

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/8: 1515-1529
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

CÁLCULO DO SALDO DE RADIAÇÃO PELO ALGORITMO *SEBAL* NA PORÇÃO DO BAIXO-MÉDIO SÃO FRANCISCO, BRASIL, UTILIZANDO UM *SOFTWARE* DE CÓDIGO LIVRE

Radiation Balance Calculation by SEBAL Algorithm in the Lower-Middle San Francisco Basin, Brazil, using a Free Code Software

**Lucas Barbosa Cavalcante¹, Aline da Silva Inácio¹,
Heliofábio Gomes Barros¹, Rosilene Mendonça Nicácio Jiménez²
& Simone Marilene Sievert da Costa³ Coelho³**

¹Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Instituto de Ciências Atmosféricas

Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro dos Martins, CEP:57072-900, Maceió – Alagoas, Brasil
{cavalcantelb, alineinacio91, heliofab}@gmail.com

²Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Centro de Ciências Agrárias

BR 104, Km 85, s/n, CEP 57.100-000, Rio Largo – Alagoas, Brasil
rmnicacio@gmail.com

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

Rodovia Presidente Dutra km 40, SP-RJ, CEP 12630-000 - Cachoeira Paulista - São Paulo, Brasil
smsievert@gmail.com

Recebido em 16 de Janeiro, 2015/Aceito em 7 de Novembro, 2015

Received on January 16, 2015/ Accepted on November 7, 2015

RESUMO

O entendimento do ciclo hidrológico é importante para o controle da demanda hídrica de uma região, assim como para obter informações que contribua para um melhor conhecimento deste fenômeno de forma menos onerosa. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo a implantação do algoritmo *SEBAL* em uma plataforma livre, através do *software SPRING* e sua linguagem espacial para geoprocessamento algébrico - *LEGAL*. As análises foram feitas considerando o saldo de radiação à superfície (R_n), por se tratar de um processo importante dentro do balanço de energia, além de ser uma variável que influencia diretamente na evapotranspiração. O perímetro irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA foi escolhido como área de estudo para testar a eficiência do algoritmo implementado, devido à sua importante atuação no cenário socioeconômico de toda a região. Todos os valores encontrados como resultados estão condizentes com a literatura, incluindo os trabalhos realizados na região. A implementação do *SEBAL* em um *software* livre e de código aberto, utilizando-se a linguagem *LEGAL* e imagens de satélite (LANDSAT 5 – TM), foi viável para obtenção de estimativa do saldo de radiação à superfície.

Palavras-chave: Rio São Francisco, *SPRING*, Linguagem *LEGAL*, Imagens Orbitais, LANDSAT 5.

ABSTRACT

The understanding of the hydrological cycle is important to control the hydric demand of a region, as well as to obtain information that contributes to a better knowledge of this phenomenon with lower costs. In this context, this work aimed to the implementation of *Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)* on a free platform, through the *SPRING software* and its spatial language for algebraic geoprocessing – *LEGAL*. The analyzes were performed considering the surface net radiation (R_n), because it is an important process within the energy balance and to be a variable that directly influences the evapotranspiration. The irrigated area of Petrolina-PE/Juazeiro-BA was selected as study area to test the efficiency of the implemented algorithm, due to its important role in the socioeconomic scenario of the entire region. All results are consistent with those described in the literature, including the works performed in the region. The *SEBAL* implementation in a free *software* and open-source, using the *LEGAL* language and satellite images (Landsat 5 - TM), was viable to obtain the estimate of surface radiation balance.

Keywords: São Francisco River, *SPRING*, *LEGAL* Language, Orbital Images, LANDSAT 5.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre o saldo de radiação é essencialmente importante para monitoramentos climático, questões agrometeorológicas e previsões de tempo. O R_n exerce um importante papel sobre a vegetação, tendo em vista que representa a quantidade de energia eletromagnética que se dispõe a distribuir-se entre os fluxos de energia necessários ao diversos processos físico-químicos (TUBELIS *et al.*, 1980). Neste contexto o Sensoriamento Remoto vem alcançando um lugar de destaque quando se está trabalhando com o monitoramento e gerenciamento dos recursos naturais, variações meteorológicas e suporte à decisão.

Ao longo dos anos, vem se medindo o saldo de radiação (R_n) por meios convencionais, com métodos que obtêm os componentes do balanço de radiação efetuando medidas de forma pontual, tornando-se assim um processo muito oneroso. O Sensoriamento Remoto por sua vez, consegue trabalhar áreas extensas, com baixos valores de imprecisão segundo Daughtry *et al.* (1990), o erro médio alcançado nos cálculos estimados por Sensoriamento Remoto são inferiores a 7%.

Na região semiárida do Nordeste do Brasil o cultivo agrícola representa uma importante fonte de economia regional. Todavia, levando-se em consideração as divergências climáticas desta região, a atividade agrícola torna-se primitivamente de subsistência. Como alternativa a estas questões, a agricultura irrigada mostra-se como um recurso valioso para contornar as adversidades. Para a otimização deste processo é de suma importância o conhecimento da quantidade de água perdida para atmosfera, pelo processo de evapotranspiração (ET) e, para tal

determinação, o parâmetro indispensável é o saldo de radiação.

Em decorrência desta grande importância, vários pesquisadores vêm trabalhando na criação e aperfeiçoamento de diversos algoritmos que auxiliem na determinação do saldo de radiação com a utilização de dados orbitais. Um dos que possuem mais destaque e é extremamente utilizado em estudos e pesquisas é o *Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)*. O *SEBAL* foi um algoritmo desenvolvido por W.G.M Bastiaanssen em 1995 com o propósito de calcular a ET, utilizando-se de imagens orbitais e alguns dados de superfície.

Segundo Bastiaanssen (2000), trata-se de um algoritmo que, por meio de rotinas computacionais, calcula um completo balanço de radiação e de energia ao longo de uma superfície da Terra, gerando diversos dados sobre radiação para extensas áreas.

Um fator que pode influenciar de forma negativa o desenvolvimento de pesquisas que com tal algoritmo, é o elevado custo dos *softwares* proprietários utilizados para rodar as rotinas inerentes ao processo.

Entretanto paralelo com o aperfeiçoamento dos algoritmos avança o desenvolvimento de *softwares* livres e de código aberto, o que diminui ainda mais os custos com pesquisas e amplia a capacitação do programa devido o acesso direto ao seu código fonte, podendo-se assim adequá-lo às necessidades do projeto. A utilização de uma ferramenta livre, em conjunto com a aplicação do *SEBAL*, vem sendo estudada há algum tempo, porém ainda não aplicada devido à limitação dos *softwares* não proprietários.

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através da sua Divisão de Processamento de Imagens (DPI) criou o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (*SPRING*), que constitui um Sistema de Informações Geográficas (SIG) em seu estado-da-arte, com funções de um poderoso processador de imagens, oferecendo um ambiente para álgebra de mapas, conhecido como *LEGAL* (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico), excelente para a elaboração de algoritmos para gerenciar processos.

Ante o exposto, se objetiva nesta pesquisa, demonstrar a implementação do algoritmo *SEBAL* no *software* livre *SPRING* (CAMARA *et al.* 1996) (versão 5.1.8), rodando em sistema operacional também livre (UBUNTU 11.10), com base na linguagem *LEGAL*.

2. MATÉRIAS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentada a área de estudo deste trabalho, assim como serão listados todos os materiais e procedimentos necessários para o desenvolvimento do mesmo

na Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (*LEGAL*)

2.1 Área de estudo

A área de interesse neste estudo está localizada na região semiárida do Nordeste brasileiro abrangendo parte do território dos municípios de Lagoa Grande e Petrolina, ambos no Estado de Pernambuco, e parte do território dos municípios de Casa Nova e Juazeiro localizados no Estado da Bahia (Figura 1). A área pode ser definida pelo retângulo envolvente situado entre as coordenadas geográficas 9° 23' 19,6401" e 8° 59' 08,5528" de Latitude Sul; 40° 43' 54,4456" e 40° 06' 16,0703" de Longitude Oeste, tendo como datum de referência o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). Esta é uma área de intensa atividade de fruticultura irrigada no nordeste, tendo Petrolina conquistado a condição de segundo maior exportador de frutas e o segundo maior centro vinícola do país. As cidades de Petrolina e Juazeiro juntas formam o maior aglomerado urbano do semiárido.

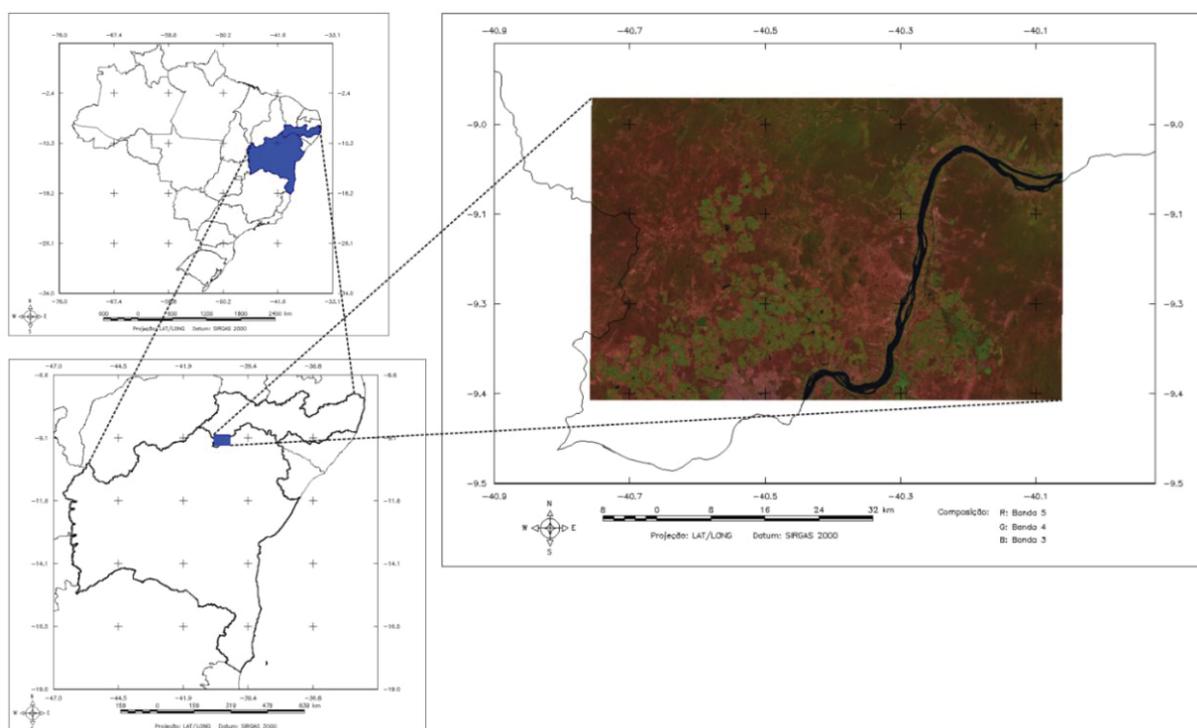


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

2.2 Descrição do *SEBAL*

O *SEBAL* necessita de dados obtidos por sensores orbitais que possuam uma resolução espectral que abranja as bandas pertencentes

ao visível, infravermelho próximo e termal. O algoritmo pode ser dividido em duas etapas: a primeira abrange o cálculo de diversas variáveis para se alcançar o valor do saldo de radiação (R_n),

a segunda calcula o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor latente e o fluxo de calor do solo, que colocado em uma equação juntamente com o R_n , apresenta como resultado a evapotranspiração. O alvo deste estudo é o cálculo da etapa 1 do algoritmo *SEBAL*, utilizando-se de imagens do sensor TM do Landsat 5 as etapas que representam este processo são ilustradas num fluxograma na Figura 2.

Primeiramente, as bandas espectrais do Landsat são convertidas em valores de radiância espectral (L_λ), enquanto que o segundo parâmetro a ser calculado é a reflectância espectral (ρ_λ) a partir destes valores se calculam mais três parâmetros o albedo no topo da atmosfera (α_{TOA}), o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Utilizando-se do α_{TOA} calcula-se o albedo da superfície (α) que é uma das variáveis ligadas diretamente ao cálculo final do R_n através do SAVI encontra-se os valores o índice de área foliar (IAF) que por sequência entra de forma

direta no cálculo das emissividades (ϵ_{NB} e ϵ), sendo a primeira uma representação da superfície para o comportamento da emissão termal (10,4 a 12,5 μm) relacionada à banda-estreita (*narrow-band*), e a segunda representa o comportamento da superfície para toda faixa do infravermelho termal (6 a 14 μm) a ϵ também está diretamente ligada ao cálculo do R_n .

Na sequência, calcula-se a temperatura da superfície (T_s), que irá dar suporte à escolha do pixel frio, necessário para o cálculo da radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$), variável esta que está diretamente envolvida no cálculo final do saldo de radiação, é calculada utilizando-se a constante de Stefan-Boltzmann juntamente com a temperatura do pixel frio em Kelvin. Com os valores da T_s , o auxílio da constante de Stefan-Boltzmann e os valores de ϵ , calcula-se a radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$), outra variável que compõe a fórmula geral de R_n , e finalizando o processo é calculado o valor da radiação de onda curta incidente ($R_{C\downarrow}$).

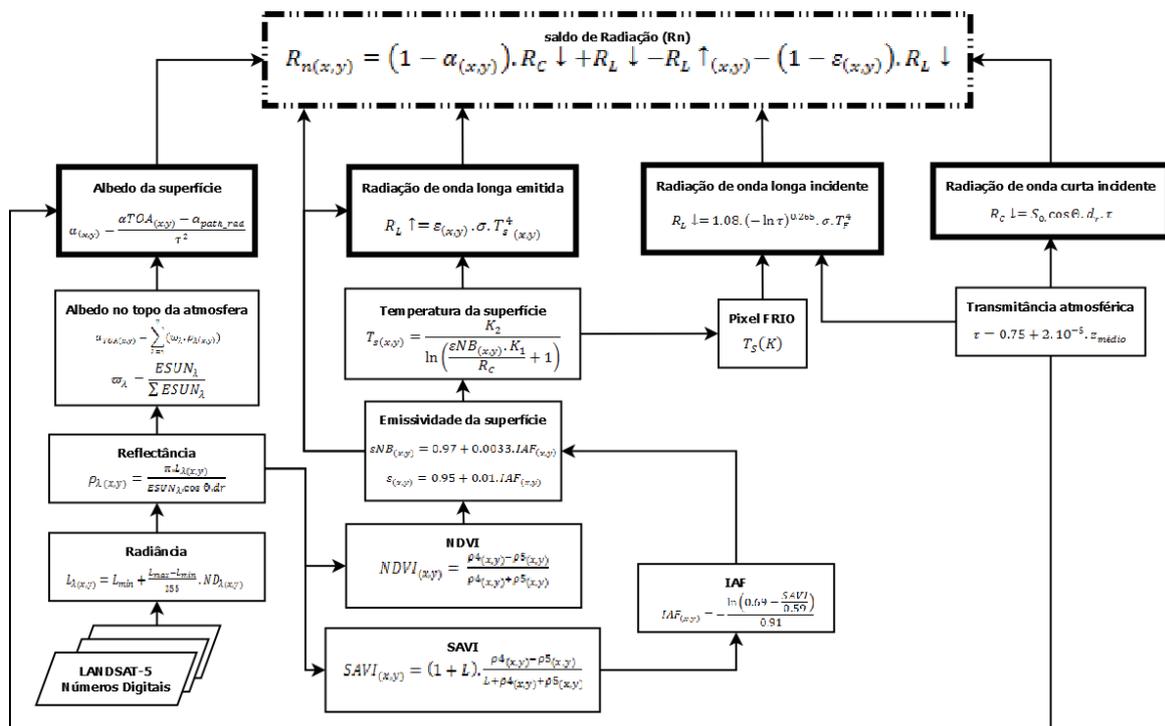


Fig. 2 - Fluxograma metodológico para o cálculo do saldo de radiação utilizando-se uma imagem TM. - Fonte: Adaptado de Nicacio (2008).

2.3 Medições feitas através das imagens orbitais

Todos os procedimentos necessários para a estimativa do saldo de radiação, assim como, os operadores e declarações existentes na Linguagem Espacial para Geoprocessamento

Algébrico (*LEGAL*), serão apresentados de forma detalhada nesta seção.

2.3.1 Calibração radiométrica

Para o processo de calibração radiométrica, processou-se a conversão de números digitais

(ND) das imagens brutas do satélite Landsat 5, sensor thematic mapper (TM), em radiância espectral tal processo representa a energia proveniente do sol que é refletida por cada pixel em uma determinada unidade de área, de tempo e determinada angulação, calcula-se tal processo através do modelo proposto por Markham e Baker (1987), com base na equação 1.

$$L_{\lambda(x,y)} = L_{min} + \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \cdot ND_{\lambda(x,y)} \quad (1)$$

onde L_{min} e L_{max} são as radiâncias espectrais mínimas e máximas, dadas em $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ como pode ser visto na tabela 1, (x,y) representa as bandas espectrais da imagem 1,2,3, ..., 7 e ND representa os números digitais de cada pixel das imagens.

2.3.2 Reflectância espectral

Segundo Allen *et al.* (2002), Silva *et al.* (2005), Bastiaanssen *et al.* (1998a), a reflectância espectral é a energia resultante da razão entre o fluxo de radiação solar emitido e o incidente, expresso segundo a equação 2:

$$\rho_{\lambda(x,y)} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda(x,y)}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta \cdot dr} \quad (2)$$

onde $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar espectral de cada banda medida no topo da atmosfera, tendo como unidade $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ (Tabela 1), θ é o ângulo solar zenital, $L_{\lambda(x,y)}$ é a radiância espectral e dr é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol, em unidades astronômicas.

2.3.3 Albedo no topo da atmosfera e albedo da superfície

O albedo no topo da atmosfera (α_{TOA}) é o albedo não corrigido (equação 3) expresso através do somatório das reflectâncias espectrais multiplicadas pelas constantes de calibração, enquanto o albedo da superfície é corrigido através dos efeitos da atmosfera (equação 4).

$$\alpha_{TOA(x,y)} = \sum_{\lambda=1}^n (\omega_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda(x,y)})$$

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad (3)$$

$$\alpha_{(x,y)} = \frac{\alpha_{TOA(x,y)} - \alpha_{path\ rad}}{\tau^2} \quad (4)$$

onde $\rho_{(\lambda(x,y))}$ são as reflectâncias espectrais referentes às bandas 1,2,3,4,5 e 7 do Landsat 5, o $\alpha_{path\ rad}$ representa a radiação solar refletida pela atmosfera, segundo Bastiaanssen *et al.* (1998b); o valor para o SEBAL é de 0.03 e τ^2 que representa a transmitância atmosférica, expressa pela equação 5, onde $z_{médio}$ é a altitude média da área de estudo.

$$\tau = 0.75 + 2.10^{-5} \cdot z_{médio} \quad (5)$$

2.3.4 Índices de Vegetação

Índice de vegetação nada mais é que a combinação matemática das reflectâncias em várias faixas espectrais da radiação eletromagnética, objetivando avaliar as condições vegetativas. Este processo será demonstrado nas subseções abaixo.

2.3.4.1 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

O NDVI é obtido pela razão entre a subtração da reflectância das bandas IV (infravermelho próximo) e V (vermelho) e a soma das mesmas bandas (TUCKER, 1979), conforme equação 6.

$$NDVI_{(x,y)} = \frac{\rho_{4(x,y)} - \rho_{5(x,y)}}{\rho_{4(x,y)} + \rho_{5(x,y)}} \quad (6)$$

em que $\rho_{4(x,y)}$ e $\rho_{5(x,y)}$ são as reflectividades das bandas 4 e 5, respectivamente do Landsat 5, sensor TM. O NDVI é um índice que mede o verdor da vegetação variando de -1 a 1, onde de valores negativos seriam corpos d'água e a variação entre 0 e 1 representariam no menor ao maior verdor da vegetação.

2.3.4.2 Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

O índice SAVI é calculado utilizando-se da equação 7 proposta por Huete (1988).

$$SAVI_{(x,y)} = (1 + L) \cdot \frac{\rho_{4(x,y)} - \rho_{5(x,y)}}{L + \rho_{4(x,y)} + \rho_{5(x,y)}} \quad (7)$$

onde L é uma variável de ajustamento, com valor comumente utilizado na literatura igual a 0,5.

2.3.4.3 Índice de área foliar (IAF)

O índice de área foliar estabelece a razão entre a área foliar total e a área ocupada pela cultura é indicado pela equação 8 estabelecida por Allen *et al.* (2002).

$$IAF_{(x,y)} = -\frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (8)$$

2.3.5 Emissividades (ε_{NB} e ε)

A ε_{NB} é medida no domínio espectral da banda termal do sensor TM e a ε é obtida na faixa da banda larga. Segunda Allen *et al.* (2002) as emissividades, quando $NDVI > 0$ e $IAF < 3$ podem ser obtidas pelas equações 9 e 10:

$$\varepsilon_{NB_{(x,y)}} = 0.97 + 0.0033 \cdot IAF_{(x,y)} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{(x,y)} = 0.95 + 0.01 \cdot IAF_{(x,y)} \quad (10)$$

Considerando que para $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB_{(x,y)}} = \varepsilon_{(x,y)} = 0.98$ e para $NDVI < 0$, $\varepsilon_{NB_{(x,y)}} = 0.99$ e $\varepsilon_{(x,y)} = 0.985$ (ALLEN *et al.*, 2002.).

2.3.6 Temperatura da superfície (T_s)

A temperatura da superfície é determinada levando em consideração a radiância espectral da banda 6 do Landsat 5 (termal) e a $\varepsilon_{NB_{(x,y)}}$, sendo seus valores dados em graus Kelvin (K) e sua fórmula matemática é dada segunda a equação 11 (BASTIAASSEN, 1995).

$$T_{S(x,y)} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB_{(x,y)}} \cdot K_1}{R_C} + 1\right)} \quad (11)$$

onde os valores K_1 e K_2 são constante que equivalem a $607,76 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ e $1260,56 \text{ K}$, respectivamente.

2.3.7 Radiação de onda longa emitida e incidente ($R_L \uparrow$ e $R_L \downarrow$)

A radiação de onda longa emitida ($R_L \uparrow$) é calculada através da equação 12 de Stefan-Boltzmann.

$$R_L \uparrow = \varepsilon_{(x,y)} \cdot \sigma \cdot T_S^4_{(x,y)} \quad (12)$$

em que σ representa a constante de Stefan-Boltzmann que equivale a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, $\varepsilon_{(x,y)}$ e T_S , representam a emissividade da superfície e a temperatura da superfície, respectivamente.

A radiação de onda longa incidente ($R_L \downarrow$) é calculada através da equação 13.

$$R_L \downarrow = 1,08 \cdot (-\ln \tau)^{0.265} \cdot \sigma \cdot T_F^4 \quad (13)$$

onde, τ representa a transmitância atmosférica e T_F a temperatura do pixel frio, retirada a partir da imagem da temperatura da superfície.

2.3.8 Radiação de onda curta incidente

Corresponde à radiação solar que incide de forma direta e indireta que atinge a superfície da Terra, expressa pela equação 14 (BASTIAASSEN, 1995):

$$R_C \downarrow = S_0 \cdot \cos \theta \cdot dr \cdot \tau \quad (14)$$

em que S_0 é a constante solar, que equivale a 1367 W.m^{-2} , θ é o ângulo solar zenital, dr é o inverso do quadrado da distância Terra-sol e τ é a transmitância atmosférica.

2.3.9 Saldo de radiação (R_n)

O saldo de radiação é calculado com base na equação 15 (BASTIAANSSEN, 1995):

$$R_{n(x,y)} = (1 - \alpha_{(x,y)}) \cdot R_C \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \varepsilon_{(x,y)}) \cdot R_L \downarrow \quad (15)$$

onde $\alpha_{(x,y)}$ é o albedo da superfície, $R_C \downarrow$ é a radiação de onda curta incidente, $R_L \downarrow$ é a radiação de onda longa incidente, $R_L \uparrow$ é a radiação de onda longa emitida e $\varepsilon_{(x,y)}$ é a emissividade de cada pixel da área de estudo.

2.4 Descrição da Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algebrico (LEGAL)

O *LEGAL* é uma ferramenta que vem acoplada ao *software SPRING*, com manipulação de dados através de programação, permitindo ao usuário tratar os dados com maior robustez e até mesmo fazer manipulações indisponíveis na interface gráfica do *SPRING*.

Tabela 1: Valores das radiâncias mínimas e máximas e da irradiância Solar Espectral No Topo Da Atmosfera

Bandas Espectrais	Radiância Espectral L_{min} e L_{max}						Irradiância solar espectral no topo da atmosfera
	A partir de 1 de março de 1984, até 4 de maio de 2003		A partir de 5 de maio de 2003, até 1 de abril de 2007		A partir de 2 de abril de 2007, até atualmente		
	L_{min}	L_{max}	L_{min}	L_{max}	L_{min}	L_{max}	$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$
1	-1,52	152,10	-1,52	193,0	-1,52	193,0	1957
2	-2,84	296,81	-2,84	365,0	-2,84	365,0	1826
3	-1,17	204,30	-1,17	264,0	-1,17	264,0	1554
4	-1,51	206,20	-1,51	221,0	-1,51	221,0	1036
5	-0,37	27,19	-0,37	30,2	-0,37	30,2	215,0
6	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1,2378	15,303	-
7	-0,15	14,38	-0,15	16,5	-0,15	16,5	80,67

Os algoritmos desenvolvidos em *LEGAL* seguem a mesma lógica de qualquer outro tipo de linguagem de programação, onde é necessário definir instanciações, declarações e operações. E possuem suas palavras reservadas e variáveis levando-se em consideração uma linguagem voltada para álgebra de mapas.

2.4.1 Palavras reservadas

São termos que são reconhecidos pelo sistema e que possuem a atribuição de uma determinada função. Ao ser citado no corpo do algoritmo este vai buscar em seu banco de dados e atribuir a função para a qual a palavra foi reservada. Todas as palavras reservadas que pertencem a linguagem *LEGAL* são apresentadas no corpo do algoritmo na cor azul.

2.4.2 Variáveis

São termos ligados pelo próprio usuário e que fazem a associação de um dado com algo que já é conhecido. Por exemplo, criar uma variável a que recebe a banda 5 do satélite Landsat 5.

2.4.3 Declarações

É a primeira etapa na construção do algoritmo em *LEGAL* é nela que se estabelece todos modelos que serão utilizados para dar entrada e todos os que serão utilizados para as saídas.

2.4.4 Instanciações

É a associação de planos de informação às variáveis dos modelos existentes no *LEGAL*, sendo eles: *TEMATICO*, *CADASTRAL*, *NUMERICO* e *REDE*.

2.4.5 Operações

É onde se localiza todos os operadores que são utilizados no *LEGAL* são eles: operadores matemáticos, de transformação, booleanos e condicionais, sendo utilizados para fazer todas as manipulações e agregações de dados dentro do algoritmo.

2.4.5.1 Operadores matemáticos

Atuam sobre todos os planos de operações *NUMERICO* e *IMAGEM*, englobando as funções matemáticas e aritméticas.

2.4.5.2 Operadores de transformação

Estão ligados ao mapeamento de valores definidos por variáveis de categoria *TEMATICO* e *NUMERICO* fazendo a vinculação destes valores com valores de mesma categoria.

2.4.5.3 Operadores booleanos

São amplamente utilizados na análise espacial, baseiam-se nas relações existenciais de ordem aplicáveis a dados quantitativos e nas relações de igualdade aplicadas tanto em dados qualitativos quanto quantitativos são expressões em formato de sentenças que tem como resposta dentre a condição de *VERDADEIRO* ou *FALSO*.

2.4.5.4 Operadores condicionais

É a avaliação de uma expressão booleana para que o algoritmo decida qual será escolhida para a determinação de um resultado final.

2.5 Dados utilizados

Para a construção deste trabalho foram utilizados dados de altimetria obtidos através

das imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Segundo Van Zyl (2001), o SRTM é um projeto conjunto entre a NASA (Agência Espacial Norte-Americana), a NIMA (Agência de Imageamento e Mapeamento Norte-Americana), a DLR (Agência Espacial Alemã) e a ASI (Agência Espacial Italiana), cujo objetivo foi produzir dados digitais da topografia de 80% da superfície terrestre, entre 60°N e 57°S. Os dados SRTM foram coletados a cada 1 arco de segundo (aproximadamente 30 m) em uma grade de latitude/longitude (RABUS *et al.*, 2003), com a técnica de interferometria por radar. Tais dados foram utilizados para comprovar uma das premissas do *SEBAL*, que trata da sua utilização em regiões relativamente planas.

Apesar da resolução espacial do SRTM ser de 30 m, as imagens gratuitas do SRTM foram reamostradas para uma resolução de 90 m, exceto para os EUA. Os dados do SRTM são referenciados ao elipsóide WGS84, com datum vertical EGM96.

Para a aplicação do algoritmo *SEBAL*, foi utilizada imagem orbital do satélite LANDSAT 5 (Land Remote Sensing Satellite), o quinto lançamento desta missão que teve início no ano de 1972 com o satélite ERTS-1. Com objetivo principal de fazer um mapeamento multiespectral da superfície da Terra, o LANDSAT 5 possui uma resolução espectral de 7 bandas, tendo a banda 6 (termal) uma resolução espacial de 120 metros e as demais 30 metros. A imagem utilizada nesta pesquisa é referente ao dia 12 de outubro de 2004, pois a mesma não possuía nebulosidade

2.6 Metodologia

Nesta etapa serão apresentados os procedimentos implantados dentro da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (*LEGAL*) para se conseguir calcular todas as variáveis necessárias a estimativa do saldo de radiação.

2.6.1 Pré-processamento

Nesta etapa da pesquisa, a imagem do LANDSAT 5 passou pelo processo de georreferenciamento, utilizando-se o *software* livre *SPRING* em sua versão 5.1.8 (rodando em ambiente livre UBUNTU 11.10), como a imagem possui uma média resolução espacial, permitindo a identificação de forma visual de alvos, foi adotado

o método de georreferenciamento imagem a imagem, optando-se como base por uma imagem Geocover, que é disponibilizada através do portal da NASA, sendo uma imagem já georreferenciada com tamanho de pixel de 14,25 metros.

Para o processo foi necessária a conversão das bandas espectrais da imagem no formato **tiff* para o formato nativo do *SPRING*, **spg*, utilizando-se para este processo o *software* IMPIMA em sua versão 5.1.8 embutido na instalação do *SPRING*. Depois de concluído este processo, começa o trabalho de criação de um banco de dados no *SPRING* e, posteriormente, de um projeto após estes passos, a imagem Geocover foi importada para o *software*, dando início ao processo de registro das imagens do satélite LANDSAT 5, o georreferenciamento feito com 16 pontos de controle bem distribuídos pela área de estudo, alcançando um erro RMS de 0,206. Levando em consideração que o pixel das imagens do LANDSAT 5 possuem 30 metros de resolução espacial e o RMS pode ser comparado ao desvio padrão, o valor de 0,206 é considerado excelente.

2.6.2 Algoritmo em *LEGAL*

Para a calibração radiométrica, assim como para todos os processos citados, foi utilizado o ambiente de programação do *SPRING*, o *LEGAL*, para a implementação do algoritmo *SEBAL*, automatizando o máximo de processos para os cálculos pertinentes à determinação do saldo de radiação, ponto alvo deste artigo. Para iniciar o algoritmo, foram escritas as declarações, utilizando-se como entrada e saída de todas as imagens geradas a categoria do *SPRING* denominada MNT, pelo fato desta aceitar valores de pixels de forma decimal, sendo de extrema importância nos cálculos efetuados tendo em vista que raramente são alcançados valores inteiros. Nesta etapa teve-se que declarar todas as variáveis pertencentes a todo o processo, assim como o nome e modelo de dados de cada um (Figura 3).

```

12 MNT ndvnumeric ("NDVI_MNT");
13 MNT savinumeric ("SAVI_MNT");
14 MNT iafnumeric ("IAF_MNT");
15 MNT albedosupnumeric ("AlbedoSUP_MNT");
16 MNT epsilonNB ("Emissividade_NB");
17 MNT epsilon ("Emissividade");
18 MNT tempsuperficie ("TempSuperficie_MNT");
19 MNT tempsuperficiekelvin ("TempsupKELVIN");
20

```

Fig. 3 - Exemplo de declarações da linguagem *LEGAL*.

Após o processo de declaração, começa a escrita das instâncias nesta etapa é necessário escrever no algoritmo todos os nomes que serão dados de saída para os planos de informação, assim como os nomes dos dados de entrada que se fazem necessários à colocação pelo usuário (Figura 4). Da forma que foi elaborada esta implementação, só será necessário ao usuário dar entrada às 7 bandas pertencentes às imagens LANDSAT 5 as bandas precisam estar na categoria MNT e com os nomes da seguinte forma: TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM6 e TM7, é importante ressaltar que a banda 6 difere em resolução espacial para as demais bandas, sendo necessário a interpolação dos seus pixels para que se alcance a mesma resolução, neste trabalho este processo também foi feito por meio do *LEGAL*, através de um algoritmo em para reamostragem da a resolução espacial do pixel para 30 metros.

```
30 //Instanciacoese
31 banda1 = Recupere (Nome = "TM1" );
32 banda2 = Recupere (Nome = "TM2" );
33 banda3 = Recupere (Nome = "TM3" );
34 banda4 = Recupere (Nome = "TM4" );
35 banda5 = Recupere (Nome = "TM5" );
36 banda6 = Recupere (Nome = "TM6" );
37 banda7 = Recupere (Nome = "TM7" );
```

Fig. 4 - Exemplo de instanciação na linguagem *LEGAL*.

A terceira etapa para a construção de um algoritmo em *LEGAL* são as operações (Figura 5) nesta fase são colocados todos os cálculos necessários para alcançar o objetivo, iniciando-se com os cálculos para processo de calibração radiométrica, onde foram utilizadas as bandas 1 a 7 do LANDSAT 5, para o cálculo da radiância espectral, convertendo assim os valores brutos das imagens, ou seja, números digitais (ND), para valores de radiância.

```
201 radianciabase1 = (((Lmax1-(Lmin1))/255)*banda1)+(Lmin1);
202 radianciabase2 = (((Lmax2-(Lmin2))/255)*banda2)+(Lmin2);
203 radianciabase3 = (((Lmax3-(Lmin3))/255)*banda3)+(Lmin3);
204 radianciabase4 = (((Lmax4-(Lmin4))/255)*banda4)+(Lmin4);
205 radianciabase5 = (((Lmax5-(Lmin5))/255)*banda5)+(Lmin5);
206 radianciabase6 = (((Lmax6-(Lmin6))/255)*banda6)+(Lmin6);
207 radianciabase7 = (((Lmax7-(Lmin7))/255)*banda7)+(Lmin7);
```

Fig. 5 - Exemplo de operações na linguagem *LEGAL*.

Posteriormente foram utilizadas as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 para o cálculo da reflectância espectral da imagem; este processo utiliza como dado de

entrada as imagens de radiância anteriormente calculadas. Para estes dois primeiros processos, o usuário precisa introduzir no algoritmo os valores pertinentes aos coeficientes de calibração (Figura 6), seguindo o que já foi mostrado na tabela 1. A determinação dos ângulos de elevação solar em cada imagem, visa aumentar ao máximo a precisão do processo na implementação é solicitado que se coloque os ângulos de elevação de todas as imagens, sendo depois realizada uma média aritmética; com o ângulo encontrado é realizada a correção para saber a angulação a nadir e, por último, o valor da distância Terra-Sol que é determinado pelo dia Juliano da tomada da imagem.

```
78 //Coeficientes
79
80 Lmin1 = -1.52; // Valor a depender do ano da imagem
81 Lmin2 = -2.84; // Valor a depender do ano da imagem
82 Lmin3 = -1.17; // Valor a depender do ano da imagem
83 Lmin4 = -1.51; // Valor a depender do ano da imagem
84 Lmin5 = -0.37; // Valor a depender do ano da imagem
85 Lmin6 = 1.2378; // Valor a depender do ano da imagem
86 Lmin7 = -0.15; // Valor a depender do ano da imagem
```

Fig. 6 - Exemplo de variáveis na linguagem *LEGAL*

O próximo passo das operações foram os cálculos das variáveis determinadas pelas interações da radiação solar e do ambiente, tendo como primeiro o albedo no topo da atmosfera, que é calculado de forma automática pelo algoritmo escrito na *LEGAL*, utilizando-se de 7 fatores de correção, multiplicadas uma a uma à reflectância calculada, e no fim é realizado o somatório das mesmas; a segunda variável calculada foi o albedo da superfície, que necessita do valor hipsométrico da estação meteorológica em estudo, como este estudo está sendo analisado em uma área consideravelmente extensa, e com o intuito de se alcançar melhor precisão, não foi utilizado um valor de hipsometria único, mas sim uma média de altitudes da região. Tendo em vista que o *SEBAL* admite que a área em estudo siga um padrão relativamente plano, neste trabalho utilizou-se de dados de altimetria SRTM para se obter a média dos valores hipsométricos da imagem no algoritmo.

O NDVI foi outro fator calculado neste trabalho, utilizando-se das reflectâncias obtidas, assim como o SAVI, com ajuste ao nível do solo pelo valor da variável $L = 0,5$. Após o cálculo do NDVI e do SAVI, foi possível se calcular o IAF, nesta etapa houve a necessidade da aplicação de um condicional dentro do algoritmo, tomando como base a equação 8, referente a obtenção do

IAF existe o cálculo de um logaritmo natural de uma subtração de 0,69 pelo SAVI, dividindo este valor por 0,59. Teve-se que determinar via programação que se o valor do SAVI fosse igual a 0,69, o algoritmo não considerasse a subtração e dividisse diretamente 0,69 por 0,59, tal procedimento foi necessário tendo em vista que se ocorresse a subtração de 0,69 por 0,69, resultaria em um logaritmo natural de 0 que por sua vez é inexistente.

O cálculo das emissividades foi a etapa que necessitou do maior uso de condicionais (Figura 7), pois existem duas condições a serem analisadas para se obter o resultado a primeira verificar se o valor de IAF é menor que 3, para se calcular tanto a ϵ_{NB} quanto a ϵ através das equações 9 e 10, respectivamente, caso contrário, são atribuídos valores específicos. A segunda condição diz respeito aos valores do NDVI e do albedo da superfície, caso o primeiro seja inferior a 0 e o segundo inferior a 0,47, este se manter num valor específico, caso contrário, é mantido o valor anteriormente calculado.

```

284 //Emissividade da Superfície
285
286 // eNB = 0.97 + 0.0033 * IAF
287
288 // e = 0.95 + 0.01 * IAF
289
290 epsilonNB1 = (iafnumerico < 3) ? 0.97 + 0.0033 * iafnumerico : 0.98;
291
292 epsilon1 = (iafnumerico < 3) ? 0.95 + 0.01 * iafnumerico : 0.98;
293
294
295 epsilonNB = (ndvinumerico<0 && albedosupnumerico<0.47) ? 0.99 : epsilonNB1;
296
297 epsilon = (ndvinumerico<0 && albedosupnumerico<0.47) ? 0.985 : epsilon1;
298

```

Fig. 7 - Exemplo de condicional aplicado na linguagem *LEGAL*

No processo de cálculo da temperatura da superfície necessita-se calcular a radiação da banda 6 de forma corrigida, porém, como no presente trabalho não se obteve dados de campos para se atribuir correções, utilizou-se valores de forma a manter a mesma matriz encontrada no cálculo de radiância espectral já obtido no início do algoritmo. Assim, a temperatura foi calculada de duas formas, uma com seus valores em graus Celsius (°C), para facilitar a interpretação em um mapa temático, e a segunda em Kelvin (K), padrão utilizado em todos os cálculos que necessitem da temperatura dentro do algoritmo.

Para se alcançar os últimos dados necessários ao cálculo do saldo de radiação, foram calculadas as radiações de onda longa emitida e a radiação de onda longa incidente, nesta última existe um ponto extremamente

importante para que o algoritmo apresente dados corretos quando for aplicado, pois esta etapa leva em conta o valor do pixel frio da imagem.

No *SEBAL* a presença de tal pixel é baseada na necessidade de determinar as condições limites existentes no balanço de energia, Bastiaanssen (1995), nesta pesquisa optou-se por adotar um pixel, como proposto por Allen *et al.* (2002), que realiza a escolha do pixel frio através da análise das imagens de NDVI e IAF, procurando uma área de cultura bem irrigada e com boa cobertura vegetal. Nesta fase do algoritmo é necessário que se rode todo o processo uma vez e depois de analisada tais condições, é substituído o valor pertencente ao pixel frio em Kelvin, posteriormente o algoritmo é rodado novamente o para que os valores realmente estejam em conformidade.

Em seguida é calculada a radiação de onda curta incidente, posteriormente o valor do saldo de radiação da área de estudo é calculado.

Para a representação de todo este processo, foi gerado mapa de hipsometria através das imagens SRTM, para se mostrar a relativa regularidade hisométrica da região em análise, do albedo da superfície, do NDVI, da temperatura da superfície e, finalmente, o resultado final com o mapa do saldo de radiação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8a mostra o mapa hipsométrico da região de estudo, onde se percebe uma média de altitude em torno de 399,97 m, com pico máximo de 647,00 m e mínimo de 315,00 m. Já a Figura 8b e 8c mostram, respectivamente, o histograma da imagem e o perfil longitudinal de três cortes da área de estudo, para comprovar a característica de relevo relativamente plano, já que este é um dos pontos necessários para que se aplicar o *SEBAL*.

A Figura 9a representa a variação do albedo à superfície para a área de estudo o albedo se comporta como um controlador da quantidade de energia que é absorvida pela superfície da Terra este alcançou valor máximo para o dia 12/10/2004, data da imagem utilizada nesta pesquisa, de 0,95 e mínimo de 0,03, com médias em torno de 0,18. Analisando-se o histograma na Figura 9b, nota-se picos na faixa de 0,17 a 0,20, valores estes que se encontram de acordo com Tasumi (2003), que encontrou valores entre 0,16 e 0,24 para a área

de agricultura nos EUA e Matos *et al.* (2016) que encontrou uma média 0,23 para a região do submédio São Francisco, mostrando assim que o algoritmo está se comportando de maneira adequada e condizente com valores já encontrados.

As figuras 10a e 10b, respectivamente, representam o mapa de NDVI da área em estudo e seu histograma, o NDVI, segundo a literatura para a região de corpos d'água se mostra com valores negativos o que pode ser claramente visto no mapa, tanto na área correspondente ao rio São Francisco como aos vários açudes existentes na região. No geral, o NDVI variou entre da área de -1 e 0,84, sendo os valores superiores a 0,48 os que aparecem especificamente nas áreas de agricultura irrigada, áreas estas com maiores verdores vegetativos, Matos *et al.* (2016) encontrou valores de 0,40 para áreas de perímetro irrigado.

Nas figuras 11a e 11b observam-se a

representação através do mapa da temperatura do solo e seu histograma, com temperaturas médias em torno de 35 °C e máximas de 44 °C em uma pequena região de solo muito exposto, como visto na figura 11a.

Como resultado final do algoritmo implementado em ambiente livre, apresentam-se nas figuras 12a e 12b o mapa do saldo de radiação e seu histograma, com picos mais altos foram observados exatamente sobre os corpos d'água, obtendo valores entre 731,8 e 797,14 W.m-2, Matos *et al.* (2016) encontrou valores superiores a 650 W.m-2 para as regiões de leito de rio. As regiões com o maior valor do albedo são as que se apresentam com menores valores do saldo de radiação, abaixo de 542,4 W.m-2, que representam áreas urbanizadas e de solo exposto, como apresentado na figura 12a, valores estes condizentes com os encontrados por Matos *et al.* (2016) que encontrou mesma relação Rn Albedo.

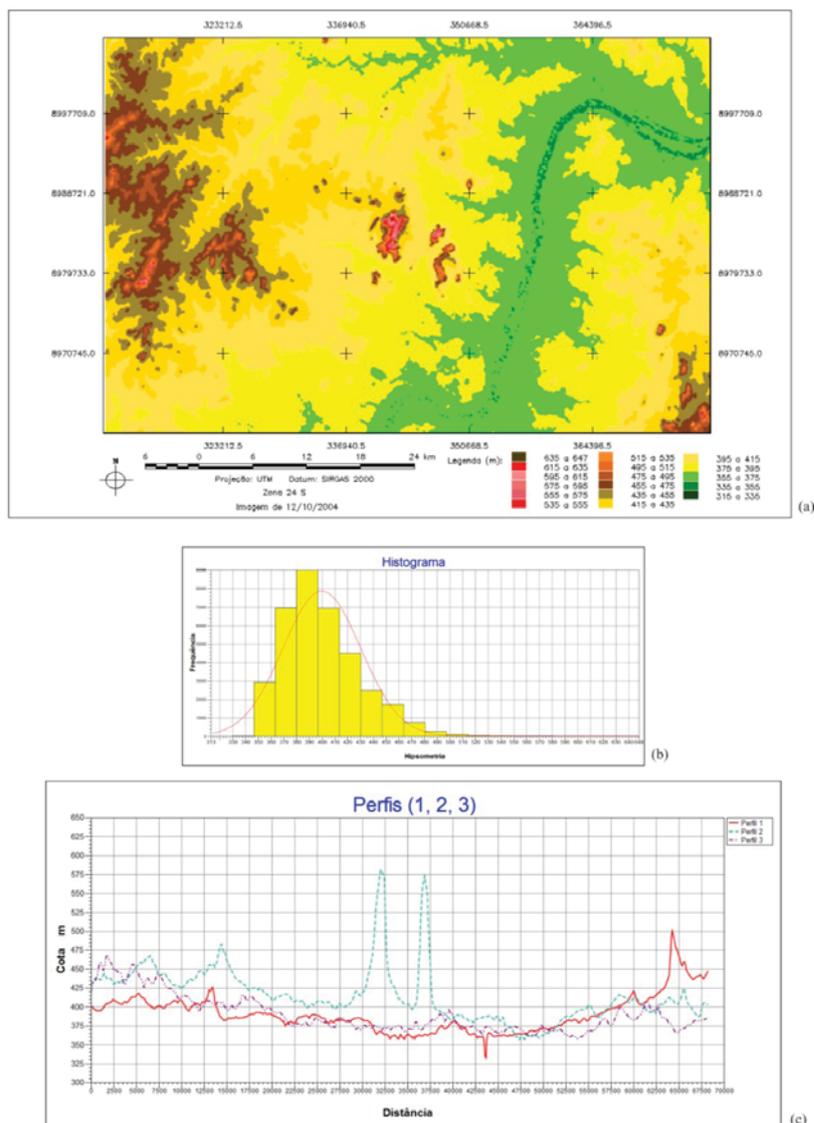
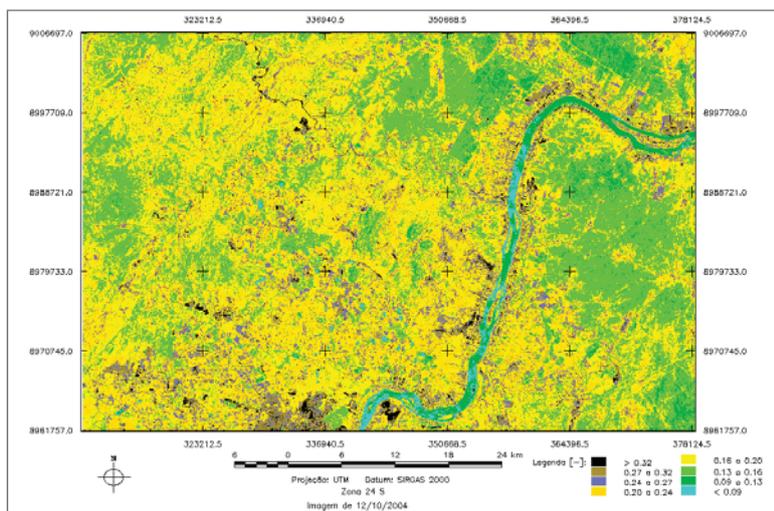


Fig. 8 - Mapa hipsométrico (a), histograma (b) e perfil longitudinal (c).

(a)



(b)

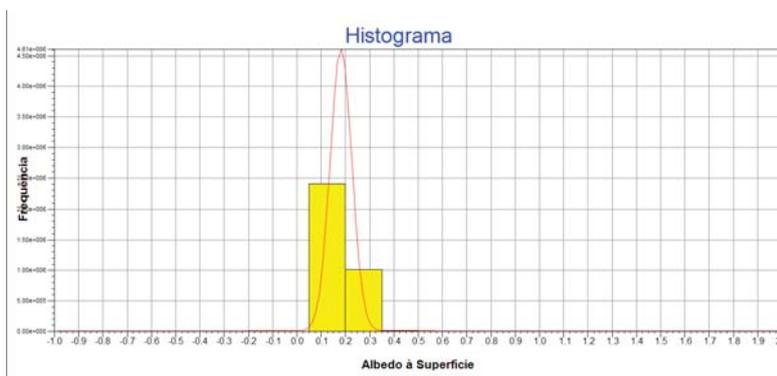
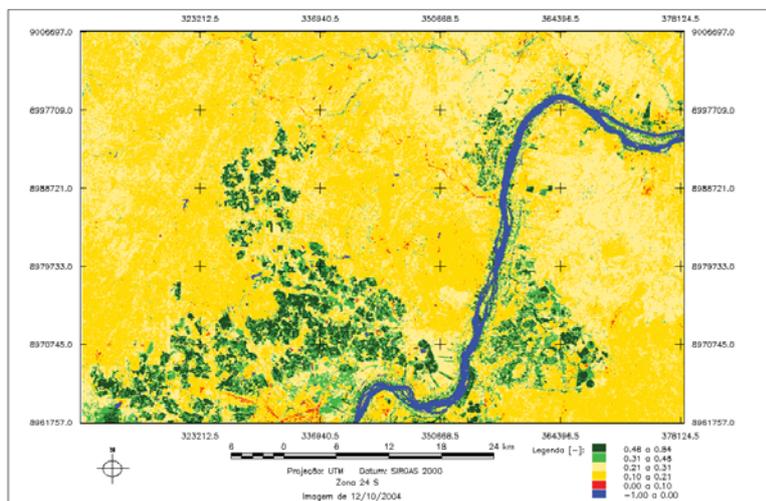


Fig. 9 - Albedo à Superfície (a) e histograma (b).

(a)



(b)

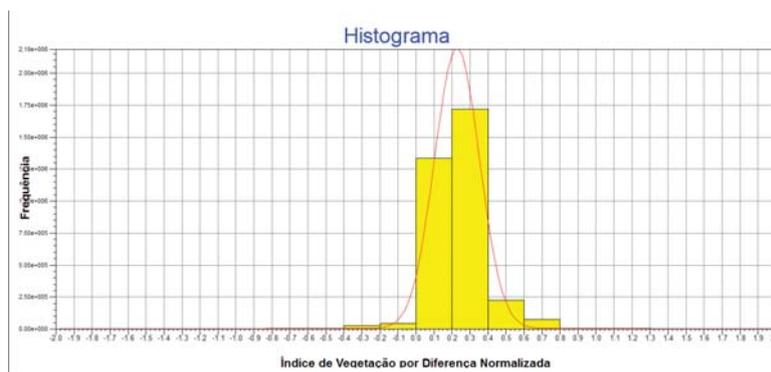
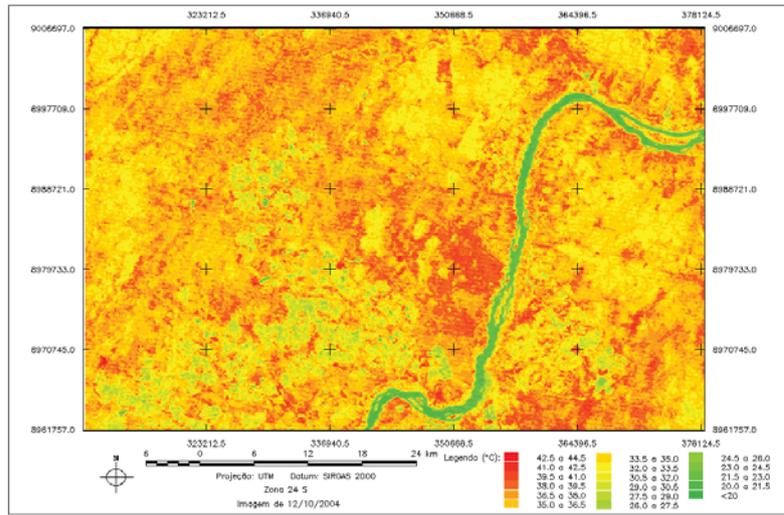


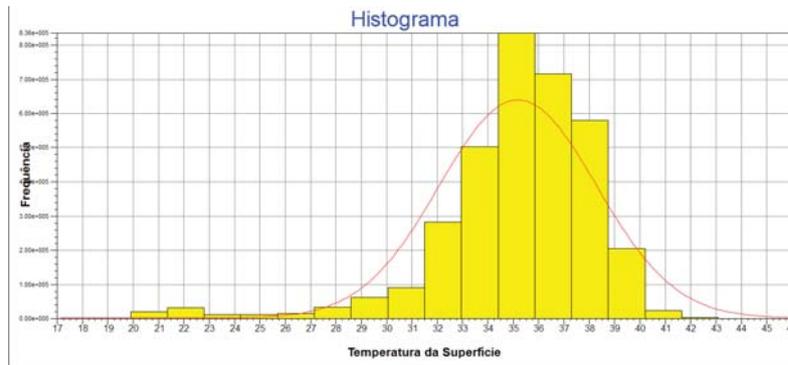
Fig. 10 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (a) e histograma (b).

Cálculo do Saldo de Radiação Pelo Algoritmo Sebal

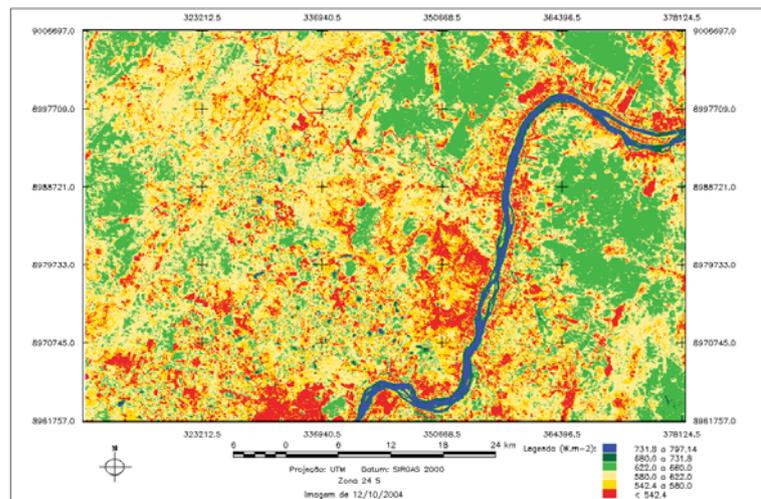
(a)



(b)



(a)



(b)

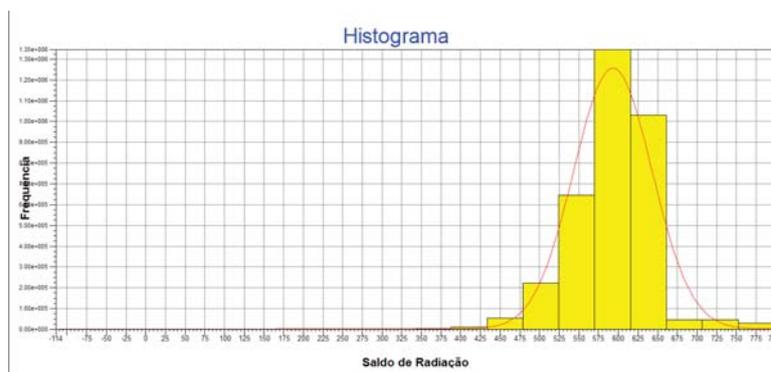


Fig. 11 - Temperatura da Superfície (a) com área pontilhada assinalando região de solo exposto e histograma (b).

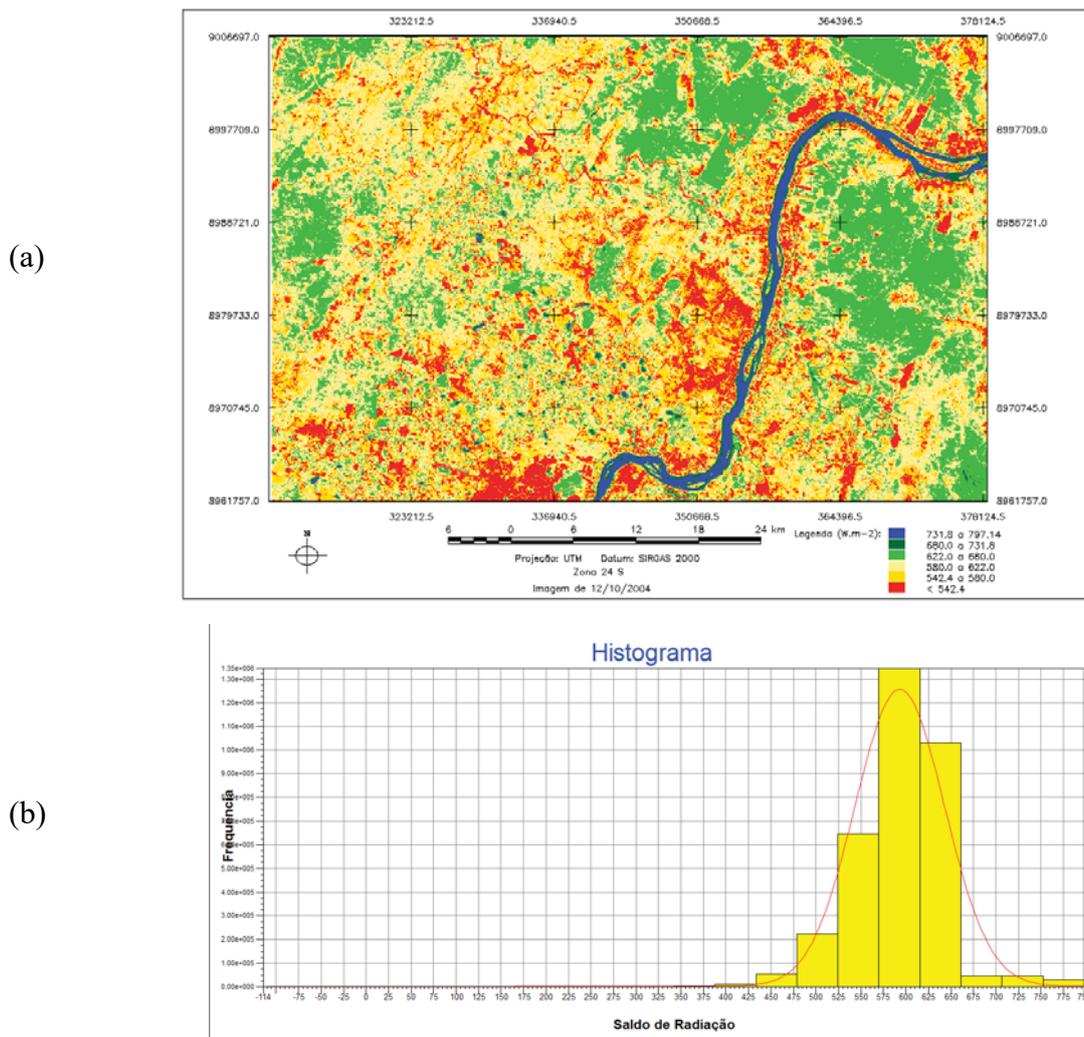


Fig. 12 - Saldo de Radiação (a) com áreas pontilhadas assinalando região urbana no canto inferior e região de solo exposto e histograma (b).

4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O objetivo primordial desta pesquisa foi implementar e analisar um algoritmo que calculasse a metodologia *SEBAL* em um *software* livre, adotando-se isso o *SPRING* (versão 5.1.8), bem como um sistema operacional igualmente livre e de código aberto *UBUNTU 11.10*, chegando-se ao cálculo do saldo de radiação.

As avaliações ocorreram em uma área com intensa agricultura irrigada, localizada entre as cidades de Petrolina e Juazeiro. Comparando-se os valores obtidos pelo algoritmo livre e outros resultados já presentes na literatura e aplicados com *software* proprietários, foi claramente percebido que o algoritmo livre desempenhou os cálculos propostos com a mesma, ou melhor, acurácia que os demais.

Os valores alcançados mostram que apesar dos dados corresponderem a um determinado

horário de passagem do satélite pela região, quando se comparam a valores da literatura obtidos, *in situ*, não possuem diferenças consideráveis, apresentando assim algoritmo implementado nesta pesquisa como uma forma mais econômica de abranger uma maior área para se aplicar tais variáveis.

Mostra-se através desta pesquisa que é extremamente viável a utilização de *softwares* e ambientes livres para trabalhos com álgebras de mapas, os mesmos demonstram eficiência e robustez de processamos iguais ou superiores quando comparados a versões proprietários. Como um ponto de melhoria, é recomendado que a sociedade acadêmica se disponha a aprimorar e alcançar outros algoritmos que não especificamente rodem no *SPRING*, mas em tantos outros bons *softwares* não proprietários existentes.

Por fim espera-se que o presente trabalho contribua de forma significativa dentro da sociedade científica tecnológica, aproveitando ao máximo os bons produtos nacionais que possuímos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G., TREZZA, R. & TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. **Advance training and user's manual**, version 1.0, pp.98, 2002.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. **Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands**, 273p, 1995.
- 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.
- 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, 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**, 212-213: 213-229, 1998b.
- CAMARA, G., SOUZA, R. C. M., FREITAS, U. M. & GARRIDO, J. *SPRING*: "Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling". **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.
- DAUGHTRY, C. S. T.; KUSTAS, W. P.; MORAN, M. S., PINTER, P. J. Jr.; JACKSON R. D.; BROW, P. W.; NICHOLS, W. D. & GAY, L. W. Spectral estimates of Net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment**, 32:111-124, 1990.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index – SAVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.
- MATOS, R. C de M.; CANDEIAS, A. L. B.; AZEVEDO, J. R. G. Estimativas do Saldo de Radiação Instantâneo no Entorno do Reservatório de Itaparica – PE com uso de Imagens Orbitais, **Revista Brasileira de Cartografia**, 68/3: 641-654, 2016.
- MARKHAM, B. L. & BARKER, J. L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.
- NICACIO, R. M. Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia *SEBAL* na bacia do rio São Francisco. Tese (Doutorado) — **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, p. 90 – 95, 2008.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A., *et al*, "The Shuttle Radar Topography Mission – A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar ISPRS", **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 57, p. 241 – 262., 2003.
- SILVA, B. B. da, 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, pp. 243 – 252, 2005.
- TASUMI, M., Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. **PhD dissertation. University of Idaho, Moscow, Idaho, EUA**, p. 20 - 25 2003.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote sensing of Environment**, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.
- TUBELIS, A., F. J. L. NASCIMENTO, AND L. L. FOLION. Estimativa da Radiação Solar Global Diária em Botucatu, SP, a partir da Insolação Solar Diária. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 26, pp.53 53-60, 1980
- VAN ZYL, J. J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, n. 5, p. 559-565, 2001.