vegetação nativa (caatinga) mostrou uma pequena variação nos anos de estudo, apontando para uma

baixa ou nenhuma mudança no uso da terra, ou seja, não houve retirada da vegetação destas áreas. Os valores de albedo na vegetação nativa no estudo apresentaram uma variação de 11 a 19,5%. Moreira et al (2010) obteve valores de albedo para a vegetação nativa variando de 14 a 18%, enquanto Nicácio (2008) encontrou para a savana estépica aberta na região de Petrolina o albedo mediano de 15%.

Os maiores valores médios de NDVI para as áreas de vegetação nativa foram registrados nas imagens adquiridas no mês de julho (Figura 3), em comparação aos valores obtidos nas imagens do mês de agosto. Tal fato pode ser justificado pelo período de imageamento (julho) coincidir com o final do período chuvoso, onde existe ainda um grande extrato herbáceo e presença marcante de dossel foliar da vegetação, contribuindo de maneira expressiva na elevação do NDVI. Outro importante fator a ser considerado em ambiente de Caatinga é a distribuição temporal das precipitações pluviométricas, a qual tem forte influência no balanço hídrico da região e, conseqüentemente, na umidade do solo, influenciando diretamente o NDVI.

A média do NDVI na área irrigada não mostrou variação expressiva nas datas estudadas, esse comportamento pode ser justificado pela manutenção do teor de água no solo independente do período chuvoso, porém, de acordo com o teste de média apenas as imagens dos anos de 1994, 2006 e 2008 não apresentaram diferença estatística ao nível de 5% na área irrigada. Nas demais imagens foram constatadas diferenças significativas nas médias de acordo com os critérios de Scott-Knott. A área com vegetação nativa densa mostrou ampla variação na média do NDVI no período de estudo, comprovado pelo teste de médias, quando se registrou que em todos os anos estudados o NDVI apresentou diferenças significativas ao nível de 5%. Tal fato pode ser explicado em virtude da grande dependência do NDVI à disponibilidade hídrica no solo para a planta (GURGEL et al., 2003). Barbosa et al. (2006), em vinte anos de investigação do NDVI, constataram alta variabilidade desse parâmetro, confirmando os

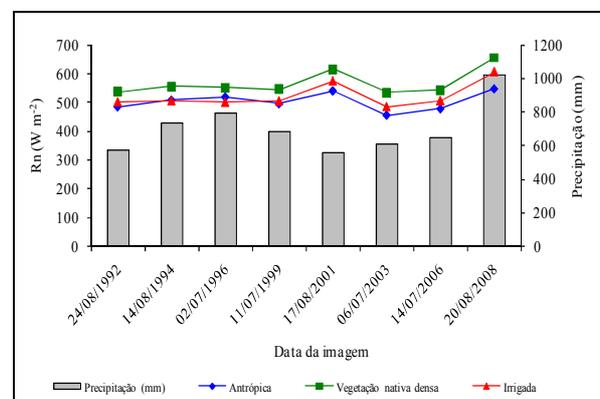


Figura 4. Média do Rn para os distintos usos do solo e a precipitação acumulada média na data passagem do satélite nas estações localizadas na área de estudo.

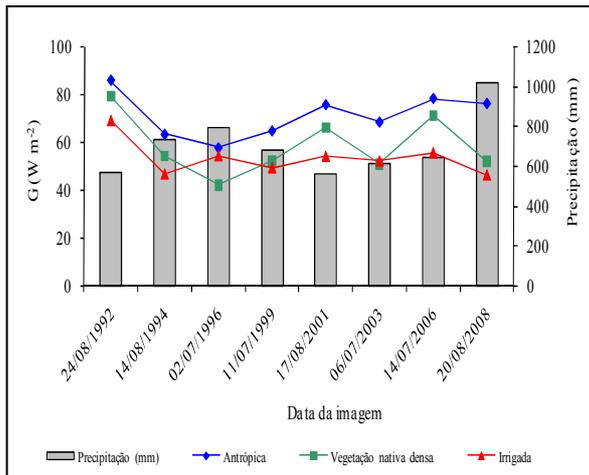


Figura 5. Média do G para os distintos usos do solo e a precipitação acumulada média na data passagem do satélite nas estações localizadas na área de estudo.

resultados obtidos neste estudo. Analisando apenas as imagens referentes ao mês de julho se percebe uma tendência de redução das médias do NDVI, com, exceção da imagem de 2006, cuja média foi superior à obtida na imagem de 2003. Tal fato pode ser explicado pela análise das Tabelas 1, 2 e 3, onde se observa que na imagem de 2006 ocorreram precipitações nos meses de junho e julho. Contudo, mesmo sendo a caatinga um ambiente de extrema fragilidade, seu alto poder de resiliência se confirma pela forte tendência de recuperação em resposta a eventos de chuva.

O saldo de radiação disponível à superfície é fortemente modulado pela radiação solar que chega ao solo, e é repartido em energia para aquecimento do ar, aquecimento do solo e para processos evaporativos, que são os fluxos de calor sensível (H), de calor no solo (G) e de calor latente (LE), respectivamente (HEMAKUMARA et al., 2003; SILVA et al., 2005b). De acordo com Hemakumara et al. (2003), o particionamento da energia disponível à superfície em fluxos de calor no solo, latente e sensível é controlado pelas propriedades físicas da superfície e as alterações do meio. Observa-se que os valores médios de Rn nas imagens estudadas permaneceram aproximadamente constantes, exceto nas imagens dos anos de 2001 e 2008 (Figura 4). Porém, de acordo com análise do teste de média, tem-se que apenas o conjunto de imagens dos anos de 1994, 1999 e 2006, e outro formado pelas imagens dos anos de 1992 e 1996 não apresentaram diferenças nas médias de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% na área irrigada. Já na área com vegetação nativa densa, em todas as datas estudadas foi apresentada diferença significativa nas médias. O mesmo comportamento aconteceu para a área antropizada.

As maiores médias do Rn registradas na área de vegetação nativa densa podem ser justificadas pelo baixo albedo na referida área, fazendo com que se tenha maior quantidade de radiação de onda curta

(SHUSEN; DAVIDSON, 2007). As menores médias do Rn, por sua vez, foram identificados na área antrópica, ou seja, menos energia disponível a ser empregada no processo da evapotranspiração, aquecimento do ar e aquecimento do solo. Souza et al. (2010) observaram no monocultivo da soja na Amazônia uma contínua mudança nas componentes do balanço de radiação, tendo como consequência redução na energia disponível para o ambiente devido ao aumento na reflexão da superfície. Os valores médios do saldo de radiação foram ligeiramente superiores nas imagens geradas no mês de agosto. Este resultado pode ser justificado pela radiação de ondas curtas incidentes, maiores no mês de agosto em virtude dos menores valores do ângulo zenital (Z). De acordo com Querino et al. (2006) quanto maior Z, menor é a incidência de radiação global, devido a um maior caminho óptico que os raios solares têm que percorrer para chegar à superfície.

Entre as componentes do balanço de energia, o fluxo de calor no solo (G) é o que apresenta maior dificuldade em se obter dados precisos, quando estimado através da técnica de sensoriamento remoto (BASTIAANSEN et al., 1998). Porém, Bastiaansen (2000) não considera esse fato como um fator limitante em escala de bacia hidrográfica, pois as medidas de G são representativas em áreas muito pequenas, quando o solo e a cobertura vegetal passam a ser considerados homogêneos.

Análise estatística mostrou que na área irrigada os pares de imagens dos anos 1994 -2008 e 1996 -2001 não apresentaram diferenças significativas. Já na área de vegetação nativa densa apenas as imagens dos anos de 1999 e 2008 não apresentaram diferenças, enquanto que na área antrópica todas as imagens mostraram diferenças significativas ao nível de 5%.

Entre os usos da terra investigados, a área irrigada foi a que apresentou menores mudanças nas médias de G, sendo praticamente o mesmo após a imagem de 1994, estando em torno de $55,0 \text{ W m}^{-2}$ (Figura 5). Acredita-se que esta baixa variabilidade

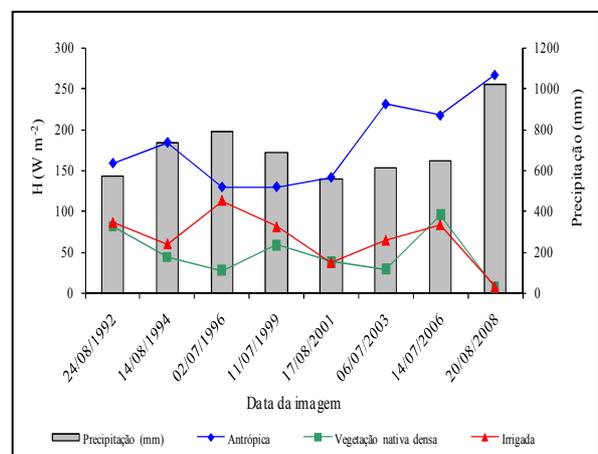


Figura 6. Média de H para os distintos usos do solo e a precipitação acumulada média na data passagem do satélite nas estações localizadas na área de estudo.

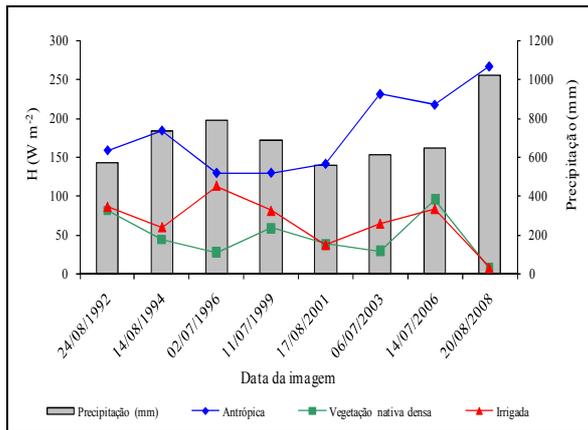


Figura 7. Valor médio do LE para os distintos usos do solo e a precipitação acumulada média na data passagem do satélite nas estações localizadas na área de estudo.

esteja relacionada com o maior teor de umidade no solo e maior cobertura vegetal, que devido ao alto calor específico proporciona tal observação. Nicácio (2008) obteve, para a região de fruticultura irrigada, valores de G menores que $96,0 \text{ W m}^{-2}$, enquanto Bezerra et al. (2008) observaram, nas áreas irrigadas, valores de G inferiores a $75,0 \text{ W m}^{-2}$, próximos aos obtidos neste estudo.

A área antrópica apresentou as maiores médias de G (Figura 5), o qual pode ser explicado pelo decréscimo do NDVI e acréscimos do albedo, influenciando diretamente nos valores de G , como pode ser investigado pela equação 2.

As maiores variações intra-anual dos valores de G foram observadas na área com vegetação nativa densa, provavelmente como resultado da rápida resposta da vegetação às precipitações que ocorrem no semiárido nordestino, resultando em redução no fluxo de calor no solo, nas áreas com maior densidade de cobertura vegetal. Silva et al. (2011) comenta que na vegetação de caatinga, os reguladores fisiológicos das plantas funcionam ora como isolantes, ora como condutores, amortecendo a sua amplitude térmica. Influenciando diretamente as componentes do balanço de energia.

Com relação às médias do fluxo de calor sensível (Figura 6), observa-se que a área antrópica apresentou os maiores valores, quando comparadas às demais áreas estudadas. Estes valores são consequência da ausência da cobertura vegetal que faz com que grande parte do R_n seja empregado no aquecimento do ar e do solo, motivado principalmente pela redução do processo de evapotranspiração. Os maiores valores de H para a área antrópica ocorreram nas três últimas imagens, com acréscimo de 45,4; 36,8 e 67,8% respectivamente, em relação às demais imagens.

De acordo com o teste de média aplicado na área irrigada apenas nas imagens dos anos de 1999 e 2006 não apresentaram diferenças significativas. Nos demais usos da terra estudados todas as imagens

apresentaram diferenças significativas nos valores da média ao nível de 5%.

Os valores de H para área irrigada e vegetação nativa densa apresentaram a mesma tendência, ou seja, uma redução na quantidade de energia na forma de calor sensível no período de estudo. Os resultados encontrados nas áreas irrigadas confirmam os observados por Silva e Bezerra (2006) no Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho e por Moreira et al (2010) no Distrito Irrigado Jaguaribe-Apodi (DIJA). Estes menores valores de H nas áreas com maior presença vegetal em relação à área antropizada expressam a importância da vegetação no controle da temperatura do ar, visto que esta expressa a energia presente no meio na forma de calor sensível.

A Figura 7 apresenta a variabilidade temporal do LE. As maiores médias do fluxo de calor latente foram registradas nas imagens referentes aos anos que apresentaram maior altura pluviométrica, ou melhor, distribuição temporal das chuvas. A ocorrência de um maior período chuvoso na região nos anos de estudo, possibilitou um aumento do teor de umidade no solo que propiciou a elevação do fluxo de calor latente. Assim, pode-se dizer que uma porção maior do saldo de radiação foi destinada aos processos de transpiração das plantas e evaporação das superfícies líquidas, o que, consequentemente, favoreceu o decréscimo do calor sensível nas áreas irrigadas e de vegetação nativa densa.

A informação sobre a variabilidade temporal e espacial é de grande importância, tendo em vista que muitos modelos hidrológicos usam valores constantes de LE na escala de bacia hidrográfica, o que produzem erros consideráveis ao se assumir valores constantes da evapotranspiração, que é diretamente associada ao particionamento de energia em uma bacia hidrográfica, usualmente empregadas nas modelagens hidrológicas ou hidrometeorológicas do tipo chuva-vazão.

CONCLUSÕES

Os valores do fluxo de calor sensível da área irrigada e a da vegetação nativa densa apresentam a mesma tendência, ou seja, uma redução na quantidade de energia na forma de calor sensível no período de estudo, evidenciando o papel da vegetação no controle da temperatura e da umidade do ar;

Os maiores aumentos do calor sensível são registrados nas imagens dos últimos três anos das áreas antrópicas, o que evidencia intenso processo de degradação da vegetação nativa na última década;

As componentes do balanço de energia analisadas apresentam respostas distintas para os diferentes usos do solo, evidenciando que o balanço de energia pode ser aplicado na detecção de mudanças de padrões de uso da terra.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Surface energy balance algorithm for land (SEBAL)** - Advanced training and Users Manual, Idaho, 2002. 98 p.
- AMARAL, M. V. F. et al. Dinâmica da cobertura vegetal (1980-2004) em um projeto de produção florestal, nos municípios de Bugre e Ipaba, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 315-325, 2009.
- ARRAES, F. D. D. **Dinâmica do balanço de energia na Bacia Hidráulica do Açude Orós e suas adjacências**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- BARBOSA, H. A.; HUETI, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20 – year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 2, p. 288-307, 2006.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. 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, n. 1-2, p. 87-100, 2000.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BOLFE, E. L. et al. Uso, ocupação das terras e banco de dados geográficos da metade sul do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1729-1737, 2009.
- BORGES, L. C.; FERREIRA, D. F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-Newman-Keuls sob distribuições normal e não normais dos resíduos. **Revista de Matemática e Estatística**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 67-83, 2003.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York, McGrawHill, 1998, 572p.
- DROOGERS, P.; BASTIAANSSEN, W. G. M. Irrigation Performance using Hydrological and Remote Sensing Modeling. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128, n. 1, p. 11-18, 2002
- GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil utilizando-se a análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 85-90, 2003.
- HEMAKUMARA, H. M.; CHANDRAPALA, L.; MOENE, A. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 2, p. 109-122, 2003.
- LEITÃO, M. M. V. B. R.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA G. M. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 256-261, 2002.
- MOREIRA, L.C.J. et al. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1148-1159, 2010.
- NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do Rio São Francisco**. 2008. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- QUERINO, C. A. S. et al. Avaliação e comparação de Radiação solar Global e albedo com ângulo zênital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3. p. 42-49, 2006.
- ROMÁN, M. O. et al. Assessing the coupling between surface albedo derived from MODIS and the fraction of diffuse skylight over spatially-characterized landscapes. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 4, p. 738-760, 2010.
- SHUSEN, W.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2, p. 133-142, 2007.
- 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**, Santa Maria, v. 14, n. 2, 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**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005a.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando

utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005b.

SILVA, F. M. et al. Modelagem da condutividade térmica em área de caatinga com predominância de cactáceas. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 113-120, 2011.

SOUZA, P. J. O. P. et al. Radiation balance in a soybean ecosystem in the Amazon. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 582-592, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n.3-4, p. 462-476, 2009.

VALENTE, R. O. A.; VETTORAZZI, C. A. Análise da estrutura da paisagem na Bacia do Rio Corumbatai, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 62, p. 114-129, 2002.