UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

ASPECTOS TOPOGRÁFICOS NA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO SALDO DE RADIAÇÃO

ROBERTO FILGUEIRAS

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp- Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP

Fevereiro- 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

ASPECTOS TOPOGRÁFICOS NA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO SALDO DE RADIAÇÃO

ROBERTO FILGUEIRAS

Orientador: Profª. Drª. Célia Regina Lopes Zimback

Co-orientador: Dr. Antonio Ribeiro da Cunha

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp- Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP

Fevereiro - 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO – DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP – FCA – LAGEADO – BOTUCATU (SP)

Filgueiras, Roberto, 1991-
F481a Aspectos topográficos na dinâmica espaço-temporal do saldo de radiação / Roberto Filgueiras. – Botucatu : [s.n.], 2016
viii, 82 f. : grafs., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2016
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Coorientador: Antonio Ribeiro da Cunha
Inclui bibliografia

1. Radiação solar. 2. Sensoriamento remoto. 3. Processamento de imagens. 4. Análise de sistemas. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Cunha, Antonio Ribeiro da. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ASPECTOS TOPOGRÁFICOS NA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO SALDO DE RADIAÇÃO.

AUTOR: ROBERTO FILGUEIRAS
ORIENTADORA: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK
Depto de Solos e Recursos Ambientais / FCA/UNESP/Botucatu (SP)

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Depto de Solos e Recursos Naturais / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu

Prof. Dr. ANDERSON ANTONIO DA CONCEIÇÃO SARTORI
Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas / Universidade do Sagrado Coração

Botucatu, 19 de fevereiro de 2016.

AGRADECIMENTOS

À família, em especial a meus país, aos meus irmãos e a Rayssa por, mesmo distantes, estarem sempre presentes na minha vida.

Ao corpo docente, direção, administração e técnicos desta universidade por terem dado o suporte necessário na execução desta pesquisa.

À minha orientadora, Dra. Célia Regina Lopes Zimback por ter contribuído com a sua sabedoria e experiência nos assuntos relacionados ao trabalho, além das grandes lições que aprendi com ela.

Ao meu co-orientador Dr. Antonio Ribeiro da Cunha pelos conselhos e sugestões, que foram de grande valia para a conclusão do mestrado.

Aos amigos Donizeti e Tânia pelas contribuições dadas e por todo apoio durante o mestrado.

Aos amigos do Grupo de Estudos e Pesquisas Georreferenciadas – GEPAG, assim como os amigos do programa de Irrigação e Drenagem que nunca me desampararam nos momentos de dificuldades.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram na minha formação, o meu muitíssimo obrigado

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS VI

LISTA DE TABELAS VIII

1 RESUMO 1

2 SUMMARY 3

3 INTRODUÇÃO 5

4 REVISÃO DE LITERATURA 7

4.1 Sensoriamento Remoto 7

4.1.1 Conceitos 7

4.1.2 Sensores Remotos 8

4.2 Radiação solar e alvos terrestres 10

4.3 Conversão de números digitais para valores físicos 11

4.4 Correções radiométricas 12

4.4.1 Correção atmosférica 13

4.4.2 Correção topográfica 14

4.5 SEBAL 16

4.5.1 Saldo de radiação 18

4.5.2 Albedo 19

4.5.3 Índices de vegetação 20

4.5.4 Radiação de ondas curtas 21

4.5.5 Radiação de ondas longas 21

4.6 Aplicações do SEBAL 22

5 MATERIAL E MÉTODOS 25

5.1 Caracterização da Área de Estudo 25

5.1.1 Localização geográfica 25

5.1.2 Clima 26

5.1.3 Vegetação 27

Página

5.1.4 Relevo 27
5.1.5 Geologia 27
5.2 Material 28
5.2.1 Material Cartográfico 28
5.2.2 Imagens de Satélite 28
5.2.3 Dados Meteorológicos 30
5.3 Metodologia 32
5.3.1 Correção topográfica 33
5.3.1.1 Correção Cosseno 34
5.3.1.2 Correção C 34
5.3.2 Processo de obtenção do saldo de radiação 35
5.3.2.1 Calibração radiométricas 35
5.3.2.2 Albedo 39
5.3.2.3 Índices de vegetação 40
5.3.2.4 Emissividade 41
5.3.2.5 Temperatura da superfície 42
5.3.2.6 Radiação de onda longa emitida 42
5.3.2.7 Radiação de onda curta incidente 42
5.3.2.8 Radiação de onda longa incidente 43
5.3.2.9 Saldo de radiação 43
5.3.3 Método de Validação do saldo de radiação 44
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 45
6.1 Processamento das imagens para a estimativa do saldo de radiação no SEBAL 45
6.2 Saldo de radiação 47
6.3 Validação do saldo de radiação 69
6.4 Considerações finais 71
7 CONCLUSÕES 73
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74

LISTA DE FIGURAS

Página

1. Mapa de localização da Fazenda Experimental Edgardia, no município de Botucatu-SP. ...26

2. Localização das estações meteorológicas automáticas utilizadas na validação dos dados de saldo de radiação. ...31

3. Fluxograma geral dos procedimentos realizados nas imagens landsat-5/TM. ...32

4. Histograma polar do ângulo azimutal da superfície inclinada e histograma de declividade da Fazenda Experimental Edgardia. ...34

5. Fluxograma dos diferentes caminhos de obtenção do saldo de radiação, realizado na Fazenda Experimental Edgardia, no município de Botucatu-SP. ...37

6. Fluxograma da metodologia SEBAL para obtenção do saldo de radiação na Fazenda Experimental Edgardia, no município de Botucatu-SP. ...38

7. Relevo sombreado da Fazenda Experimental Edgardia, para o dia 11/09/1985. ...53

8. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f) referentes às datas de 11/09/1985, 14/09/1986. ...54

9. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 27/09/1988, 12/09/1991. ...55

10. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 30/09/1992, 20/09/1994. ...56

11. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 12/09/1997, 28/09/1997. ...57

12. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 01/08/1999, 02/09/1999. ...58

13 Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 19/08/2000, 06/08/2001. ...59

14. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 12/08/2003, 14/08/2004. ...60

Página

15. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 17/08/2005, 04/08/2006. 61

16. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 23/08/2007, 08/09/2007. 62

17. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 25/08/2008, 10/09/2008. 63

18. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a), com correção cosseno (b) e com correção C (c), referente à data de 16/09/2010. 64

19. Correlação linear entre Rg e Rn, mensurados na estação meteorológica instalada na Fazenda experimental Edgardia. 69

LISTA DE TABELAS

Página

1. Características das imagens utilizadas no estudo. 29

2. Descrição das bandas presentes no sensor TM presente no satélite landsat-5. 30

3. Especificação dos sensores automáticos usados nas estações metereológicas automática. ..31

4. Irradiância espectral média no topo da atmosfera para cada banda do sensor TM. 39

5. Estatística descritiva dos mapas de Rn para a FEE para as três metodologias abordadas no estudo.....47

6. Erro relativo médio dos saldos de radiação corrigidos topograficamente por classes de face de exposição da superfície (Leste e Sul), em funções das classes de declividades. 67

7. Erro relativo médio dos saldos de radiação corrigidos topograficamente por classes de face de exposição da superfície (Oeste e Norte), em funções das classes de declividades. 68

8. Validação dos dados de saldo de radiação estimados pelo algoritmo SEBAL com os estimados utilizando as Estações meteorológicas da FEE e FEL.....70

1 RESUMO

Devido ao fato da morfologia do terreno influenciar nas medidas radiométricas obtidas por sensores orbitais, o presente estudo teve por objetivo geral, analisar a dinâmica espaço-temporal do saldo de radiação (Rn), na Fazenda Experimental Edgárdia (FEE) pertencente a Faculdade de Ciências Agronômicas/ Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" FCA/UNESP, Botucatu-SP, levando-se em consideração a topografia da mesma, a qual apresenta relevo heterogêneo. Para essa análise foram processados dois métodos de correção topográfica, um que considera a superfície como um reflector lambertiano e outro não lambertiano. Para a estimativa do saldo de radiação, por meio das imagens orbitais, foi utilizada a metodologia do algoritmo SEBAL *(Surface Energy Balance Algorithm for Land).* Com intuito de avaliar a influência da topografia no cômputo do saldo de radiação, foram aplicadas três metodologias: sem correção topográfica (RnSem); correção cosseno (RnCos) e correção C (RnC). Essas metodologias foram aplicadas em 21 imagens da plataforma orbital Landsat-5/TM, durante os anos de 1985 a 2010. Após a correção das imagens, notou-se que as cenas correspondentes ao RnCos apresentaram sobrecorreção dos parâmetros para algumas porções das imagens, devido a essas regiões apresentarem ângulos de iluminação (γ_i), em relação a normal da superfície, superiores a 69,62°, alcançando ângulos de até 76,11°, isto é, condições de pouca luminosidade. Devido à complexidade do relevo da FEE, a correção cosseno não foi eficaz na atenuação da

influência topográfica. Já, para os valores de RnC, foi constatada uma redução média do desvio padrão de 5,97% das imagens sem correção, para as corrigidas pela correção C. Esse resultado foi atribuído como um indício da efetiva correção das cenas. Observou-se nas imagens RnSem da FEE que ocorreu uma tendência à valores elevados de saldo de radiação, de noroeste a sudeste dos mapas dos RnSem, região que encontrava-se sombreada. Essa tendenciosidade foi notoriamente reduzida nas imagens RnC, a qual foi uma comprovação qualitativa de que a correção C foi eficaz para atenuar os efeitos relativos a topografia da FEE para as imagens de saldo de radiação. Com o propósito de validar as estimações, os valores de saldo de radiação obtidos nas diferentes datas foram comparados, utilizando duas estações meteorológicas automáticas, os quais não apresentaram erros relativos maiores que 13,73%. Tais resultados evidenciam a importância da consideração do relevo, para atingir maiores precisões nas estimativas de parâmetros biofísicos com imagens orbitais e reiteram o potencial do SEBAL na estimativa de parâmetros relativos ao balanço de energia.

Palavras-chave: correções topográficas, SEBAL, parâmetros biofísicos, sensoriamento remoto.

TOPOGRAPHIC ASPECTS IN THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMIC OF NET RADIATION, 2016. 82p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Roberto Filgueiras

Adviser: Célia Regina Lopes Zimback

Co-adviser: Antonio Ribeiro da Cunha

2 SUMMARY

The measurements obtained by remote sensing are influenced by issues related to relief. Based on that, this study aim to analyze the spatial-temporal dynamic of net radiation (Rn), considering the influence of topographic parameters on it, for the experimental farm Edgárdia (FEE), belonging the FCA/UNESP, Botucatu-SP, Brazil. For this analysis it was processed two methodologies, one based in the Lambertian behavior, and the other in non-Lambertian behavior. For estimate the net radiation, by orbital images, it was utilized the metodology based on the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm. In order to assess the topographic influence on the compute of net radiation, was applied three methodologies: without topographic correction (RnSem); cosine correction (RnCos) and C correction (RnC). These methodologies were applied on 21 images of the orbital platform Landsat-5/TM, during the years of 1985, until 2010. After the corrections of the images, it noticed that the scenes corresponding to the RnCos showed overcorrection of the parameters, in some areas of the FEE. This happened because these portions showed illumination angles, in relation to the normal of surface, bigger than 69.62°, reaching angles of 76.11°, ie, conditions of low illumination. Due to complex relief of the FEE, the cosine correction did not show effectiveness on the attenuation of topographic influence for the values of RnC, were noticed an average reduction of 5.97% for the standard deviation for the values of RnC, of the images that had been corrected by the C-correction. This result was assigned as indicative of the scenes correction. It was observed on the images of RnSem of FEE that, occurred a tendency of elevated values of net radiation, located of northwest until southeast of the maps of RnSem, shaded regions. This bias was attenuated on the images of RnC, which qualitatively proved the effectiveness of the C-

correction, for the effects relief of FEE, on the net radiation images. With the purpose of validated these estimation, the net radiation values, obtained on the dates analyzed, were compared, utilizing two automatic meteorological stations. The results showed standard mean errors no bigger than 13.73%. These results show the importance of considering relief, to achieve higher accuracies on estimates of biophysical parameters with orbital images and confirm the potential of SEBAL in estimating parameters relating to energy balance.

Keywords: topographic correction, SEBAL, biophysical parameters, remote sensing.

3 INTRODUÇÃO

Conhecer o saldo de radiação é importante para se realizar um manejo hídrico adequado das culturas, além de assessorar na compreensão de inúmeros outros fenômenos da natureza. A mensuração do saldo de radiação é um passo primordial para a estimativa da evapotranspiração (ET), e determiná-la possibilita conhecer a necessidade hídrica das culturas. Podem ser encontradas diversas técnicas e equipamentos para obtê-la, porém, quando há a necessidade de estimá-la para grandes áreas, ou seja, espacializar este parâmetro para uma determinada região torna-se um desafio.

Os métodos usuais para mensurar o saldo de radiação são pontuais e válidos para áreas que não apresentem heterogeneidade da superfície terrestre. Esses, quando interpolados para áreas de abrangência regional, podem tornar-se discrepantes, acentuando os erros das estimativas, visto que, esses métodos não possuem a capacidade de considerar as diferenças presentes na superfície de forma espacial, como: regiões com água, solo exposto, vegetação, entre outras. Além disso, exige-se um grande investimento em estações agrometeorológicas (pontuais) para representar espacialmente as interpolações em grandes áreas, o que inviabiliza o cômputo desse parâmetro. Diante dessa problemática, torna-se necessário desenvolver e aplicar técnicas que auxiliem na estimativa do saldo de

radiação regional, sem a necessidade da realização de grandes investimentos para suprir a falta de dados na grande maioria das regiões brasileiras.

Assim, para analisar as variações espaciais e temporais desses parâmetros com um maior nível de detalhamento, o sensoriamento remoto orbital torna-se uma importante ferramenta, pois, este tem a capacidade de imagear coberturas de abrangência global e regional com grande rapidez e custos reduzidos, visto que, estão disponíveis para obtenção, imagens de satélites gratuitas, com médias e baixas resoluções espaciais. Desta forma, imagens de satélites associada a técnicas de sistemas de informações geográficas e algoritmos, tornam-se ferramentas imprescindíveis para suprir a escassez destes parâmetros biofísicos, principalmente, em locais que necessitam da informação destes indicadores para aperfeiçoar o uso racional da água na agricultura e, até mesmo, realizarem outros estudos ambientais.

O SEBAL *(Surface Energy Balance Algorithms for Land)* é um algoritmo usualmente aplicado para o cômputo dos componentes do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais. Este algoritmo é capaz de realizar com exatidão as estimativas dos parâmetros propostos no seu processamento. Entretanto, quando se propõem mensurar os parâmetros relativos a este complexo de equações, para áreas com relevo relativamente heterogêneo, pode acarretar uma estimativa errônea dos parâmetros, causados, principalmente, devido à diferença do ângulo de incidência solar referente à normal de cada pixel da imagem da área de estudo (variação do relevo). Para atenuar esses erros, deve-se levar em consideração a topografia do terreno no processamento do algoritmo.

Tendo como hipótese que a forma do relevo influencia nos componentes da radiação solar, este trabalho teve por objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal do saldo de radiação, na Fazenda Experimental Edgárdia da FCA/UNESP Botucatu-SP, levando-se em consideração a topografia da mesma, a qual possui diferentes relevos e considerando-se nessa análise, dois métodos de correção topográfica, um lambertiano e outro não lambertiano.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Sensoriamento Remoto

4.1.1 Conceitos

Existem diversas definições para sensoriamento remoto, propostas por diferentes autores (LORENZZETTI, 2015). Verifica-se que há confluência e divergência entre as definições propostas por esses. A diferença entre os conceitos acontece por se tratar de uma ciência com grande área de atuação e por alguns autores conceituarem a ciência de maneira ampla ou muito restrita (NOVO, 2008).

Sob o enfoque histórico, sabe-se que a expressão sensoriamento remoto foi estabelecida para retratar o desenvolvimento de uma nova tecnologia, que faz uso de equipamentos que captam imagens da superfície, a certa distância dessa. Destarte, o conceito mais difundido ou clássico para sensoriamento remoto é o de ser uma técnica de aquisição de informação dos alvos presentes na terra, sem haver contato físico entre o equipamento captador dos dados e o objeto (AGGARWAL, 2004; LILLESAND; KIEFER, 1987; LINTZ JR.: MÄTZLER, 2008; SIMONETT, 1976;). Para essa definição clássica, estabeleceram-se algumas condições, sendo a principal, que o sensor deva estar distante do alvo. Essa circunstância permite uma definição mais técnica, sendo esta gerida de acordo

com três cláusulas: a primeira, de exigência, que considera a inexistência de matéria entre o alvo e o sensor; a segunda, de consequência, aborda a possibilidade da informação de ser conduzida pelo espaço; e a última, de processo, que ressalta a radiação eletromagnética como a única forma de energia com capacidade de se transferir no espaço e, portanto, a única maneira de estabelecer ligação entre o alvo e o sensor. Seguindo esse princípio, um conceito com maior embasamento científico para o sensoriamento remoto, seria o de ser uma ciência que se destina à captação de imagens da superfície da terra, por meio da mensuração das respostas provenientes das interações da energia eletromagnética com os mais diferentes objetos presentes na superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Para Ebert (2001), o sensoriamento remoto é uma ciência que visa à obtenção de informação de um determinado alvo, sem obter contato físico com o mesmo. Esses alvos podem ser vegetações, culturas agrícolas, solos, formações rochosas, entre outras inúmeras superfícies. Essas informações adquiridas de forma remota pelos sensores são obtidas através do estudo da interação da radiação eletromagnética, emitida por fontes naturais (sol) ou artificiais (radares), com os alvos que se desejam estudar.

Já na concepção de Novo (2008), após analisar os conceitos atribuídos ao sensoriamento remoto por diversos autores, definiu esta ciência, como sendo a utilização de um conjunto de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados à bordo de espectroradiômetros de campo, aviões, satélites ou outros instrumentos, com intuito de captar a energia eletromagnética refletida ou emitida dos alvos, para tornar possível o entendimento de diversos fenômenos presentes no planeta, por meio da interação da energia eletromagnética com as mais diversas superfícies existentes.

O procedimento de aquisição de informação, intensidade de energia refletida ou emitida pelos alvos no sensoriamento remoto, é executado por instrumentos denominados sensores remotos, esses são equipamentos capazes de adquirir e compilar a radiação refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes na superfície terrestre (FLORENZANO, 2011).

4.1.2 Sensores Remotos

O sensor remoto tem como função principal, captar e quantificar a energia emitida e/ou refletida da superfície terrestre, possuindo desta forma, a finalidade de adquirir as informações a respeito da origem e/ou condições dos alvos que se desejam

estudar (EBERT, 2001). Esses também são chamados de radiômetros (radio, radiação, e metro, medida), podendo ser classificados quanto, ao tipo de produto, região espectral em que operam, quanto aos níveis de coleta de dados, resoluções dos sensores e fonte de radiação (MOREIRA, 2011).

Os sensores remotos podem ser classificados quanto ao tipo de produto, como instrumentos imageadores e não-imageadores. No primeiro estão os sensores que geram imagens a partir da interação sequencial da energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelos alvos durante a trajetória do sensor (MOREIRA, 2011). Os sensores imageadores permitem que sejam criadas imagens bidimensionais, ou até tridimensionais, da superfície em que os mesmos captam as informações. Porém, nem sempre é necessário que o produto final seja uma imagem (não-imageadores), como por exemplo, os radares altimétricos, que captam de maneira consecutiva informações de altitude ao longo de sua trajetória, por meio de um sistema de pulsos de radiação micro-ondas (LORENZZETTI, 2015; NOVO, 2008).

Os radiômetros também podem ser classificados, quanto à amplitude espectral, que os mesmos captam com relação à energia refletida e/ou emitida pela superfície. Esses possuem instrumentos capazes de registrar a radiação eletromagnética em diferentes intervalos de ondas, fazendo com que a faixa do espectro assimilada por cada um tenha características que podem ser classificados: os sensores que operam na região do visível, infravermelho próximo e médio, os que operam nas regiões do infravermelho termal e os que captam na região das micro-ondas (MOREIRA, 2011).

Essas porções do espectro, no sensoriamento remoto, são conhecidas como bandas espectrais. Quanto mais bandas um sensor possuir, mais detalhadas serão as informações que este obterá das radiações refletidas e/ou emitidas do corpo em estudo, e melhor será a resolução espectral do sensor (EBERT, 2001; MENESES; MADEIRA NETTO, 2001).

A complexidade das aquisições aumenta diretamente com a altitude da aquisição, pois, aumenta também, a quantidade de possíveis interferentes entre o alvo e o sensor, além de, não ser possível controlar as questões atmosféricas e de iluminação, podendo apenas atenuar esses fatores por meio de modelos que visam essas correções (NOVO, 2008).

Os sensores podem ser caracterizados de acordo com quatros resoluções: resolução espectral, espacial ou geométrica, temporal e radiométrica. Para a

escolha do sensor a ser utilizado em determinada pesquisa, devem-se considerar as resoluções dos sensores, para que essas se adequem da melhor forma possível ao objetivo do estudo. Existem à disposição vários satélites com diferentes resoluções, portanto, caso o objetivo seja uma observação com maior nível de detalhamento, com relação a forma e tamanho dos objetos à superfície, deve-se optar por sensores com maior resolução espacial. Por outro lado, se a intenção da pesquisa é a observação de mudanças de um determinado fenômeno, ao longo de um curto período de tempo, deve-se dar prioridade para sensores com alta taxa de revisita, ou alta resolução temporal. No caso de pesquisas voltadas para respostas espectrais mais refinadas de determinado alvo, como por exemplo, estudos que visem determinar diferentes constituintes de minerais e rochas são necessários priorizar os sensores com maiores números de bandas espectrais, isto é, os denominados hiperespectrais (MENESES; ALMEIDA 2012).

O satélite Landsat-5/TM possui as seguintes características: resolução temporal de 16 dias, resolução espacial de 30 m, para as bandas do visível e infravermelho próximo e médio, e 120 m para a banda do infravermelho termal. A resolução radiométrica da plataforma é de 8 bits, correspondendo a 256 níveis de cinza (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2014).

Os sensores que captam a energia eletromagnética proveniente do sol são denominados, quanto à fonte de radiação, como sensores passivos (AGGARWAL, 2004; MÄTZLER, 2008). Como exemplos desta categoria têm-se os satélites dos programas Landsat, Cbers e Spot (EHLERS, 2007; MOREIRA, 2011).

4.2 Radiação solar e alvos terrestres

Como os sensores passivos são dependentes de energia solar, torna-se necessário conhecer mais detalhadamente a procedência dessa energia eletromagnética e sua interação com os alvos terrestres. Essa interação da radiação eletromagnética promove diferentes comportamentos espectrais nos alvos em que esta incide.

Quando a radiação atinge uma superfície, esta pode ser absorvida, refletida, transmitida e emitida pelos alvos, sendo que cada um dos objetos, possuem uma assinatura espectral. Essa seria a quantidade de energia que cada corpo reflete ou emite em diferentes comprimentos de ondas. Estas reações espectrais, após a interação da energia eletromagnética com o alvo, variam de acordo com fatores ambientais e com

características de cada objeto. Dessa forma, conhecendo a resposta proveniente da interação da radiação com o corpo receptor, é possível identificar alvos semelhantes por meio do comportamento espectral do mesmo. Portanto, a curva espectral formada pela interação eletromagnética do alvo com o sensor, pode ser utilizada como forma de identificação remota de pontos na superfície terrestre (MOREIRA, 2001).

Nas imagens, os alvos encontrados no meio rural com maior frequência são: culturas agrícolas, pastagens, vegetações secundárias e em condições naturais, representados por diferentes aspectos de ordem evolutiva e fitofisionômicas. Outros alvos a serem considerados para a análise da interpretação da interação da energia eletromagnética no sensoriamento remoto agrícola são as superfícies de corpos d'águas e rochas, por serem também encontradas com frequência na paisagem (WATRIN; MACIEL, 2005). De acordo com Moreira (2001), para cada comprimento de onda há respostas de refletâncias diferentes entre os alvos, ou seja, cada um dos alvos (vegetação, solo, água e rocha) apresenta um comportamento espectral característico que diferencia um dos outros.

De acordo com Moreira (2007), para melhor entender como a vegetação responde à radiação eletromagnética, é necessário analisar o indivíduo que compõem esse sistema, ou seja, a planta, pois é nela onde os processos físico-químicos e biológicos ocorrem, sendo as folhas o principal órgão para compreensão da relação entre a radiação solar e a vegetação, o que resultará no comportamento espectral desse alvo. As folhas efetuam três funções fisiológicas principais: respiração, transpiração e fotossíntese. No entanto, o único processo diretamente relacionado com a radiação solar é a fotossíntese, pois os outros dois processos (respiração e transpiração) utilizam a energia resultante das reações químicas ocorrentes nas plantas, obtidas por meio da quebra das moléculas produzidas pela fotossíntese (MOREIRA, 2007).

4.3 Conversão de números digitais para valores físicos

Quando se realiza a obtenção de imagens, essas estão na forma de ND (Números Digitais), os quais não têm correspondentes físicos, ou seja, não é correta a realização de operações algébricas entre bandas utilizando os mesmos. Os valores de ND são escalonados de maneira singular entre as bandas de um mesmo sensor e entre as bandas de diferentes sensores, tendo a amplitude dos mesmos, variado de acordo com a resolução radiométrica das imagens, o que impossibilita a comparação entre bandas, visto

que, os objetos respondem de maneira singular aos diferentes comprimentos de onda (PONZONI et al., 2012).

Para solucionar esse problema, faz-se necessário a conversão desses valores (ND) para valores correspondentes que expliquem os objetos físicamente, como, por exemplo, a radiância e a reflectância. A radiância diz respeito ao brilho do objeto, estando relacionado à irradiância, ou seja, a radiação emitida pela fonte, sendo, portanto, uma característica radiométrica, o que faz com que esse parâmetro ainda não seja o mais adequado para comparação ou realização de operações entre bandas (PONZONI et al., 2012).

Dessa forma, segundo os mesmos autores, torna-se imprecindível a conversão da radiância para reflectância, principalmente, em estudos que visem a manipulação entre bandas do mesmo sensor ou de sensores diferentes. Assim, é possível realizar operações entre bandas de mesma imagem ou de imagens diferentes, visto que, esse é um parâmeto físico que está representado na mesma escala para as diferentes bandas. Porém, como esses são dados coletados a certa distância dos alvos, podem sofrer interferências. Portanto, para que ocorra a caracterização correta de alvos em diferentes datas, há a necessidade de atenuar ou corrigir as interferências externas nos dados radiométricos.

4.4 Correções radiométricas

A obtenção de valores consistentes em imagens orbitais depende da qualidade radiométrica dos dados, a qual está diretamente relacionada com as interferências atmosféricas e das condições de iluminação da superfície (áreas declivosas), no momento da passagem do satélite (LIMA; RIBEIRO, 2014; RITCHER, 1998). Assim, faz-se necessário atenuar essas interferências, principalmente, em estudos multi-temporais que estejam relacionados ao tipo de uso do solo e aos parâmetros biofísicos da vegetação. Portanto, quando o objetivo é avaliar a dinâmica de um determinado fenômeno ao longo do tempo, há a necessidade de homogenizar as condições externas à análise (CHAVEZ JR., 1988; HATSON; CHUVIECO, 2011; PONZONI et al., 2012).

4.4.1 Correção atmosférica

Para a obtenção de acurácia na estimação de parâmetros geobiofísicos é necessária a remoção de interferentes atmosféricos (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2010). Para isso, existem duas linhas, uma baseada na atenuação dos efeitos causados pelo espalhamento atmosférico e outra baseada nos modelos de transferência radiativa. Ambas as linhas são amplamente utilizadas no sensoriamento remoto orbital, apresentando vantagens e desvantagens na aplicação de uma linha sobre a outra (PONZONI et al., 2012).

O *Dark Object Substraction* (DOS) é um método de correção atmosférica baseado na primeira linha de modelos, ou seja, consideram apenas os efeitos provocados por espalhamento causado pelas moléculas de gases e por aerossóis presentes na atmosfera, esse método foi comentado e melhorado por Chavez Jr. (1988).

Grande parte dos métodos derivados do DOS supõem que existe uma grande probabilidade de ocorrer alguns *pixels* nas imagens com reflectância zero. Essa suposição foi embasada no fato de uma imagem possuir milhões de pixels e que alguns desses estariam sombreados por algum motivo (relevo, nuvem, etc). Esses pixels sombreados deveriam possuir valores de Números Digitais (ND's) iguais à zero, mas por causa do espalhamento que a atmosfera produz na radiação eletromagnética, esses não apresentam valores nulos. Logo, a diferença entre o real valor dos pixels sombreados e o valor em que esses deveriam ter (zero) é considerada como sendo as contribuições do espalhamento causado pela atmosféra para essa banda específica. Seguindo essa linha de pensamento os pixels que deveriam ter o valor zero são selecionados de acordo com o método do histograma. No método padrão do DOS são analisados um histograma por banda, visto que, esse considera que os efeitos de espalhamento são independentes entre as bandas.

Já no método proposto por Chavez Jr. (1988), denominado de *Improved Dark-object Subtraction Technique*, utiliza-se apenas o histograma de uma banda para descrever o espalhamento das demais, utilizando para isso, modelos de espalhamento atmosféricos. Os mesmos autores, utilizando como base informações apresentadas por Curcio, em 1961 e Slater, em 1983, propôs modelos de espalhamento atmosféricos baseados nas relações das condições atmosféricas e os comprimentos de ondas das bandas espectrais. Desde a proposta desse método, inúmeros trabalhos têm sido aplicados com intuito de atenuar os efeitos causados pelo espalhamento atmosféricos.

Outra correção radiométrica de grande importância, quando objetiva-se a comparação entre imagens, é a correção topográfica.

4.4.2 Correção topográfica

Há alguns anos pesquisadores em diferentes lugares do mundo vêm estudando e propondo métodos para mitigar os efeitos que a topografia do terreno tem na acurácia dos processamentos digitais, com uso de imagens de satélites (BALTHAZAR et al., 2012; KARA et al., 2014; MEYER et al., 1993; SZANTOI; SIMONETTI, 2013; TEILLET et al., 1982).

Esses efeitos podem ser observados, devido ao fato da resposta espectral captada pelo sensor, ser dependente não só das características intrínsecas dos alvos, mas também, de condições externas aos mesmos (MEYER et al., 1993). Fatores como a topografia do terreno influenciam no ângulo de incidência solar (normal de cada pixel) e no sombreamento de áreas, contribuindo negativamente na acurácia das respostas da energia eletromagnética que os sensores captam dos alvos, acarretando dessa forma, em interferências nas medições realizadas por sensoriamento remoto orbital (LIMA; RIBEIRO, 2014; TEILLET et al., 1982).

As interferências radiométricas sofridas nas imagens em áreas de relevo heterogêneo fazem com que um uma cultura homogênea possa responder de maneiras diferentes no campo, dependendo da posição que a mesma se encontra na superfície. A leitura do sensor orbital, para as áreas sombreadas, subestima a resposta espectral de um objeto, ao passo que as áreas expostas ao sol tendem a apresentar resposta inversa, para valores de reflectância (RIAÑO et al., 2003).

De acordo com Schulmann et al. (2015), um mesmo uso de solo sofre variabilidade causada pelo aspecto (azimute da superfície inclinada) e declividade, sendo um empecilho na obtenção das reflectâncias dessas superfícies.

Para atenuar os efeitos causados pela topografia, há a necessidade de calcular o ângulo de incidência solar de cada pixel (KOBAYASHI; SANGA-NGOIE, 2009; REESE; OLSSON, 2011), ou seja, angulação formada entre a superfície do terreno inclinado e os raios solares (VIANELLO; ALVES, 2012).

Este parâmetro pode ser calculado com auxílio de mapas de declividade, aspecto (azimute da superfície inclinada), ângulo zenital e azimutal solar, os

dois últimos presentes nos arquivos metadados das imagens, metodologia essa utilizada por Teillet et al. (1982), Colby (1991), Hantson e Chuvieco (2011), Balthazar et al. (2012), Szantoi e Simonetti (2013) e Moreira e Valeriano (2014), ou levando em consideração, além dos mapas de declividade e aspecto, a declinação solar do dia, a latitude de cada pixel e o ângulo horário no momento da passagem do satélite (DI PACE et al., 2008; IQBAL, 1983). Para obtenção dos dados necessários para o cálculo do ângulo de incidência solar normal de cada pixel, faz-se necessário um modelo digital de terreno (MDT) com a mesma resolução espacial das imagens a serem corrigidas (HANTSON; CHUVIECO, 2011).

Subsequente ao ângulo de incidência solar inicia-se os métodos de correção topográfica. Para isso existem vários modelos, desde os mais simples, aos mais complexos, os quais podem ser divididos em dois grupos, os que assumem a superfície como um reflector Lambertiano e os métodos que consideram a superfície como não Lambertiana (LIMA; RIBEIRO, 2014).

Um dos métodos mais difundidos é o método do cosseno, o qual foi proposto por Teillet et al. (1982). Esse método é usado frequentemente para atenuar os efeitos da iluminação da superfície em terrenos planos para estudos de séries temporais. O método do cosseno é baseado em leis físicas que assumem a superfície como um reflector Lambertiano, considerando que a irradiância incidente em um pixel é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência solar, ou seja, apenas parte da irradiância incide realmente em uma superfície inclinada (MEYER et al., 1993). Esse método apenas considera a irradiância solar direta em sua análise, não computando o irradiância difusa proveniente do céu e a irradiância refletida por *pixels* vizinhos (BALTHAZAR et al., 2012). Uma das vantagens em se utilizar esse método é a sua aplicabilidade, posto que o mesmo pode ser utilizado de maneira automática no processamento das imagens, além de, não ser necessário a estratificação dos usos da terra.

Outro método amplamente utilizado é a correção C, desenvolvido por Teillet et al., (1982), a qual se baseia na correção cosseno com a adição de um fator C, que tem por finalidade atenuar os efeitos causados pela radiação difusa incidente nos pixels e para solucionar problemas com valores pequenos de cosseno do ângulo de incidência solar, ou seja, $Cos\gamma_i$. A radiação difusa é aquela radiação que já sofreu interação com outro ponto na superfície, ou na atmosfera, e vêm a incidir novamente na superfície. O fator C, que minimiza essa questão, é derivado da regressão linear entre o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar, no horário de passagem do satélite, com as reflectâncias de

cada uma das bandas utilizadas para a data (BALTHAZAR et al., 2012; RICHTER et al., 2009). A correção C está agrupada nos métodos que consideram a anisotropia das superfícies terrestres, ou seja, os métodos não lambertianos (LIMA; RIBEIRO, 2014; RICTHER et al., 2009).

Posterior às correções radiométricas, os dados podem ser processados algebricamente, para obtenção dos parâmetros.

4.5 SEBAL

O algoritmo SEBAL é um complexo de equações que estima a evapotranspiração por meio de uma série de processamentos que geram o saldo de radiação, fluxo de calor no solo e fluxo de calor sensível. Quando gerados estes parâmetros, é subtraído do saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível e, assim, é gerado o fluxo de energia residual, ou fluxo de calor latente, que é usado para o cálculo da evapotranspiração - ET (ALLEN et al., 2002).

Para que o SEBAL estime o saldo de radiação, este requer algumas informações e pré-requisitos de extrema importância. Para o cômputo das equações do balanço de energia é importante, que a imagem esteja livre de nuvens, pois mesmo com uma fina camada nebulosa, esta pode proporcionar uma leitura inferior na banda termal e acarretar grandes erros nos cálculos. Portanto, são necessárias informações sobre as condições de nebulosidade, informações presentes no cabeçalho da imagem e informações meteorológicas (ALLEN et al., 2002).

As informações que devem ser obtidas no arquivo cabeçalho são: data e horário de passagem do satélite, latitude e longitude do centro da imagem do satélite e ângulo de elevação solar no momento da passagem do satélite. O horário de passagem do satélite, no arquivo cabeçalho, é expresso em *Greenwich Mean Time* (GMT) e deverá ser convertida para o horário local (ALLEN et al., 2002).

As informações meteorológicas necessárias para o processamento do SEBAL são: precipitação, umidade (pressão de vapor ou temperatura do ponto de orvalho), radiação solar, temperatura do ar e a velocidade do vento, isto para todo o ciclo de equações do algoritmo (ALLEN et al., 2002). Não são exigidas informações referentes às condições hidrológicas e tipo de solo, pois essas se encontram implícitas nas informações captadas pelas imagens (WATERWATCH, 2014).

O SEBAL é a culminância de anos de estudo e validação. Este tem sido comparado com métodos diferentes de estimativa da evapotranspiração, como: o método de Bowen, lisímetro de drenagem, lisímetro de pesagem, balanço hídrico e correlação de Eddy, em diversos países, localizados nos cinco continentes. Esse método foi validado em quatro dos cinco grandes grupos de classificação climática de Köppen, e tem realizado estudos de validação em mais de 15 tipos de vegetação. Nessas estão inclusas a agricultura e pastagem irrigadas, alfafa, pêssegos, tomates, beterraba, vegetação de mata ciliar, pastos, azeitonas, arroz, palmeiras, algodão, trigo, girassol, solo exposto, pastagem e floresta.

Os estudos de validação do algoritmo têm demonstrado que a variação dos valores de ET sazonais encontrados no algoritmo, quando comparados com valores de ET sazonais de medições realizadas na superfície, apresentam uma variação não maior do que 5% dos valores. Quando realizada a comparação para períodos mais curtos de tempo, aproximadamente 10 dias, as distorções estão entre 15 a 20% (SEBAL, 2013).

O SEBAL estima o saldo de radiação e a evapotranspiração real, pois considera influências da salinidade, do deficit de irrigação, de doenças nas plantas e talhões com plantas mal desenvolvidas. Esses dados são praticamente impossíveis de serem considerados em métodos usuais do cômputo da ET. Além disso, não é necessário considerar o tipo de cultura para a resolução do balanço de energia e há a possibilidade de que os dados encontrados sejam exportados para um SIG (Sistema de Informação Geográfica) e analisados conjuntamente com outros dados de interesse (SEBAL, 2013).

O processamento de todo o algoritmo é composto por 25 passos, dentre os quais, pode-se citar, saldo de radiação, evapotranspiração real, entre outros parâmetros relativos à troca de energia entre à superfície terrestre e a atmosfera. A principal fonte de informação para o processamento do algoritmo é a imagem de satélite nos comprimentos de onda do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal. O algoritmo em questão computa o balanço completo da radiação solar com resistência ao movimento, calor e transporte do vapor d'água. Estas resistências estão diretamente ligadas com as condições da área, como a condição hídrica, velocidade do vento, temperatura do ar, entre outras mudanças ao longo da mensuração (WATERWATCH, 2014).

Seguindo a mesma fonte de informação, os passos para estimativa do saldo de radiação no algoritmo, iniciam-se na conversão da radiância para parâmetros

da superfície terrestre, como a reflectância, albedo da superfície, índice de área foliar, índices de vegetação e temperatura da superfície. As informações relativas à superfície podem ser extraídas de diferentes plataformas orbitais. A escolha da plataforma dependerá da abrangência espacial e temporal necessária à pesquisa.

4.5.1 Saldo de radiação

As formas de transferência de calor (energia) são: condução, convecção e radiação. As duas primeiras necessitam de um meio material para que haja as trocas energéticas, com exceção da radiação que ocorre no espaço vazio por meio de ondas eletromagnéticas (BORGGNAKKE, 2004). O saldo de radiação (Rn) é a energia disponível no sistema, após ter sofrido as trocas radioativas, diferença entre os fluxos totais das radiações incidente e refletida pela superfície, ou seja, as radiações de ondas curtas e longas, sendo que as radiações incidentes na superfície adotam valores positivos e as radiações emitidas pela superfície, valores negativos (CUNHA et al., 2002).

Segundo a equação geral do balanço de energia (Rn=LE+H+G), Rn é dependente do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G) (CUNHA et al., 2001). O saldo de radiação é o principal responsável pelo fornecimento de energia para os processos físicos, químicos, biológicos e meteorológicos de ocorrência na superfície. Os maiores valores de saldo de radiação são observados no período diurno, devido a radiação solar e os menores valores no período noturno (BATISTA, 2011).

Existem inúmeros aparelhos e metodologias capazes de mensurar o saldo de radiação, mas, no entanto, realizam a medida de maneira pontual e, quando espacializados, os vários pontos podem apresentar erros, por não levar em consideração a heterogeneidade da superfície (CUNHA et al., 2008). Se o interesse for de estimar o fenômeno para uma abrangência regional, ou até mesmo global, os produtos provenientes do sensoriamento remoto tornam-se fundamentais, pois fornecem dados espaciais com uma alta frequência e baixo custo operacional, dependendo do sensor (DI PACE et al., 2008).

Para a estimativa do saldo de radiação, com o uso de imagens orbitais por meio do algoritmo SEBAL, são necessários os cálculos do albedo da superfície, dos índices de vegetação, das radiações de ondas curtas incidentes na superfície, das radiações de ondas longas incidentes e emitidas pela superfície, além de outros parâmetros (ALLEN et al., 2002).

4.5.2 Albedo

A parte da radiação que atravessa a atmosfera, ao atingir a superfície terrestre pode ser: absorvida, transmitida ou reflectida pelo alvo na superfície. A porcentagem de energia que será reflectida, absorvida e transmitida pelo objecto, dependerá das características desse, assim como, de fatores característicos da radiação, como o ângulo de incidência dessa na superfície. O albedo, ou reflectância hemisférica total de ondas curtas, pode ser definido como uma propriedade que um determinado objeto possui de refletir a radiação incidente, ou seja, a razão entre o total de radiação refletida, em todos os comprimentos de ondas curtas que chegam nesse objecto, com o total de radiação incidente dos mesmos comprimentos de ondas. Dessa forma, o albedo de um objeto está relacionado a radiação incidente nos objectos e as propriedades físicas dos mesmos (GASH; SHUTTLEWORTH, 1991).

De acordo com Ranson et al. (1991), o albedo é um parâmetro de grande importância no entendimento dos fenômenos climatológicas e suas mudanças globais, sendo um componente do balanço de energia na superfície. Esse parâmetro tem sido computado no sensoriamento remoto utilizando os dados de reflectância das bandas dos satélites. A validação dessa estimativa tem sido realizada em campo, utilizando dados adquiridos de pyranometros em diferentes usos da terra. Esses autores estimaram o albedo da superfície por meio de técnicas de imagens orbitais e obtiveram um erro médio quadrático absoluto não maior que 0,5%, entre medidas de campo e técnicas de cálculo do parâmetro por meio de imagens orbitais.

Estudos temporais em imagens orbitais tem estimado albedo de superfícies, com intuito de auxiliar a compreensão das ocorrências de mudanças climáticas nas regiões, como é o caso do trabalho de Matos et al. (2015). A estimativa do albedo e sua análise temporal auxilía no entendimento do comportamento do uso da terra ao longo dos anos e, consequentemente, se uma determinada área apresenta preservação ambiental, relaciona-se ao decréscimo dos valores de albedo, ou se a mesma sofre processos de degradação ao longo do tempo, relaciona-se ao aumento do albedo. O estudo desse parâmetro biofísico é recomendado em todos os monitoramentos de mudanças de superfícies da terra (ROBINOVE et al., 1981).

4.5.3 Índices de vegetação

De acordo com Jensen (2009), parâmetros biofísicos vêm sendo extraídos da vegetação por meio de sensoriamento remoto desde 1960. Esses têm como intuito extrair informações a respeito da vegetação, utilizando informações de reflectâncias das bandas espectrais das imagens de satélites. Existem inúmeros índices de vegetação, que por sua vez, utilizam a relação do comprimento de onda do vermelho e do infravermelho próximo.

O NDVI *(Normalized Difference Vegetation Index)* desenvolvido por Rouse et al. (1974) é um exemplo desses índices, o qual leva em consideração a diferença espectral do comprimento de onda do vermelho e do infravermelho próximo, sendo com isso, sensível a mudanças durante o desenvolvimento vegetativo ao longo do ciclo das plantas e, constantemente, utilizado para caracterização de parâmetros quantitativos e qualitativos da vegetação, como por exemplo o uso desse na estimativa de produtividade, na discriminação de culturas anuáis, na quantificação de radiação fotossiteticamente absorvida, entre outras finalidades (BASTIAANSSEN et al., 2000).

Devido à influência que os solos, presentes nos meatos dos dosséis vegetais, causam nas respostas de algumas análises de NDVI, Huete (1988) desenvolveu um índice de vegetação utilizando o NDVI como base. Esse índice, denominado de SAVI *(Soil Adjusted Vegetation Index)*, utiliza um fator L para atenuar as influências que os solos aparentes possam acarretar no cálculo do índice. Caso o valor de L venha a ser zero, o SAVI torna-se idêntico ao NDVI, entretanto, o valor de 0,5 tem sido encontrado constantemente na literatura (ALLEN et al., 2002), sendo observado por Huete e Liu (1994) como um valor que reduz os efeitos externos provocados pelo brilho dos solos.

Outro índice amplamente utilizado é o LAI (*Leaf Area Index*), inicialmente desenvolvido por Watson (1947), o qual faz relação entre a área foliar de uma planta, com a área usada no terreno pela mesma. Foi encontrada uma relação entre esse índice e o SAVI, passando a computá-lo no sensoriamento remoto, utilizando uma relação logarítmica entre os dois.

O NDVI, SAVI e LAI são utilizados constantemente na determinação dos componentes do balanço de radiação e evapotranspiração, pois por meio

desses pode-se inferir sobre as condições fisiológicas da vegetação e, a partir disso, correlacionar com outros parâmetros, como no caso da estimativa da radiação fotossinteticamente absorvida, da produtividade de culturas (BASTIAANSSEN et al., 2000) e no cálculo da emissividade da superfície, parâmetro esse que faz uso dos índices citados para a sua estimativa no algoritmo SEBAL (ALLEN et al., 2002).

4.5.4 Radiação de ondas curtas

O espectro de radiação proveniente do sol que propaga em direção a superfície terrestre pode sofrer nesse caminho, absorção e espalhamento. O grau em que acontecem essas interfêrencias no trajeto da radiação depende das condições em que a atmosfera encontra-se. Grande parte da radiação que atravessa a atmosfera em direção à superfície está compreendida entre os comprimentos de onda de 0,3 μm a 3,0 μm, com predominância do comprimento de onda correspondente a região do visível, mais especificamente o comprimento de 0,48 μm (GASH; SHUTTLEWORTH, 1991).

Dessa forma, a radiação de onda curta incidente é determinada por meio da radiação solar que incide à superfície, a qual corresponde a soma da radiação direta, que não sofre nenhuma interfêrencia durante a trajetória até a superfície, e a radiação difusa, que sofreu desvios durante o trajeto até a superfície (VIANELLO; ALVES, 2012). Quando a radiação incide na superfície terrestre parte dessa é refletida, proporcional ao albedo da superfície da qual a radiação incidiu (ALLEN et al., 2002).

4.5.5 Radiação de ondas longas

A radiação de ondas longas é dividida em incidente e emitida pela superfície da terra, ou seja, tanto a atmosfera quanto a superfície terrestre emitem radiação, a qual é proporcional a quarta potência da temperatura do corpo emitente. Fato esse demonstrado por Josen Stefan, em 1879 e comprovado por Ludwig Boltzman, em 1884, ficando essa relação conhecida como a Lei de Stefan-Bolztman. A energia emitida pelos corpos é representada por uma parcela da energia emitida por um corpo negro, conhecida como emissividade do corpo. As radiações emitidas pela superfície e pela atmosfera estão compreendidas no intervalo de comprimento de onda do infravermelho, devido as temperaturas dos mesmos. Logo, o saldo de radiação de ondas longas é dado pela diferença

da radiação emitida pela atmosfera com a radiação emitida pela superfície, sendo mais frequente, a superfície emitir um maior valor (VAREJÃO-SILVA, 2006).

4.6 Aplicações do SEBAL

De acordo com Bastiaanssen et al. (2000), o sensoriamento remoto tem potencialidades de ser aplicado na agricultura irrigada, com objetivos de estimar diversos parâmetros, entre os quais, estão a salinidade do solo, o coeficiente de transpiração, biomassa, produtividade das culturas, área irrigada, índice de área foliar, umidade do solo, precipitação e evapotranspiração real e potencial das culturas. Muitos desses parâmetros utilizam parte ou todas as equações presentes no SEBAL.

Estudos utilizando o algoritmo SEBAL vêm sendo realizados, desde sua proposta por Bastiaanssen (1995) e por sua formulação e validação publicada por Bastiaanseen et al. (1998a) e Bastiaanseen et al. (1998b), respectivamente. Desde então, pesquisadores do mundo inteiro tem desfrutado desse complexo de equações para estimar variáveis para suas áreas de estudos, visto o grande potencial do SEBAL para os parâmetros relativos ao balanço de energia.

Silva et al. (2005) utilizaram o algoritmo SEBAL para determinar o balanço de radiação à superfície na região de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Esses autores utilizaram duas imagens do satélite Landsat-5/TM, a primeira no ano de 2000 e a segunda no ano de 2001, e constataram que o SEBAL apresentou dados com alta consistência, quando comparados com dados mensurados no campo.

O SEBAL foi utilizado também por Di Pace et al. (2008), no mapeamento do saldo de radiação, para a região do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, região que abrange parte da área estudada por Silva em 2005. Di Pace et al. (2008) consideraram em seu estudo a topografia da superfície no cálculo dos parâmetros e concluíram que a inserção do MDE nos cálculos produz uma alteração considerável no cômputo do saldo de radiação, destacando a necessidade de considerar a topografia nesses estudos.

Menezes et al. (2009) computaram os componentes do balanço de radiação e de energia utilizando o SEBAL, para a região de Santa Bárbara, Minas Gerais. Esses autores consideraram em suas análises o relevo como sendo plano e montanhoso e constataram que as respostas provenientes do algoritmo SEBAL corroboraram com os encontrados na literatura, entretanto, em condições de relevo montanhoso, esses autores

sugeriram que os dados devem ser acompanhados de correções, validações e calibrações, devido às interferências do sombreamento em algumas áreas que não sofreram exposição da radiação solar. Dessa forma, os pesquisadores constataram que os valores obtidos para condições montanhosas requerem um olhar mais detalhado, visto que, muitas interferências causadas pela inserção do relevo, podem subestimar ou superestimar o valor da evapotranspiração.

A sazonalidade do saldo de radiação foi estudada por Lima et al. (2012), para a região da bacia do rio Paracatu, a qual está localizada nos estados de Minas Gerais e Goiás. Esses autores ressaltaram a importância do SEBAL para estimar o saldo de radiação, pois essa metodologia pode ser executada com eficiência em locais com uma fraca cobertura de estações meteorológicas, caso da região em que os autores realizaram a pesquisa.

Oliveira et al. (2014) utilizaram parte da metodologia presente no algoritmo SEBAL para o cálculo de parâmetros biofísicos e analisaram a variação espaço-temporal das áreas verdes e da qualidade ambiental, no município de Recife, Pernambuco.

O SEBAL foi usado para estimar o balanço de radiação e de energia por Sousa et al. (2015), no extremo noroeste do sertão Sergipano, no município de Canindé do São Francisco, utilizando duas imagens do Landsat-5/TM. Esses autores utilizaram parte desses dados (fluxo de calor latente) para inferir na relação do manejo da irrigação do perímetro irrigado com a precipitação dessa área.

O algoritmo SEBAL, juntamente com imagens de satélite, tem sido usado para estimar, também, a produtividade de culturas, como por exemplo, o estudo realizado por Andrade et al. (2014), que empregaram essa metodologia para estimar a produtividade de cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais. Esses autores destacaram o potencial do SEBAL para estimar esse parâmetro e pontuaram como um ponto positivo do algoritmo a possibilidade de aplicar a metodologia para áreas extensas com poucas informações meteorológicas.

Santos et al. (2014) estudaram processos de desertificação na região do município de Irauçuba, Ceará, com intuito de relacionar esses processos com variáveis ambientais (albedo da superfície, NDVI, temperatura da superfície, balanço de radiação e energia e a fração não-evaporativa), estimados por técnicas de sensoriamento remoto acopladas aos algoritmos SEBAL e S-SEBI (A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance). Os autores constataram que, em áreas onde houve

retirada da vegetação, ou seja, áreas com indícios de desertificação ou degradação ambiental ocorreram um decréscimo dos valores de saldo de radiação. Resultado adverso foi encontrado para os parâmetros fluxo de calor no solo e temperatura, simultaneamente ao déficit de umidade do solo nessas regiões.

Li et al. (2013) aplicaram o SEBAL na região noroeste do Platô Tibetano, na China, com intuito de analisar os padrões dos componentes do balanço de energia, para inferir com relação as condições hidrológicas e climatológicas do local de estudo. Esses pesquisadores, após a execução do estudo, sugeriram um projeto de restauração da flora, com plantas nativas, objetivando favorecer as condições da evapotranspiração da região pesquisada.

Pesquisas que visão o aprimoramento do modelo, também tem sido realizadas, como por exemplo, o estudo executado por Tang et al. (2013) em que analisaram, na região norte da China, qual seria o tamanho mais apropriado da área de estudo e do pixel da imagem, quando o intuito é a otimização do SEBAL na estimativa dos componentes do balanço de energia. Esses autores ainda propuseram equações que analisam o impacto das modificações das variáveis intermediárias, na estimativa dos componentes do balanço de energia, sem a necessidade de processar todo o algoritmo novamente.

Um método simplificado do SEBAL foi proposto por Zhang et al. (2011) para estimar a evapotranspiração com o uso de imagens Modis. Esses autores propuseram a determinação do fluxo de calor sensível por meio da interpolação de dados de velocidade do vento para 34 estações, com intuito de gerar um mapa de velocidade do vento e, assim, estabelecer um único pixel frio e quente para toda uma vasta área de estudo. Os resultados foram comparados com o método de Tasumi (2003), o qual separa a grande área em várias áreas pequenas e processa o modelo SEBAL para cada uma dessas áreas. Os resultados obtidos por esses autores indicaram um forte coeficiente de determinação (r^2 =0,966) entre os dois métodos, indicando que o método simplificado, proposto por esses autores, apresenta potencial de aplicação.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da Área de Estudo

5.1.1 Localização geográfica

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental Edgardia, localizada no município de Botucatu, estado de São Paulo (Figura 1). Esta pertence à Faculdade de Ciências Agronômicas, da Universidade Estadual Paulista (FCA/UNESP), apresenta uma área de 1.200,32 ha, com altitude variando entre 475 a 725 metros. A área é limitada pelos pares de coordenadas geográficas sexagesimais: 48°25'36,25"W e 22°48'2,80"S; 22°49'52,36"S e 48°22'37,46"W, DATUM WGS - 84.

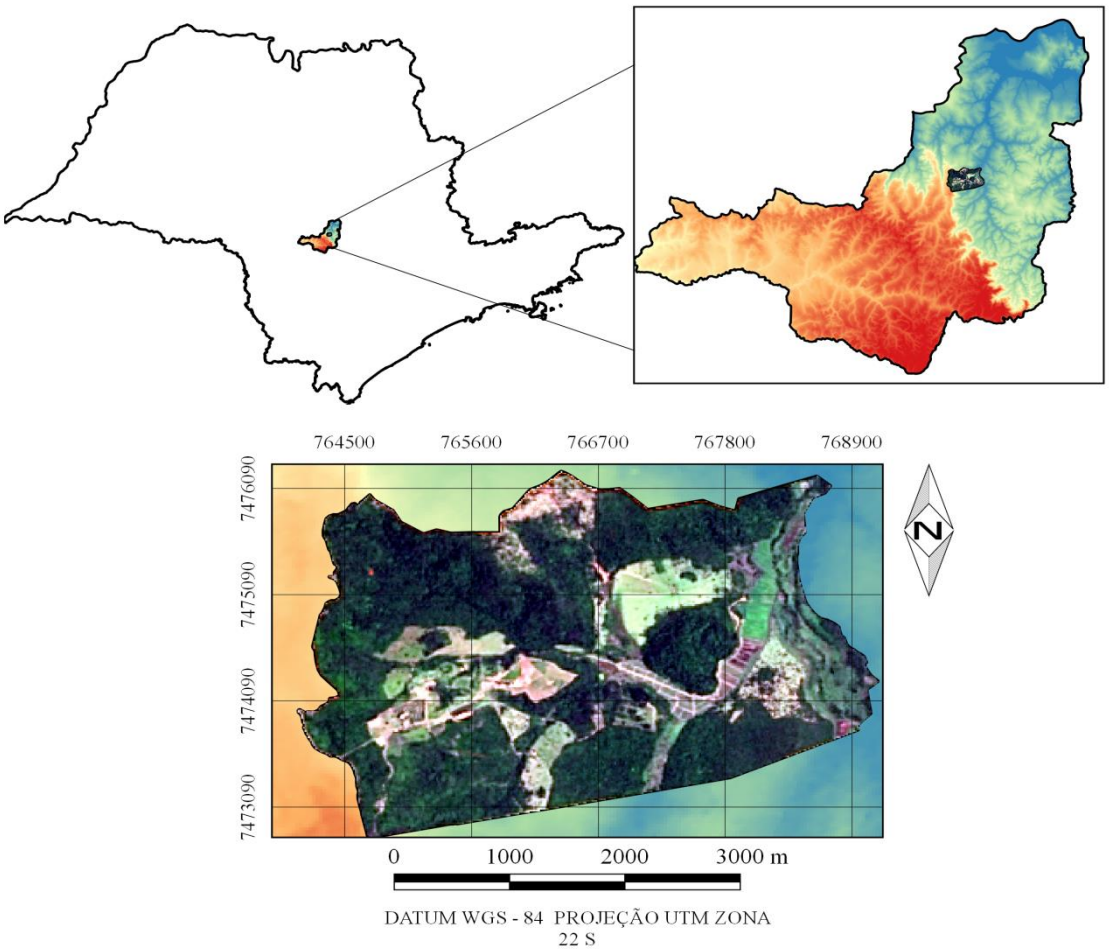


Figura 1. Mapa de localização da Fazenda Experimental Edgardia, no município de Botucatu-SP.

5.1.2 Clima

De acordo com Cunha e Martins (2009), o clima da região é Cfa, temperado quente (mesotérmico) úmido, com uma temperatura média anual de 20,3 °C e uma precipitação média anual de 1.428 mm. A temperatura média anual do mês mais frio (Julho) igual a 17,1 °C, e do mês mais quente (Fevereiro), 23,1 °C. Durante a série temporal estudada (36 anos) para a classificação climática, os mesmos autores constataram que os meses com características pluviométricas extremas são, o mês de Janeiro (mais chuvoso) e o de Agosto (mais seco).

5.1.3 Vegetação

De acordo com Carvalho et al. (1991), há ocorrência de excedentes de formações vegetais nativas na Fazenda Experimental Edgardia, representadas pelas fitofisionomias de floresta, cerrado e campo. Jorge e Sartori (2002) estratificaram a ocupação florestal da Fazenda Experimental em duas classes, Floresta Estacional Semidecidual e Cerradão, as quais apresentaram aumento de área durante a análise temporal (1978 a 1997) realizada por esses autores. A primeira classe ocupava uma área de 437,04 ha em 1978 e passou a ocupar uma área de 613,99 ha em 1997. Já, a segunda classe florestal ocupava em 1978 uma área de 120,07 ha, passando a ocupar em 1997 uma área de 132,79 ha. Esses autores destacam a ocorrência de vegetação natural na frente da Cuesta inserida no perímetro da Fazenda Experimental.

5.1.4 Relevo

A Fazenda Experimental Edgardia apresenta grande amplitude nos valores referentes à altitude (geoidal). São encontrados valores no entorno do rio Capivara de aproximadamente 475 m, local caracterizado por relevo plano, com declividade variando de 0 a 3 %, com ocorrência de Neossolos Flúvicos e Gleissolos (atualizado de acordo com normas da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária - EMBRAPA, 2013). No sentido da Cuesta, a declividade torna-se, gradativamente, mais elevada. O relevo plano da várzea modifica-se para suave ondulado e ondulado, variando os valores de altitudes entre 475 a 650 metros, apresentando classes de declive de 3 a 20%, ocorrendo Latossolos e Argissolos. Já, na Cuesta, o relevo torna-se forte ondulado, caracterizados por Neossolos Litólicos e declividade de 20 a 45%, ocorrendo relevos com declives superiores a 45%, quando há ocorrência de afloramento de rochas (CARVALHO et al., 1991).

5.1.5 Geologia

De acordo com o mapa geológico do estado de São Paulo, na área de estudo ocorrem as Formações geológicas Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, pertencentes ao grupo São Bento, de ocorrência do período Triássico e Jurássico a Cretáceo, da Era Mesozóica (LANDIM, 1984).

A Formação Pirambóia é composta por depósitos fluviais, sendo encontrados arenitos finos a médios, avermelhados, síltico-argilosos com estratificação cruzada ou plano-paralela, com níveis de folhelhos e arenitos argilosos de cores matizadas e pouquíssimas intercalações de natureza areno-argilosa. Já, a Formação Botucatu apresenta arenitos eólicos avermelhados, com uma granulometria de fina a média (LANDIM, 1984).

A Formação Serra Geral, é constituída por rochas vulcânicas apresentando uma coloração em tons de cinza a negro, com cristais de pequenas dimensões, sem forma definidas, caracterizando assim uma textura afanítica. (LANDIM, 1984).

5.2 Material

Todo o processamento dos dados, assim como a elaboração do banco de dados da pesquisa, foi realizado utilizando como ferramentas de apoio os sistemas de informações geográficas: Sistema de Processamento de Informações Geográficas SPRING 5.1.8 (CÂMARA et al. 1996); *Geographic Resources Analysis Support System* GRASS GIS 7.0 (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2015) e QGIS 2.8 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015).

5.2.1 Material Cartográfico

Foi utilizado como material cartográfico a carta planialtimétrica do Instituto Geográfico Cartográfico, do Estado de São Paulo, folha SF-22-Z-B-VI-3-NO-D com escala de 1:10.000 com equidistância vertical entre as curvas de nível de 5 metros.

5.2.2 Imagens de Satélite

Para a realização do estudo foram utilizadas 21 imagens (Tabela 1) do satélite LANDSAT-5, sensor TM *(Thematic Mapper)*, em dias de céu claro, correspondendo a órbita/ponto 220/076, segundo o sistema de notação global de aquisição de dados WRS-2 *(Worldwide Reference System)* do programa Landsat. As imagens foram adquiridas no banco de dados da USGS *(United States Geological Survey)*, as quais se

encontravam ortorretificadas ao nível de processamento *Standart Terrain correction Level 1T* ou *Level 1G* (EUA, 2014a*).*

Tabela 1. Características das imagens utilizadas no estudo

Data	Dia Juliano	Quantidade de nuvens	Ângulo azimutal	Ângulo de elevação solar	Horário de passagem
11/09/1985	254	1%	57,582221	44,379727	09:39:52
14/09/1986	257	0%	60,373394	43,498855	09:31:06
27/09/1988	271	0%	63,492553	49,529615	09:41:11
12/09/1991	255	0%	59,017933	43,424096	09:34:23
30/09/1992	274	13%	66,612381	48,552371	09:32:18
20/09/1994	263	0%	63,443100	44,447519	09:26:57
12/09/1997	255	4%	57,305842	45,293179	09:42:52
28/09/1997	271	4%	63,320894	50,236599	09:43:19
01/08/1999	213	24%	45,006724	34,822973	09:48:14
02/09/1999	245	0%	52,890045	42,970770	09:47:41
19/08/2000	232	15%	49,213651	39,207511	09:48:14
06/08/2001	218	1%	45,584059	36,380783	09:50:51
12/08/2003	224	7%	47,508150	37,096533	09:47:26
14/08/2004	227	0%	46,787438	38,823931	09:53:31
17/08/2005	229	0%	46,329274	40,366362	09:58:34
04/08/2006	216	29%	42,195881	37,981874	10:03:49
23/08/2007	235	2%	46,308687	42,855137	10:03:49
08/09/2007	251	0%	50,802846	47,798591	10:03:41
25/08/2008	238	0%	48,877939	42,353729	09:56:11
10/09/2008	253	1%	53,725209	47,215360	09:55:44
16/09/2010	259	5%	54,396282	49,899622	10:00:43

A plataforma Landsat-5 foi lançada no dia 1 de março de 1984 pela NASA *(National Aeronautics and Space Administration)* na base de lançamento de Vandenberg, na Califórnia, Estados Unidos. Essa percorreu o globo terrestre durante 29 anos, tendo sua missão terminada no dia 5 de junho de 2013, quando a equipe responsável realizou o último comando ao satélite, desligando o mesmo (USGS, 2013). Esse possuía

dois sensores a bordo, o MSS *(Multispectral Scanner*), que foi desativado em 1995 e reativado em 2012, captando imagens até janeiro de 2013 e o TM (Thematic Mapper) que foi desativado em novembro de 2011 (EUA, 2014b). O satélite encontrava-se em uma órbita quase polar, heliossíncrona, com inclinação de 98,2°, realizava 14,5 órbitas por dia a uma altitude de 705 km, com um período de revisita de 16 dias (EUA, 2015; LOVELAND; DWYER, 2012). O sensor utilizado no estudo foi o TM, o qual possui sete bandas espectrais, caracterizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição das bandas do sensor TM presente no satélite landsat-5

Landsat-5			
Bandas	**Espectro**	**Resolução espacial (m)**	**Comprimento de onda (µm)**
Banda 1	Azul	30	0,45-0,52
Banda 2	Verde	30	0,52-0,60
Banda 3	Vermelho	30	0,63-0,69
Banda 4	Infravermelho Próximo	30	0,76-0,90
Banda 5	Infravermelho Médio	30	1,55-1,75
Banda 6	Infravermelho Termal	120	10,4-12,5
Banda 7	Infravermelho Médio	30	2,08-2,35

Fonte: adaptado EUA (2014c).

5.2.3 Dados Meteorológicos

Para a validação dos saldos de radiação obtidos utilizando as imagens de satélite, para o estudo, fez-se necessário o uso de duas estações meteorológicas (Figura 2). Uma presente na área na Fazenda Experimental Edgardia (FEE) da FCA/UNESP, coordenadas 766.767 m E e 7.474.671 m N e altitude ortométrica de 652 m, projeção UTM zona 22S Datum WGS-84, e outra localizada na Fazenda Experimental Lageado (FEL) da FCA/UNESP, coordenadas 763.588 m E e 7.471.166 m N e altitude ortométrica de 787 m, projeção UTM zona 22S Datum WGS-84. Ambas as estações são da Campbell Scientific Inc., sendo a estação meteorológica da FEL modelo CR21X e a estação meteorológica da FEE modelo CR23X. As duas estações possuem em seu interior um elemento sensor Termopilha, modelo CM3, com resolução de 0,01 MJ m^{-2}, da Kipp &

Zonen. Somente a estação FEE possue um elemento sensor Termopilha com resolução de 0,01 MJ m^{-2}, modelo NR LITE da Kipp & Zonen, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Especificação dos sensores automáticos usados nas estações meteorológicas automáticas

Elemento meteorológico	Elemento sensor	Resolução	Fabricante	Modelo
Tar	Termistor	0,1 ºC	Vaisala	HMP45C
URar	Capacitor	0,2 %	Vaisala	HMP45C
Pp	Pulso eletrônico	1 %	Texas	TE 525
Rg	Termopilha	0,01 MJ m^{-2}	Kipp & Zonen	CM3
α	Termopilha	0,01 MJ m^{-2}	Kipp & Zonen	CM3
Rn*	Termopilha	0,01 MJ m^{-2}	Kipp & Zonen	NR LITE
Ts	Termopar (Cu-Co)	0,1ºC	-	-

* Somente para a estação FEE

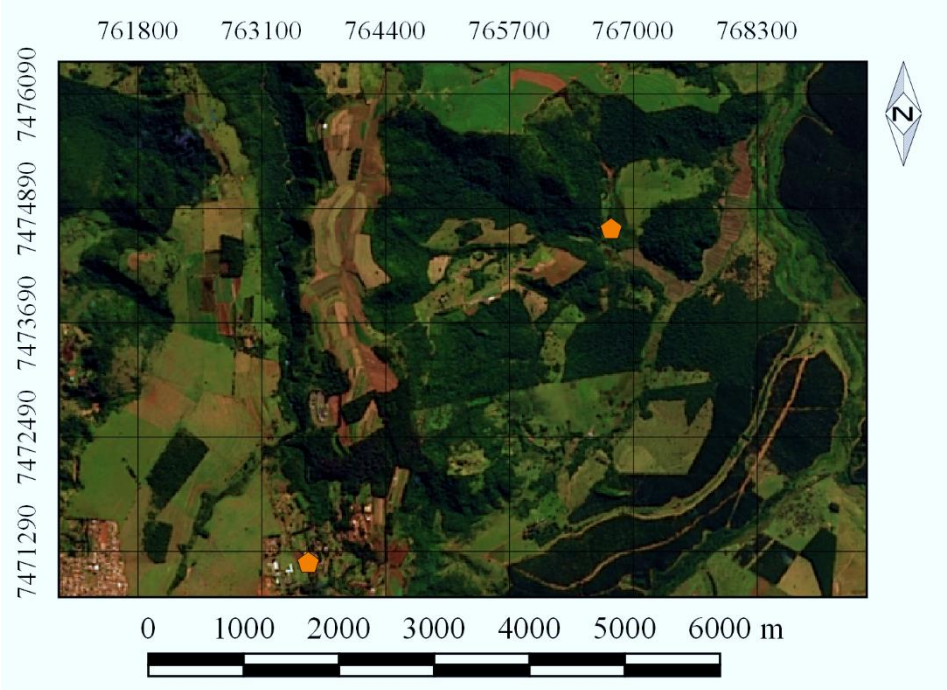


Figura 2. Localização das estações meteorológicas automáticas (⬟) utilizadas na validação dos dados de saldo de radiação.

5.3 Metodologia

Para compreensão dos procedimentos realizados na pesquisa, bem como a ordem em que esses foram executados, apresenta-se o fluxograma geral na Figura 3.

A estimativa da série espaço-temporal de saldo de radiação foi processada em três etapas, uma sem as características topográficas do terreno, ou seja, sem os produtos derivados do modelo digital de elevação e duas outras com a utilização dos mesmos. Dessa forma, foram aplicados nas imagens dois métodos de correção topográfica, o método do cosseno e o da correção C, ambos desenvolvidos por Teillet et al. (1982).

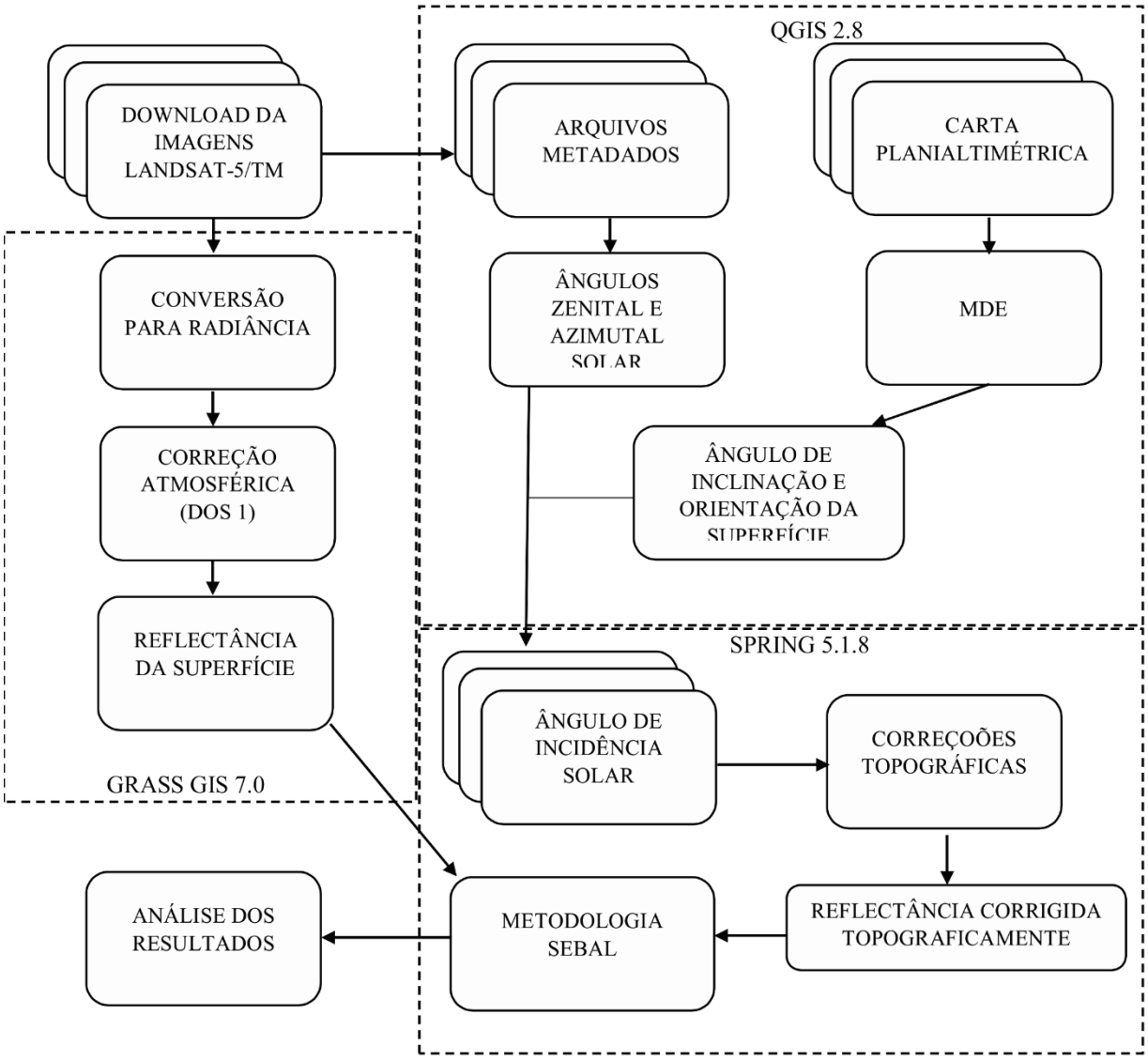


Figura 3. Fluxograma geral dos procedimentos realizados para obtenção do saldo de radiação a partir das imagens landsat-5/TM e carta planialtimétrica.

5.3.1 Correção topográfica

As correções topográficas foram aplicadas nos dados de reflectância da superfície de todas as bandas, exceto da banda 6 relativa ao comprimento de onda do termal, das 21 imagens da série temporal.

Primeiramente, para realização do processo de correção topográfica nas imagens, fez-se necessário o cálculo do ângulo de incidência solar, o qual é relativo à normal de cada pixel da superfície. Para isso, foi necessário a construção de um modelo digital de elevação, elaborado a partir da carta planialtimétrica do IGC, na escala de 1:10.000. Para a elaboração do modelo foi necessário a vetorização das curvas de níveis da área de estudo, para que em seguida, fosse utilizado o método de interpolação TIN *(Triangular Irregular Network)*, com resolução espacial compatível às imagens do sensor TM. Posterior a obtenção do MDE, foi necessário gerar produtos derivados do mesmo, sendo estes, o ângulo de inclinação e o ângulo azimutal da superfície inclinada, ambos calculados de acordo com a metodologia de Horn (1961). O ângulo de incidência solar, para cada pixel, foi computado de acordo com a Equação 1 (COLBY, 1991; MOREIRA; VALERIANO, 2014).

$$\mathrm{Cos}\gamma_i = \cos\theta_s \cos\eta_i + \operatorname{sen}\theta_s \operatorname{sen}\eta_i \cos(\phi_a - \phi_o) \qquad (1)$$

em que θ_s representa o ângulo zenital solar, no momento da passagem do satélite; η_i o ângulo de inclinação da superfície; ϕ_a o ângulo azimutal solar e ϕ_o o ângulo de orientação da superfície inclinada. Os ângulos azimutal e zenital solar foram obtidos nos arquivos metadados das imagens, considerando um único par de ângulos para cada imagem, visto que os mesmos variam pouco em uma cena do sensor TM do satélite Landsat-5 (HANTSON; CHUVIECO, 2011). A distribuição do ângulo azimutal da superfície inclinada (aspecto) e da declividade na área de estudo está apresentada na Figura 4.

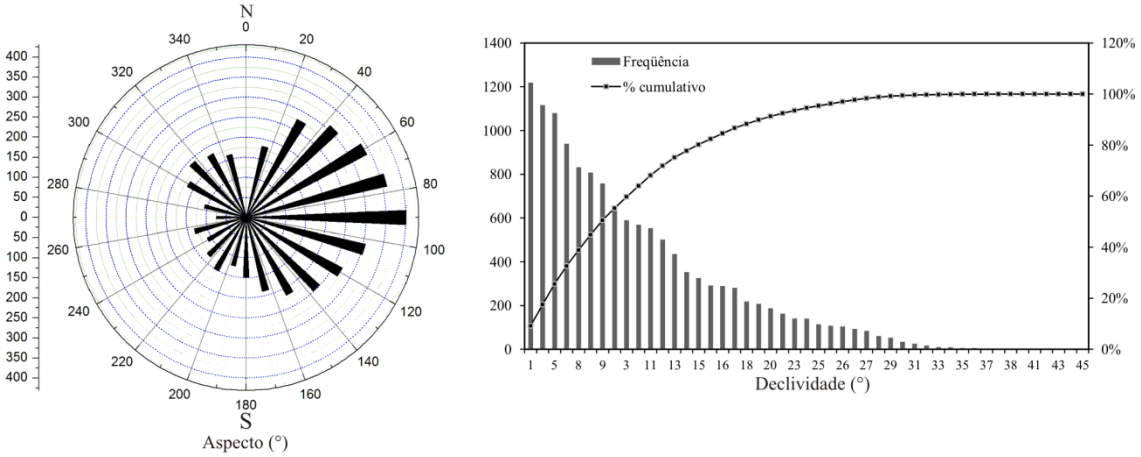


Figura 4. Histograma polar do ângulo azimutal da superfície inclinada e histograma de declividade da Fazenda Experimental Edgardia.

5.3.1.1 Correção Cosseno

A correção Cosseno foi uma metodologia proposta por Teillet et al. (1982) e desde então tem sido utilizada para correção topográfica em imagens de satélite. A obtenção das imagens corrigidas por esse método foi realizada de acordo com a Equação 2.

$$\rho_h = \rho_T\left(\frac{\cos\theta_z}{\cos\gamma_i}\right) \qquad (2)$$

em que ρ_h é definido como sendo a reflectância em uma superfície horizontal, isto é, após a remoção dos efeitos topográficos; ρ_T a reflectância em superfície com a interferência do relevo, ou seja, antes do processo de correção topográfica; θ_z o ângulo zenital solar, no momento da passagem do satélite e γ_i o ângulo de incidência solar para cada ponto na superfície terrestre.

5.3.1.2 Correção C

A correção C é uma metodologia semi empírica proposta por Teillet et al. (1982) similar à correção Cosseno, porém, utiliza um fator C para considerar a irradiância difusa incidente na superfície. A metodologia da correção C pode ser aplicada por meio da Equação 3.

$$\rho_h = \rho_T\left(\frac{\cos\theta_z + C}{\cos\gamma_i + C}\right) \qquad (3)$$

onde o fator C é uma constante (Equação 4) derivada da correlação entre $Cos\gamma_i$ e cada uma das bandas espectrais das imagens utilizadas no estudo, sendo necessário estratificar por data das imagens as superfícies com similaridade espectral.

$$C = \frac{b}{m} \quad (4)$$

sendo m o coeficiente angular da equação gerada a partir da correlação entre os dois fatores e b o intercepto no eixo y dessa correlação (Equação 5).

$$\rho_T = m\cos\gamma_i + b \quad (5)$$

em que ρ_T é a variável dependente e $Cos\gamma_i$ a variável independente.

Para estratificar as superfícies com maior similaridade espectral em cada data, utilizaram-se imagens NDVI, para as 21 datas, em que se estabeleceu um limiar de 0,4 como sendo a mudança, de ausência para a presença de vegetação em um pixel, metodologia essa utilizada nos trabalhos de Hantson e Chuvieco em 2011; Lima e Ribeiro em 2014.

5.3.2 Processo de obtenção do saldo de radiação

Para obtenção do saldo de radiação foram utilizadas as bandas do azul (B1), verde (B2), vermelho (B3), infravermelho próximo (B4), infravermelho médio (B5 e B7) e infravermelho termal (B6) das imagens do sensor TM – Landsat-5, sob condição de céu claro. Uma vez disponibilizados os dados referentes às imagens, procedeu-se com a conversão dos ND para correspondentes físicos, necessário para a estimativa espaço-temporal dos parâmetros.

5.3.2.1 Calibração radiométricas

A calibração radiométrica consiste na conversão dos ND de cada pixel da imagem em valores físicos. Primeiro, faz-se necessário à conversão dos valores em radiância espectral monocromática. Este parâmetro foi obtido segundo a Equação 6.

$$L_{\lambda i} = L_{mini} + \frac{(Lmaxi - Lmini)}{(Qmaxi - Qmini)} X\ ND \quad (6)$$

em que: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral monocromática em W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}; L_{maxi} e L_{mini} são as radiâncias máxima e mínima; Q_{maxi} e Q_{mini} são as radiâncias máxima e mínima escalonada em ND; i refere-se ao número da banda utilizada. Todos esses parâmetros estão nos arquivos metadados de cada imagem. Após o cálculo da radiância monocromática, fez-se necessário o cálculo da reflectância (Equação 7), neste caso, da superfície, visto que, juntamente a esse passo corrigiram-se as interferências da atmosfera, pelo método DOS1, para todas as bandas, excluindo apenas as termais, bandas 6, desta etapa.

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi . L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} . \cos \theta s . dr} \qquad (7)$$

em que $\rho_{\lambda i}$ refere-se a reflectância monocromática da superfície; $K_{\lambda i}$ é a irradiância solar média da atmosfera para cada banda, de acordo com Tabela 3; θ_s remete-se ao ângulo zenital solar no momento da passagem do satélite; dr é o quadrado da razão da distância média terra sol $(\overline{D})$com distância terra sol (D_n) da data da imagem, em unidades astronômicas, calculado de acordo com Equação (8) desenvolvida por Spencer (VIANELLO; ALVES, 2012).

$$\left(\frac{\overline{D}}{D_n}\right)^2 = 1{,}000110 + 0{,}034221 \cos x + 0{,}001280 \sin x + 0{,}000719 \cos 2x + 0{,}000077 \sin 2x \qquad (8)$$

onde que x está representa em radianos e pode ser calculado pela Equação 9, em que n representa o dia Juliano (Tabela 1) correspondente a data da imagem.

$$x = \frac{2\pi(n-1)}{365} \qquad (9)$$

Ressalta-se também, que os métodos de correções topográficas foram aplicados posterior a obtenção da reflectância, ramificando a pesquisa em três linhas (Figura 5): saldo de radiação sem correção topográfica (RnSem); saldo de radiação com correção cosseno (RnCos) e saldo de radiação com correção C (RnC).

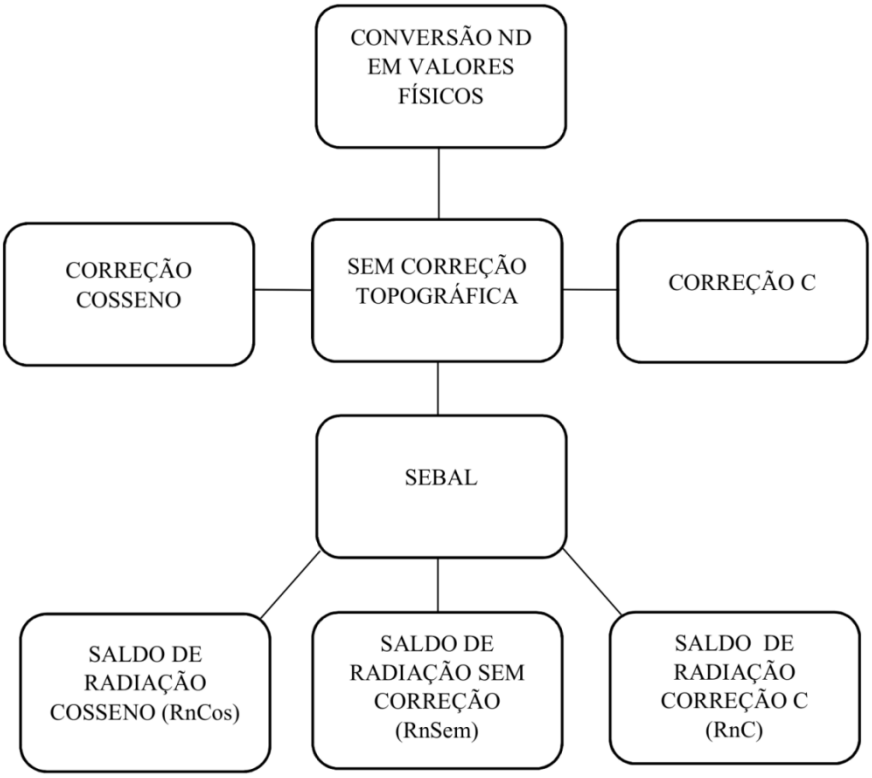


Figura 5. Fluxograma dos diferentes caminhos de obtenção do saldo de radiação, realizado na Fazenda Experimental Edgárdia, no município de Botucatu-SP.

Após a estratificação das metodologias de correção topográfica deu-se procedimento à obtenção do saldo de radiação nas diferentes metodologias, utilizando para isso a metodologia do SEBAL, processo demonstrado por meio de um fluxograma na Figura 6.

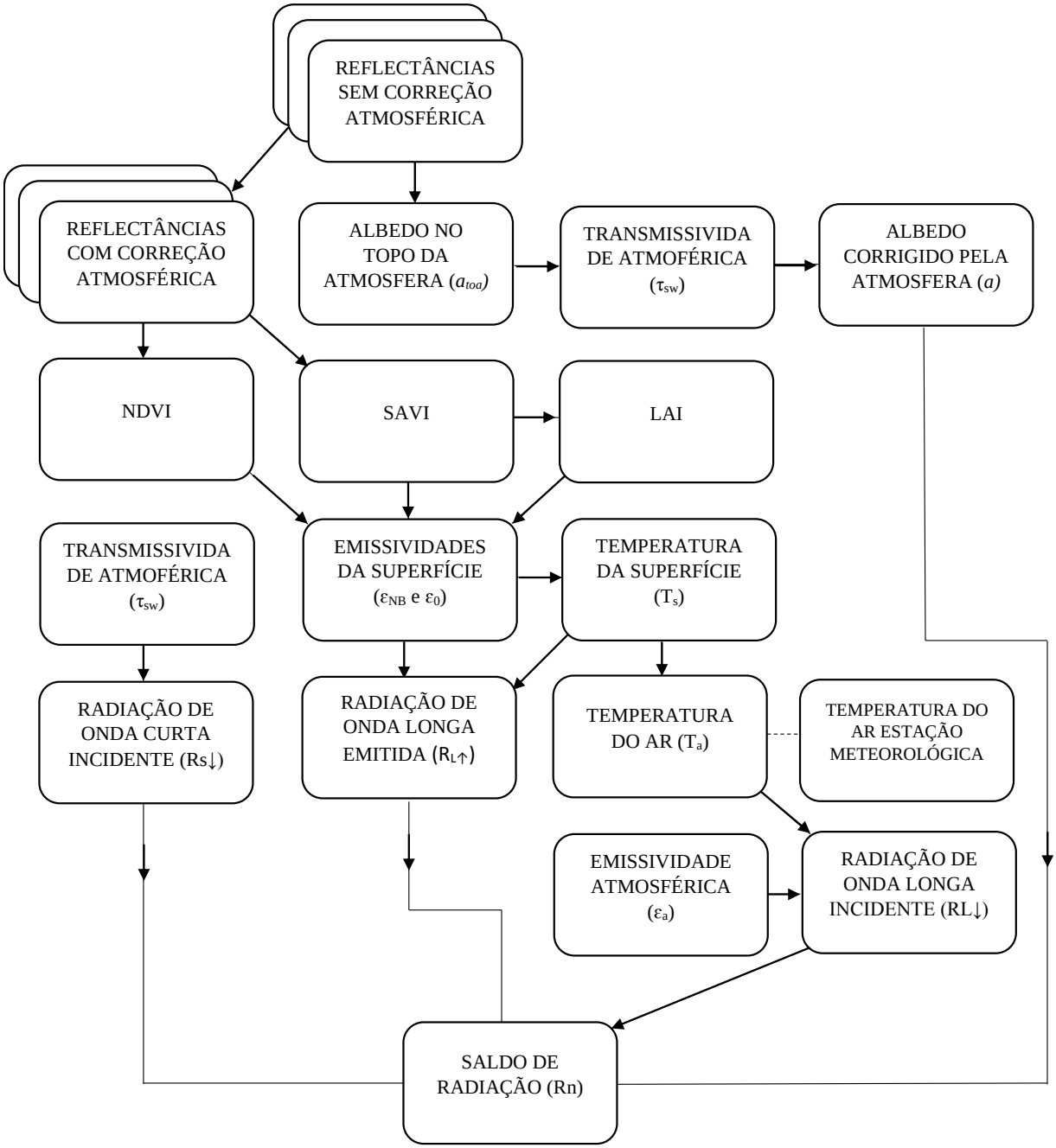


Figura 6. Fluxograma da metodologia SEBAL para obtenção do saldo de radiação na Fazenda Experimental Edgardia, no município de Botucatu-SP.

Observados os passos da metodologia aplicada, segue abaixo os detalhes da obtenção de cada parâmetro apresentado no fluxograma da Figura 6.

5.3.2.2 Albedo

O albedo planetário (Equação 10) foi obtido com base nas refletâncias das bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7), segundo procedimento utilizado por Allen et al. (2002).

$$\alpha_{toa} = 0{,}293\rho_1 + 0{,}274\rho_2 + 0{,}233\rho_3 + 0{,}157\rho_4 + 0{,}033\rho_5 + 0{,}011\rho_7 \qquad (10)$$

onde: ρ_1, ρ_2, ρ_3, ρ_4, ρ_5 e ρ_7 são as reflectâncias monocromáticas das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, respectivamente. As constantes de multiplicação da equação são referentes a irradiância solar espectral de cada banda utilizada na equação do sensor TM (Tabela 4), divididas pelo somatório das irradiâncias, seguindo a Equação 11 proposta por Allen et al. (2002).

$$\omega_\lambda = \frac{\mathrm{ESUN}\lambda}{\sum \mathrm{ESUN}_\lambda} \qquad (11)$$

em que: ω é a constante referente ao cálculo do albedo, sendo λ o número da banda e ESUN a irradiância solar média no topo da atmosfera.

Tabela 4. Irradiância espectral média no topo da atmosfera para cada banda do sensor TM

Bandas	Irradiância espectral no topo da atmosfera ($wm^{-2}\,\mu m^{-1}$)
1 (azul)	1957
2 (verde)	1829
3 (vermelho)	1557
4 (IVpróximo)	1047
5 (IV médio)	219,3
6 (IV termal)	-
7 (IV médio)	74,52

Fonte: Adaptada de (CHANDERS; MARKHAM, 2003).

Considerando que a atmosfera terrestre produz interferências nas radiações solar global e refletida, o albedo que será calculado no topo da atmosfera carece de correções, devido aos processos de absorção e espalhamento. Essas correções foram obtidas pela Equação (12).

$$a = \frac{a_{toa} - ap}{\tau sw^2} \qquad (12)$$

onde: a_{toa}: albedo no topo da atmosfera; *ap* é a radiação solar refletida pela atmosfera que varia de 0,025 a 0,04, o valor adotado foi 0,03 de acordo com Bastiaassen (2000) e t_{sw} é a transmissividade atmosférica, calculada pela Equação (13).

$$\tau_{sw} = 0{,}75 + 2x10^{-5} z \qquad (13)$$

em que: τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, e z a altitude do pixel em relação ao nível médio dos mares. Para z utilizou-se o MDE gerado a partir da carta planialtimétrica.

Como o algoritmo SEBAL apresenta para o albedo, uma equação específica para a influência atmosférica, não foi necessária a correção atmosférica realizada, juntamente com o passo de conversão dos ND para valores físicos. Assim, as bandas utilizadas para o cômputo do albedo não foram corrigidas pelo método DOS1.

5.3.2.3 Índices de vegetação

Após o cálculo do albedo da superfície foram estimados os índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) pelas Equações 14, 15 e 16, respectivamente. Esses índices, de acordo com Allen et al. (2002), podem ser usados para obter diversas características das vegetações, nesse caso, esses foram usados para auxiliar no cálculo das emissividades da superfície. O NDVI serviu também, como parâmetro para separação de classes com similaridades espectrais, adotando um limiar de 0,4 para a separação, ou seja, NDVI menor que 0,4 pertence a uma classe e NDVI maior que 0,4 em outra classe. Essa estratificação foi utilizada para a correção topográfica tipo C, que necessita de discriminação do uso da terra.

$$NDVI = \frac{\rho iv - \rho v}{\rho iv + \rho v} \qquad (14)$$

onde: NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, ρ_{iv} é a reflectância da banda do infravermelho próximo e ρ_v a reflectância na banda do vermelho. Esse índice possui uma amplitude de valores que varia de -1,0 a 1,0. De acordo com Allen et al. (2002), vegetação verde possui valores que variam de 0,0 a 1,0, enquanto que, água e nuvens apresentam valores menores que zero.

$$\mathrm{SAVI} = \frac{(1+\mathrm{L})(\rho\mathrm{iv} - \rho\mathrm{v})}{(\mathrm{L}+\rho\mathrm{iv} - \rho\mathrm{v})} \qquad (15)$$

em que ρ_{iv} e ρ_v são as reflectâncias na banda do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente e L é uma constante do fator de ajuste do índice, tendo o valor alterado dependendo da cobertura do solo.

O IAF é a razão da área total de folhas de uma planta e a área correspondente ao terreno ocupado pela planta, sendo valor máximo de 6,0, quando também, atinge-se o máximo SAVI de 0,687 (ALLEN et al. 2002).

$$\mathrm{IAF} = \frac{-\ln(\frac{0.69-\mathrm{SAVI}}{0.59})}{0.91} \qquad (16)$$

em que, IAF é o índice de área foliar e o SAVI é o índice de vegetação ajustado para o solo.

5.3.2.4 Emissividade

As emissividades podem ser definidas como a razão entre a energia termal incidente e a energia termal radiada de um corpo negro, em uma mesma temperatura. Para o cálculo da emissividade termal utilizou-se a expressão em que a emissividade é em função do IAF, dada pela Equação (17), seguindo metodologia proposta por Allen et al., (2002):

$$\varepsilon_{NB} = 0{,}97 + 0{,}00331 \times \mathrm{IAF} \qquad (17)$$

em que ε_{NB} é a emissividade que representa o comportamento emissor da banda termal, ou seja, do comprimento de onda de 10,4 a 12,5 μm, respectivo a Banda 6.

A emissividade foi definida como a emissão radiativa, na amplitude de comprimento de onda de 6,0 a 14,0 μm de cada pixel e foi obtida segundo Equação 18 propostas por Allen et al. (2002):

$$\varepsilon o = 0{,}95 + 0{,}01 \times \text{IAF} \qquad (18)$$

As equações 12 e 13 são válidas para NDVI > 0 e IAF < 3. Para valores de IAF ≥ 3, considerou-se ε_{NB} e ε_0 igual a 0,98. Para NDVI menor que 0, considerou-se ε_{NB} igual a 0,99 e ε_0 0,985 (ALLEN et al., 2002). ε_{NB} foi utilizado para o cálculo da temperatura de superfície, já ε_0 para o cálculo da emissão de radiação de onda longa. Para satisfazer essas condições foi implementado operações booleanas no LEGAL/SPRING.

5.3.2.5 Temperatura da superfície

A temperatura de superfície (T_s), para as datas, foi obtida com base na radiância espectral da banda termal. A obtenção da temperatura de superfície foi por meio da Equação 19, em que T_s é encontrada em Kelvin (K).

$$\text{Ts} = \frac{K_2}{\text{Ln}(\frac{K_1}{\text{Rad}_\lambda}+1)} \qquad (19)$$

K_1 e K_2 são constantes de calibração da banda termal do sensor TM, no valor de 607,76 e 1260,56, respectivamente (CHANDERS; MARKHAN, 2003) e $\text{Rad}_{\lambda 6}$ é a radiância espectral referente a banda termal.

5.3.2.6 Radiação de onda longa emitida

Radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$) foi calculada segundo Bastiaassen (1995) e Allen et al. (2002), pela Equação 20.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \qquad (20)$$

em que εo é a emissividade, Ts a temperatura da superfície de cada pixel da imagem e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}).

5.3.2.7 Radiação de onda curta incidente

A radiação de onda curta incidente (Rs↓) foi estimada segundo a Equação 21 (Allen *et al.*, 2002), para condições de céu claro.

$$R_{s\downarrow} = S \cos\theta \, dr \, \tau_{sw} \quad (21)$$

em que: S é a constante solar (1.367 $W.m^{-2}$); θ é o ângulo zenital solar; dr é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em determinado dia do ano (DJ) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica.

5.3.2.8 Radiação de onda longa incidente

Radiação de onda longa incidente (RL↓) é a radiação termal emitida pela atmosfera que chega a superfície. Para o cálculo deste parâmetro utilizou-se a equação de Stefan-Boltzmann, representada pela Equação 22, abaixo:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (22)$$

onde: ε_a é a emissividade atmosférica obtida por Equação 23; σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5{,}67x10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$) e Ta a temperatura do ar (K).

$$e_a = 0{,}85(-\ln(\tau_{sw}))^{0{,}09} \quad (23)$$

em que τ_{sw} é a transmissividade da atmosfera.

A temperatura do ar foi obtida por meio de uma correlação linear entre dados da estação meteorológica, situada na FCA/UNESP, com os dados de temperatura de superfície obtidos nas imagens de satélites da série temporal do estudo.

5.3.2.9 Saldo de radiação

O saldo de radiação foi obtido utilizando a Equação 24, proposta por Allen et al. (2002):

$$R_n = (1 - a)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (24)$$

onde: Rs↓ é a radiação de onda curta incidente; α o albedo corrigido do pixel; R_L↓ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera; R_L↑ a radiação de onda longa emitida pelo pixel e εo a emissividade do pixel.

5.3.3 Método de Validação do saldo de radiação

Os saldos de radiação obtidos por meio das imagens de satélites foram validados com dados da estação meteorológica da Fazenda Experimental Lageado (FEL) da FCA/UNESP, a qual apresentou dados de Rg (Radiação global) para as datas superiores a 1994, ou seja, 15 datas referentes a série temporal analisada. Essa estação não dispunha de dados de Rn para nenhuma das datas. Dessa forma, para viabilizar a validação dos dados, houve a necessidade de instalar na área de estudo, Fazenda Experimental Edgardia da FCA/UNESP, uma estação meteorológica automática (Campbell Scientific Inc. modelo CR23X). A estação meteorológica automática mensurava dados de Rg e Rn em intervalos de 5 minutos, durante dezembro de 2014 à agosto de 2015. Com esses dados modelou-se uma equação para estimar os dados de Rn para os horários de passagem do satélite nas datas da série temporal analisada para a estação localizada na FEL.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Processamento das imagens para a estimativa do saldo de radiação no SEBAL

Para computar o saldo de radiação referente à série temporal de 1985 a 2010, utilizada no estudo, foram processadas 21 imagens do Landsat-5/TM, sendo que cada imagem desse sensor possui sete bandas, das quais, uma refere-se ao comprimento de onda do infravermelho termal. Durante o processamento dos dados foram geradas 126 imagens de reflectância no topo da atmosfera (sem correção atmosférica) e outras 126 imagens da superfície (com correção atmosférica). Posterior à correção atmosférica, realizou-se dois métodos de correção topográfica, gerando 252 imagens da superfície com correção topográfica, ou seja, 126 imagens de reflectância da superfície com correção cosseno e 126 imagens da superfície com correção C, além das 252 imagens de reflectância no topo da atmosfera com correção cosseno (126) e com correção C (126).

As imagens de reflectância no topo da atmosfera foram necessárias para o cálculo do albedo, visto que, esse parâmetro, no algoritmo SEBAL, apresenta um método de correção atmosférica específico. Dessa forma, apenas para a reflectância obteve-se um total de 756 imagens, das quais, 378 tinham correção atmosférica e a outra

metade não. A partir do momento que foram geradas essas imagens iniciou-se o cômputo do saldo de radiação.

O primeiro produto gerado no processamento do saldo de radiação, utilizando o algoritmo SEBAL, foi o albedo no topo da atmosfera, onde foram geradas 63 imagens. Para corrigir a atmosfera no produto albedo houve a necessidade de gerar uma imagem de transmissividade atmosférica para, posteriormente, gerar mais 63 imagens de albedo da superfície. Na sequência do processamento foram gerados os índices de vegetação, NDVI e SAVI, para os quais, geraram-se mais 63 imagens de cada índice, ou seja, mais 126 imagens. A partir das imagens SAVI processou-se mais 63 imagens de IAF.

Na sequência do processamento, fazendo uso das imagens índices de vegetação, geraram-se dois produtos de emissividade, num total de 126 imagens. Após processadas as imagens de emissividade, gerou-se 21 imagens de radiância termal, computada com a banda 6 do satélite Landsat-5/TM, com intuito de computar a temperatura de superfície, na qual se originou mais 63 imagens.

Utilizando os dados de temperatura de superfície com os dados de temperatura do ar da estação meteorológica automática da FEL, realizou-se um regressão linear com objetivo de modelar o comportamento da temperatura do ar em função da temperatura da superfície, permitindo estimar a temperatura do ar por meio de operações algébricas que deram como resposta 21 imagens de temperatura do ar. Posterior aos cálculos de temperatura seguiu-se com o cômputo das imagens de radiação de onda longa incidente e emitida pela superfície, sendo que para a primeira fez-se necessário o cálculo da emissividade atmosférica (21 imagens), para permitir a geração de 126 imagens de radiação de onda longa (emitida e incidida). Na etapa seguinte geraram-se 63 imagens de radiação de onda curta incidida, para finalmente gerar o produto final de saldo de radiação (63 imagens), sendo 21 sem correção topográfica, 21 com correção Cosseno e 21 com correção C.

Devido ao fato de trabalhar com diferentes tipos de correção topográfica, foram gerados 1578 produtos, durante todo o processo de estimativa do saldo de radiação no SEBAL.

6.2 Saldo de radiação

Realizou-se um estudo temporal dos dados de saldo de radiação computados por meio do algoritmo SEBAL, para a FEE durante os anos de 1985 a 2010. Os mapas de saldo de radiação encontrados para a série temporal nesse estudo foram submetidos a três metodologias: a primeira, sem considerar os aspectos relativos ao relevo da área (RnSem) e as duas últimas metodologias considerando o relevo da FEE (RnCos e RnC). A estatística descritiva dos saldos de radiação para as diferentes épocas e metodologias aplicadas na FEE seguem apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Estatística descritiva dos mapas de Rn para a FEE para as três metodologias abordadas no estudo

Data	Metodologia	Máximo (W m^{-2})	Médio (W m^{-2})	Mínimo (W m^{-2})	Desvio padrão
11/09/1985	RnSem	513,311	469,835	368,395	14,328
	RnCos	514,262	472,132	308,424	17,080
	RnC	506,034	471,308	368,395	12,678
14/09/1986	RnSem	483,236	441,027	374,595	13,468
	RnCos	491,256	443,806	248,699	18,459
	RnC	478,576	443,284	376,284	12,450
27/09/1988	RnSem	518,414	486,536	432,078	13,611
	RnCos	532,981	488,805	341,579	18,848
	RnC	522,960	488,391	433,180	14,515
12/09/1991	RnSem	485,041	440,290	383,086	14,466
	RnCos	493,746	442,975	216,036	21,961
	RnC	486,602	441,565	387,618	13,525
30/09/1992	RnSem	565,065	512,241	447,535	14,410
	RnCos	566,750	515,119	376,688	19,134
	RnC	565,948	514,099	459,645	14,373
20/09/1994	RnSem	506,837	452,650	328,681	20,481
	RnCos	508,506	455,620	300,675	23,053
	RnC	507,670	454,657	349,413	19,531
12/09/1997	RnSem	514,834	467,126	396,291	18,324
	RnCos	520,522	469,493	273,187	23,241
	RnC	510,897	468,568	400,006	17,705
28/09/1997	RnSem	591,289	534,676	417,966	20,848
	RnCos	592,626	537,091	400,137	23,005
	RnC	591,936	536,395	409,276	20,544
01/08/1999	RnSem	405,342	360,229	239,272	14,435
	RnCos	$3{,}40 \times 10^{38}$	$3{,}01 \times 10^{35}$	67,742	$1{,}01 \times 10^{37}$
	RnC	396,753	361,767	241,101	12,416

02/09/1999	RnSem	482,475	431,733	341,961	22,126
	RnCos	477,516	433,810	230,899	23,185
	RnC	478,412	432,861	345,723	20,521
19/08/2000	RnSem	468,881	417,420	341,169	18,200
	RnCos	463,936	419,125	143,554	21,048
	RnC	464,735	418,826	351,215	16,632
06/08/2001	RnSem	422,583	373,300	315,965	16,433
	RnCos	$3{,}40 \times 10^{38}$	$2{,}51 \times 10^{34}$	122,673	$2{,}95 \times 10^{36}$
	RnC	417,908	374,272	317,100	14,583
12/08/2003	RnSem	444,072	392,960	309,881	17,879
	RnCos	439,363	394,379	5,421	21,517
	RnC	437,904	394,084	316,979	16,495
14/08/2004	RnSem	465,172	412,117	322,096	20,973
	RnCos	459,508	413,637	111,094	22,767
	RnC	460,796	413,662	341,991	19,320
17/08/2005	RnSem	467,474	417,194	341,999	18,956
	RnCos	462,990	418,347	134,347	21,239
	RnC	459,221	418,746	348,521	17,283
04/08/2006	RnSem	436,961	392,344	326,915	15,857
	RnCos	438,157	392,825	103,209	22,522
	RnC	430,789	392,870	329,306	14,964
23/08/2007	RnSem	492,900	443,399	369,103	17,540
	RnCos	494,343	444,654	195,314	21,054
	RnC	493,436	444,669	369,200	15,940
08/09/2007	RnSem	556,196	485,816	395,088	21,055
	RnCos	558,435	487,494	329,874	22,530
	RnC	559,456	487,275	395,299	19,679
25/08/2008	RnSem	489,120	439,370	348,320	17,109
	RnCos	490,143	440,802	205,778	21,080
	RnC	489,466	440,594	348,409	15,940
10/09/2008	RnSem	547,041	488,348	354,155	18,304
	RnCos	548,163	490,204	327,667	21,126
	RnC	547,632	489,941	354,446	17,605
16/09/2010	RnSem	563,033	512,978	395,621	19,689
	RnCos	564,306	514,572	361,726	23,313
	RnC	563,781	514,441	395,920	19,842

De acordo com a Tabela 5, nota-se que os valores de saldo de radiação sem correção topográfica (RnSem), para a série temporal analisada, apresentaram amplitude de 239,27 W m^{-2} (01/08/1999) a 591,29 W m^{-2} (28/09/1997), tendo o valor médio para área variado entre 360,23 W m^{-2} (01/08/1999) a 534,68 W m^{-2} (28/09/1997). Gusmão et al. (2012) determinaram o saldo de radiação instantâneo, para Ilha do Bananal, TO, utilizando para esse objetivo o satélite Landsat-5/TM e encontraram valores médios desse parâmetro variando ao longo da série temporal, quatro imagens durante o ano de

2005, de 488 W m^{-2} a 535 W m^{-2}. Apesar de Tocantins não estar localizado na mesma latitude da FEE, a amplitude dos valores encontrados por esses autores está dentro da encontrada no presente estudo.

Gomes et al. (2009) estimaram o saldo de radiação para parte da bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu, localizado no estado de São Paulo e obtiveram valores mínimo e máximo, para o dia 16/07/2005, de 207,9 W m^{-2} e 448,1 W m^{-2}, respectivamente. Esses valores encontrados por esses autores estão de acordo com os encontrados na FEE. Fato relevante é que ambas as áreas localizam-se no Estado de São Paulo, além de apresentarem características climáticas similares a da FEE, como por exemplo, precipitação média anual de 1478 mm e temperaturas médias de 17,6°C e 23,5°C, correspondendo aos meses mais e frio e mais quente, respectivamente. O valor máximo encontrado por Gomes et al. (2009) foi relativamente mais baixo que o encontrado para a FEE, isso pode ser atribuído a época da imagem, pois quando feita uma análise nas imagens dos dias 01/08/1999 e 06/08/2001 (Tabela 1) observa-se que os valores máximos de RnSem para a FEE foram de 405,342 W m^{-2}, 422,583 W m^{-2}, respectivamente.

Quando foi realizada a correção topográfica lambertiana do tipo cosseno, a amplitude dos valores de saldo de radiação (RnCos) foi de 5,41 W m^{-2} (12/08/2003) a 592,63 W m^{-2} (28/09/1997). Constatou-se que a correção cosseno modificou drasticamente os valores de saldo de radiação na FEE para alguns pixels, além de se observar na Tabela 5 que nas datas de 01/08/1999 e 06/08/2001 foram encontrados pixels saturados ou com valores exorbitantes (irreais) de RnCos. Nesse método de correção, Teillet et al. (1982) consideram que os alvos terrestres sejam refletores isotrópicos, ou seja, refletem de maneira homogênea em todas as direções, característica que, na maioria das vezes, não se encontra na natureza. De acordo com os mesmos autores, a correção cosseno teria maior aplicabilidade em terrenos que apresentem declividades inferiores a 25° e ângulos de iluminação (γ_i) menores que 45°. O relevo da FEE, com base na carta planialtimétrica utilizada no estudo para gerar o modelo digital de elevação, apresenta declividades superiores a 25° e ao analisar as imagens de ângulos de iluminação (γ_i), para as datas do estudo, constatou-se que em todas as imagens foram observados γ_i superiores a 45°.

Os pixels que apresentaram saturação (valores exorbitantes de RnCos) estão com ângulos de iluminação (γ_i), em relação a normal da superfície, superiores a 69,62°, alcançando ângulos de até 76,11°, ou seja, condições de pouca

luminosidade. Esse fato foi observado, também, em muitas outras áreas da FEE, nas quais podem ser constatadas correções inadequadas para os pixels, ou com valores muito baixos, ou, muito altos de RnCos. Sola et al. (2014) analisaram diferentes métodos de correção topográfica, incluindo os dois utilizados na presente pesquisa, e notaram que as áreas mais problemáticas para esses algoritmos são as regiões com ângulo de iluminação próximo ou maior do que 90°, ou seja, baixo $\cos\gamma_i$. Esses autores encontraram sobrecorreções para a metodologia do cosseno em áreas com baixo ângulo de iluminação, o que também foi constatado para FEE.

Hatson e Chuvieco (2011) avaliaram diferentes métodos de correção topográfica em imagens Landsat/ETM+. Esses pesquisadores, ao relatarem sobre a correção cosseno, afirmaram que essa correção não é capaz de corrigir cenas em condições de má iluminação, situação encontrada para algumas regiões da FEE.

Com essas análises foi detectado problemas ao realizar a correção topográfica do tipo cosseno, para a FEE, devido à complexidade de seu relevo. Segundo Meyer et al. (1993), a correção cosseno é frequentemente utilizada para terrenos relativamente planos, sem complexidades, com intuito de equalizar as diferenças relativas à iluminação, devido as diferentes posições que o sol assume em estudos temporais. Seguindo os mesmos autores, a correção cosseno para áreas pouco iluminadas apresenta maiores desproporções, na atenuação dos parâmetros da imagem.

Segundo Teillet et al. (1982) e Meyer et al. (1993), a correção C é uma modificação da correção cosseno, com a adição de um fator C que tem como objetivo modelar a radiação difusa que chega na superfície. Para essa correção os valores de saldo de radiação apresentaram amplitude de 241,10 W m^{-2} (01/08/1999) a 591,94 W m^{-2} (28/09/1997). Os valores médios de RnC na FEE, para as datas analisadas, apresentaram amplitude de 361,77 W m^{-2} (01/08/1999) a 536,39 W m^{-2} (28/09/1997).

Quando relatado a variabilidade dos valores de Rn, é intrigante o comportamento na data 28/09/1997, pois foi onde se encontrou os máximos valores de Rn, em todos os métodos de estudo, sendo observados também, as maiores médias de Rn para a FEE, durante toda a série temporal estudada. Quando pesquisado os fenômenos climáticos ocorridos durante o período estudado, observou-se que na data 28/09/1997 ocorreu, de acordo com o Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE (2015), el niño classificado como forte. Esse fenômeno faz com que ocorra um aquecimento das águas do oceano pacífico na

região tropical, acarretando em mudanças no comportamento dos ventos e do regime pluviométrico (INPE, 2015). Para ter certeza se esse fenômeno foi o responsável pelos elevados valores de Rn nessa data, seria necessário realizar observações mais profundas e com maior abrangência temporal. Entretanto, essa possibilidade não pode ser desconsiderada.

Wu et al. (2007), utilizando de quatro metodologias de correção topográfica, constataram que a correção cosseno modificou demasiadamente a dispersão espacial dos valores de radiância espectral, enquanto que, a correção C não apresentou mudanças significativas no histograma dos valores. Esses resultados estão de acordo com os encontrados no presente trabalho, isto é, mudanças abruptas no histograma dos valores de RnCos, quando comparado com RnSem e pequena diferença na amplitude e nos valores dos histogramas de RnC, quando equiparado com o histograma de RnSem. Entretanto, para determinar se essas correções foram eficientes, ou não, faz-se necessário analisar mais parâmetros estatísticos.

Quando se deseja analisar a eficiência de uma correção, deve-se analisar o desvio padrão dos dados que passaram por esses processos com os dados antes da correção, visto que, o objetivo de uma correção, seja essa qual for, é retirar ruídos nos dados. Tendo em vista que essa interferência não ocorre de maneira igualitária na cena, como é o caso da interferência topográfica, a tendência é que, após atenuar a interferência causada pela topografia, a variabilidade dos dados fique menor. Hatson e Chuvieco, (2011) basearam a análise de suas correções topográficas, realizadas nas imagens dos satélites Landsat-5/TM e Landsat-7/ETM+, no princípio de que o desvio padrão dos dados, após uma correção efetiva da interferência do relevo, deva diminuir. Partindo desse princípio, pode-se perceber na Tabela 5 que, os dados de Rn que passaram pela correção cosseno (RnCos) não apresentaram, em nenhuma das datas estudadas, o desvio padrão inferior aos dados de Rn sem correção (RnSem), comprovando que, para a FEE, a correção cosseno não se apresentou eficaz.

Ao analisar os dados de desvio padrão para a correção C (RnC), observou-se que, em 90% das datas, a metodologia da correção C reduziu a variabilidade dos dados, ou seja, reduziu o desvio padrão das imagens (Tabela 5). As imagens corrigidas pelo método C, que não apresentaram desvios padrão inferiores à das imagens sem correção, foram as datas de 27/09/199 8 e 16/09/2010. Mesmo assim, pode-se considerar que a correção C foi eficaz para atenuar os efeitos da topografia para a FEE, pois, na

maioria das datas, houve redução do desvio padrão e, consequentemente, redução da aleatoriedade causada pelo relevo. Foi observada uma redução média do desvio padrão, das imagens não corrigidas para as imagens corrigidas pela correção C, de 5,97 %. Lima e Ribeiro, (2014), testando diferentes métodos de correção topográfica em imagens Landsat-5/TM, observaram que houve, também, uma redução do desvio padrão das imagens de reflectância corrigidas para as não corrigidas. A redução média, encontrada por esses autores, foi de 10,4%, os quais atribuíram essa redução como um indício da normalização das reflectâncias corrigidas. Vale ressaltar que a redução média do desvio padrão encontrada no presente estudo foi para os valores de saldo de radiação e não para as reflectâncias, como no estudo realizado por Lima e Ribeiro, (2014).

Wu et al. (2007) encontraram, em uma análise com quatro métodos de correção topográfica, o pior resultado para a metodologia da correção cosseno. Já, para a correção C, esses autores constataram que essa metodologia foi efetiva para atenuar os efeitos da topografia em sua área de estudo. O estudo realizado por esses autores está em concordância com o da FEE. Moreira e Valeriano (2014), analisando as metodologias de correções topográficas, constataram que a correção cosseno apresentou como resultado, em alguns casos, o crescimento do desvio padrão, além de concluírem também que o método de correção C foi superior à correção cosseno. Ambas as conclusões desses autores estão de acordo com o encontrado no presente estudo.

Hatson e Chuvieco (2011) observaram que a correção C foi capaz de atenuar os efeitos topográficos em imagens com ângulo de elevação solar até 40°, porém, constataram que a mesma correção encontrou dificuldades para corrigir cenas com ângulo de elevação solar igual a 30°, ou inferior. Os autores concluíram que a correção C foi capaz de reduzir a aleatoriedade causada pelo efeito da topografia.

Para discutir e ilustrar as interferências que o relevo exerce nos mapas de saldo de radiação, realizou-se sombreamento do relevo da FEE (Figura 7), para o dia 11/09/1985, no momento da passagem do satélite (09h39min). Para essa data, o sol apresentava um azimute de 57,58° com ângulo de elevação solar de 44,37°.

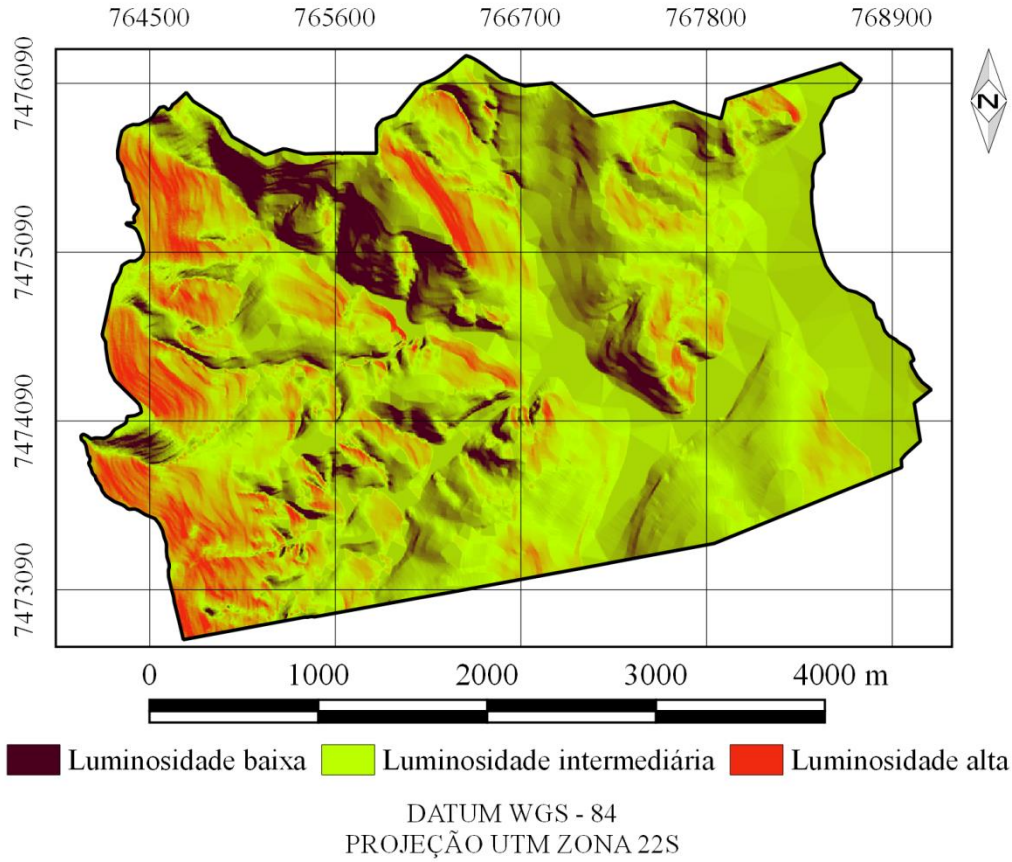


Figura 7. Relevo sombreado da Fazenda Experimental Edgardia, para o dia 11/09/1985.

Devido ao fato que todas as imagens da série temporal foram captadas na mesma época do ano, agosto e setembro, essas imagens não apresentaram grandes diferenças nos ângulos azimutais e de elevação solar, fato que pode ser constatado na Tabela 1. Assim, consegue-se ilustrar o comportamento do sombreamento da superfície na FEE no momento do imageamento do satélite, utilizando apenas a imagem de uma data.

As informações da Figura 7 têm como propósito complementar às análises da influência da topografia nas imagens dos saldos de radiação, pois, a Figura 7 permite identificar as áreas mais e menos iluminadas, no momento da passagem do satélite, para a região da FEE. As porções da Figura 7 que se encontram na coloração avermelhada estavam recebendo radiação direta do sol, encontrando-se, portanto, bem iluminadas, ao contrário das porções na coloração escura, que não estavam recebendo radiação direta.

Os mapas de saldo de radiação (RnSem, RnCos e RnC) da FEE para as datas analisadas nesse estudo, estão apresentados nas Figuras 8 a 18. Analisando essas figuras é possível observar a dinâmica temporal dos valores de saldo de radiação para

a FEE para a série temporal analisada, assim como, a variabilidade espacial dos saldos de radiação para as datas analisadas.

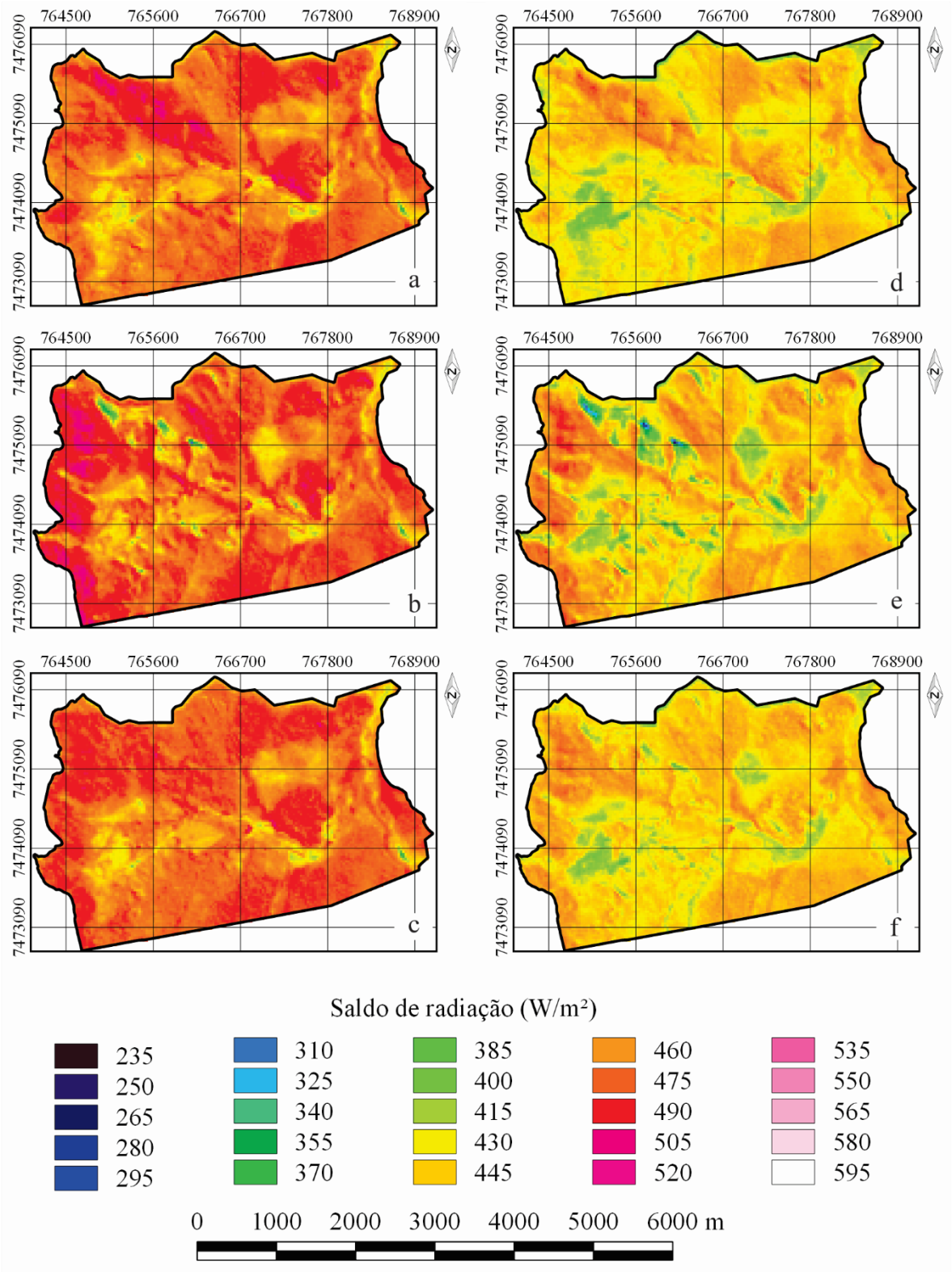


Figura 8. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f) referentes às datas de 11/09/1985, 14/09/1986.

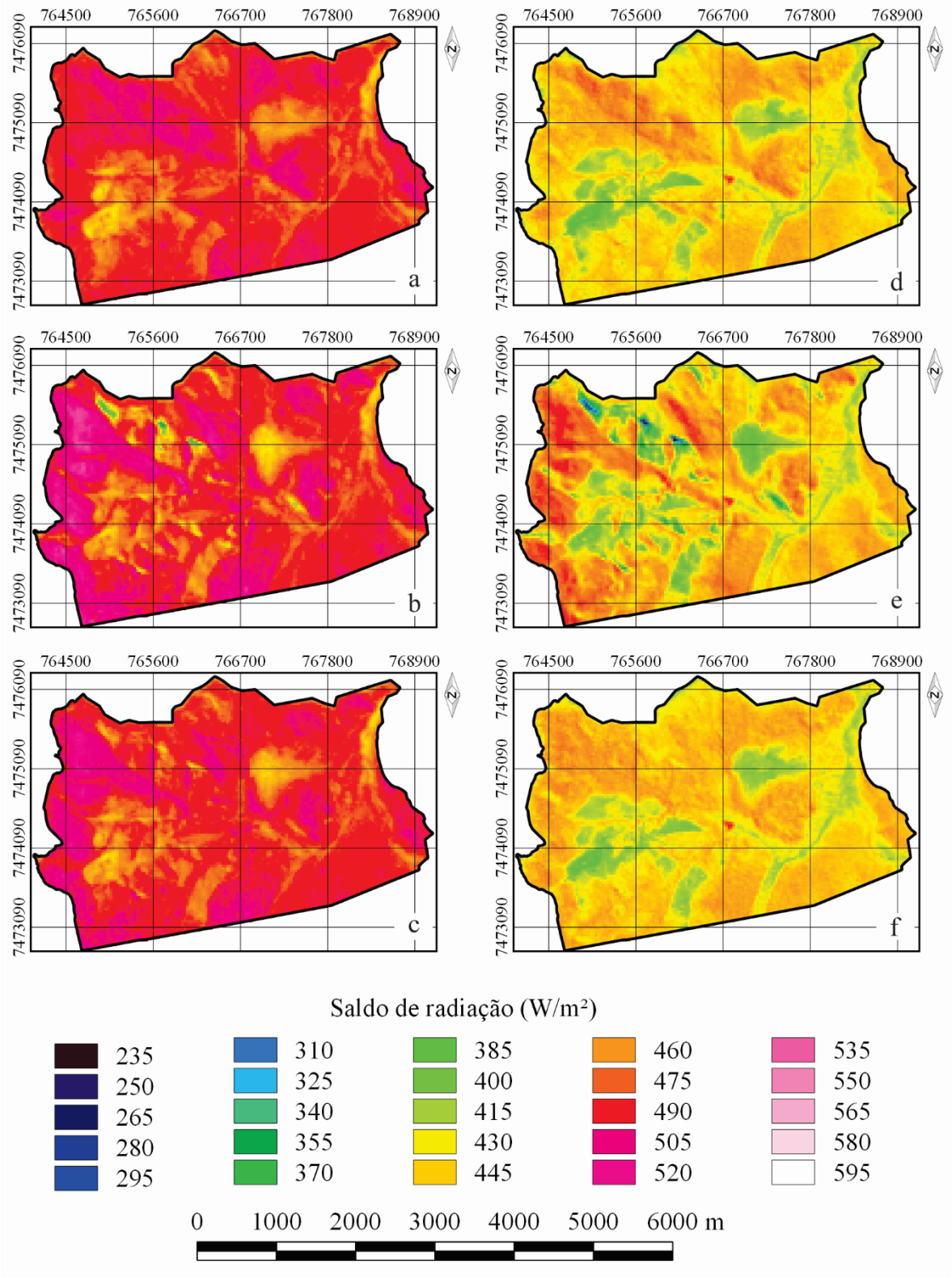


Figura 9. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 27/09/1988, 12/09/1991.

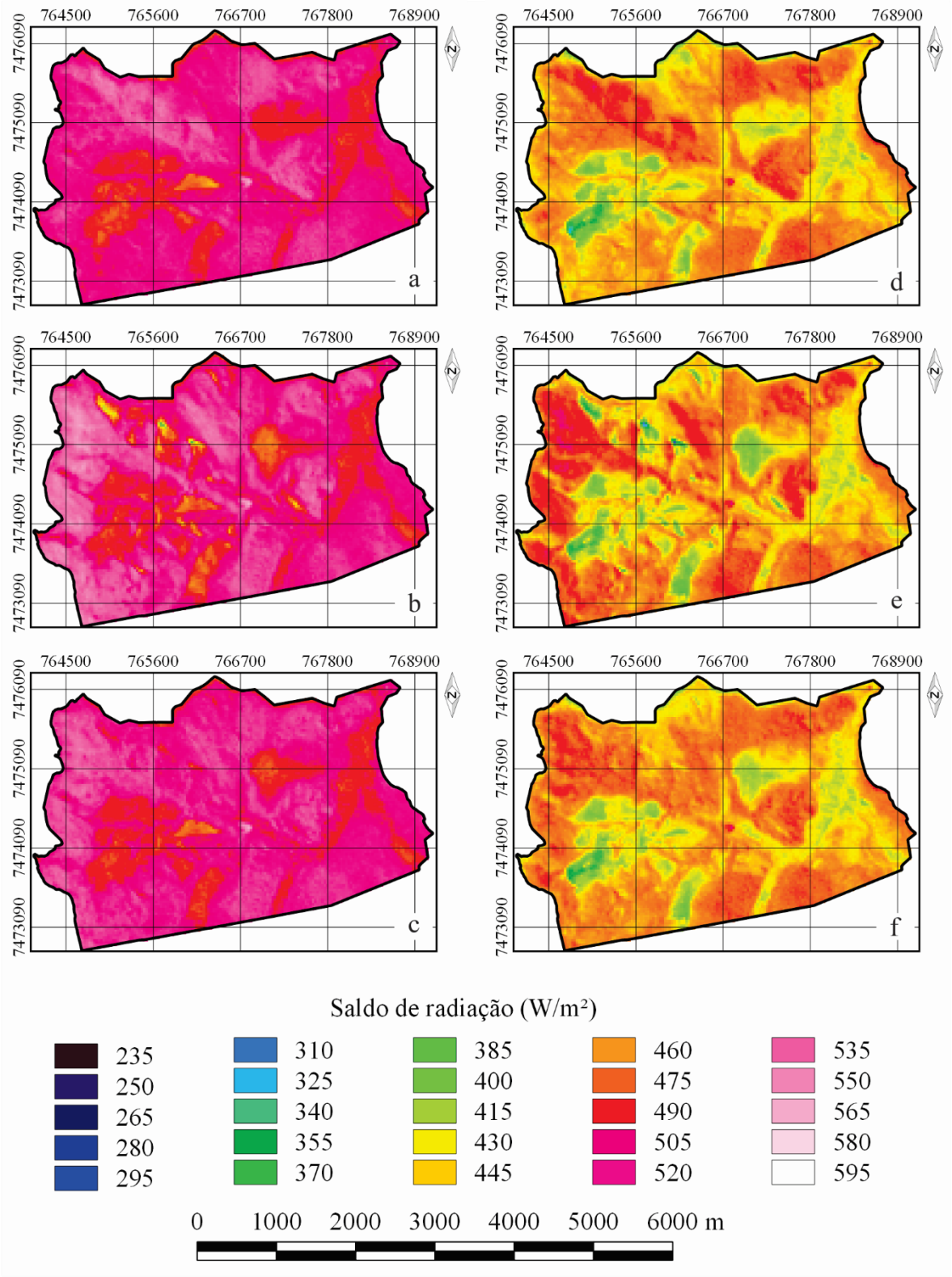


Figura 10. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 30/09/1992, 20/09/1994.

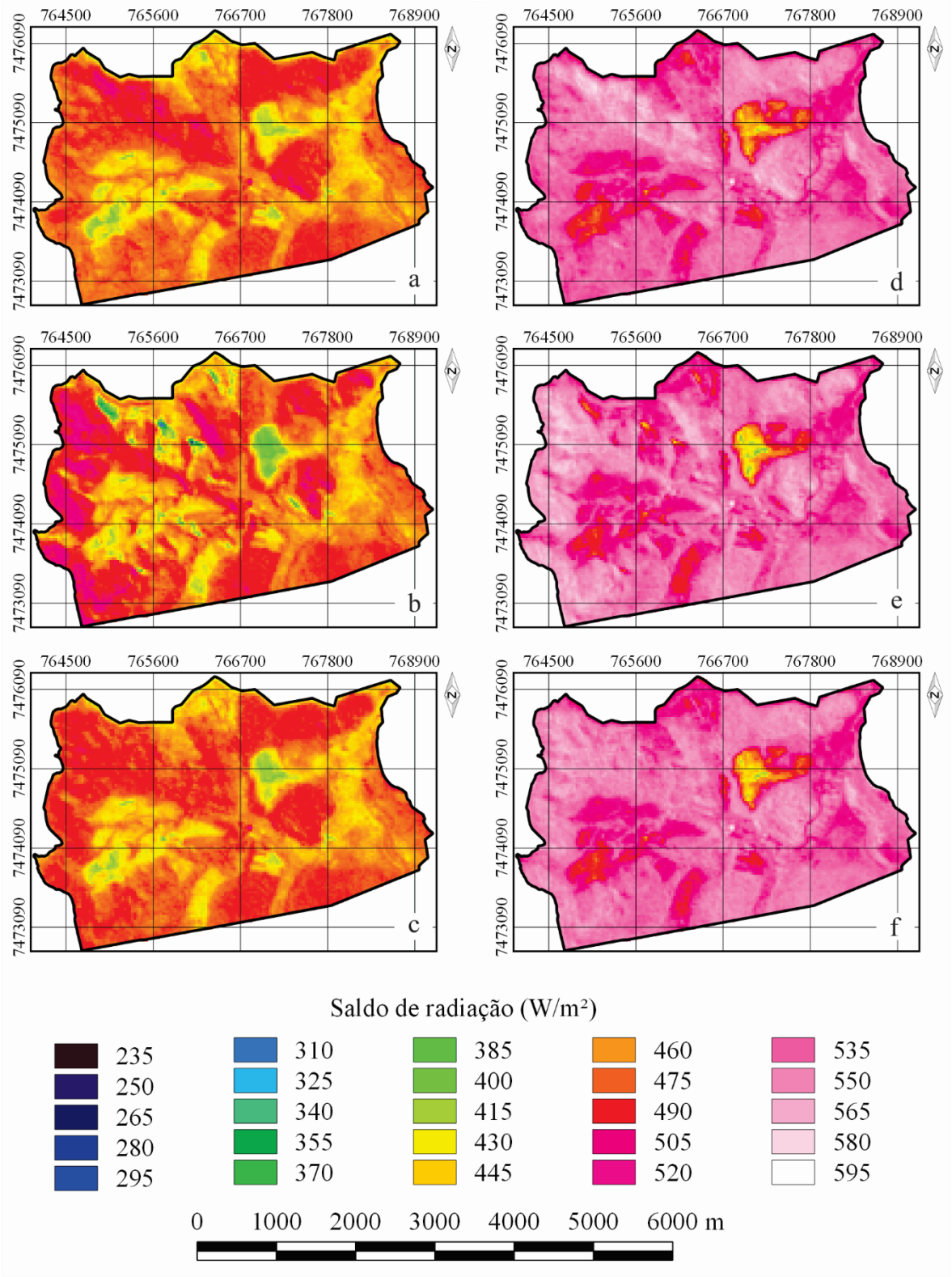


Figura 11. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 12/09/1997, 28/09/1997.

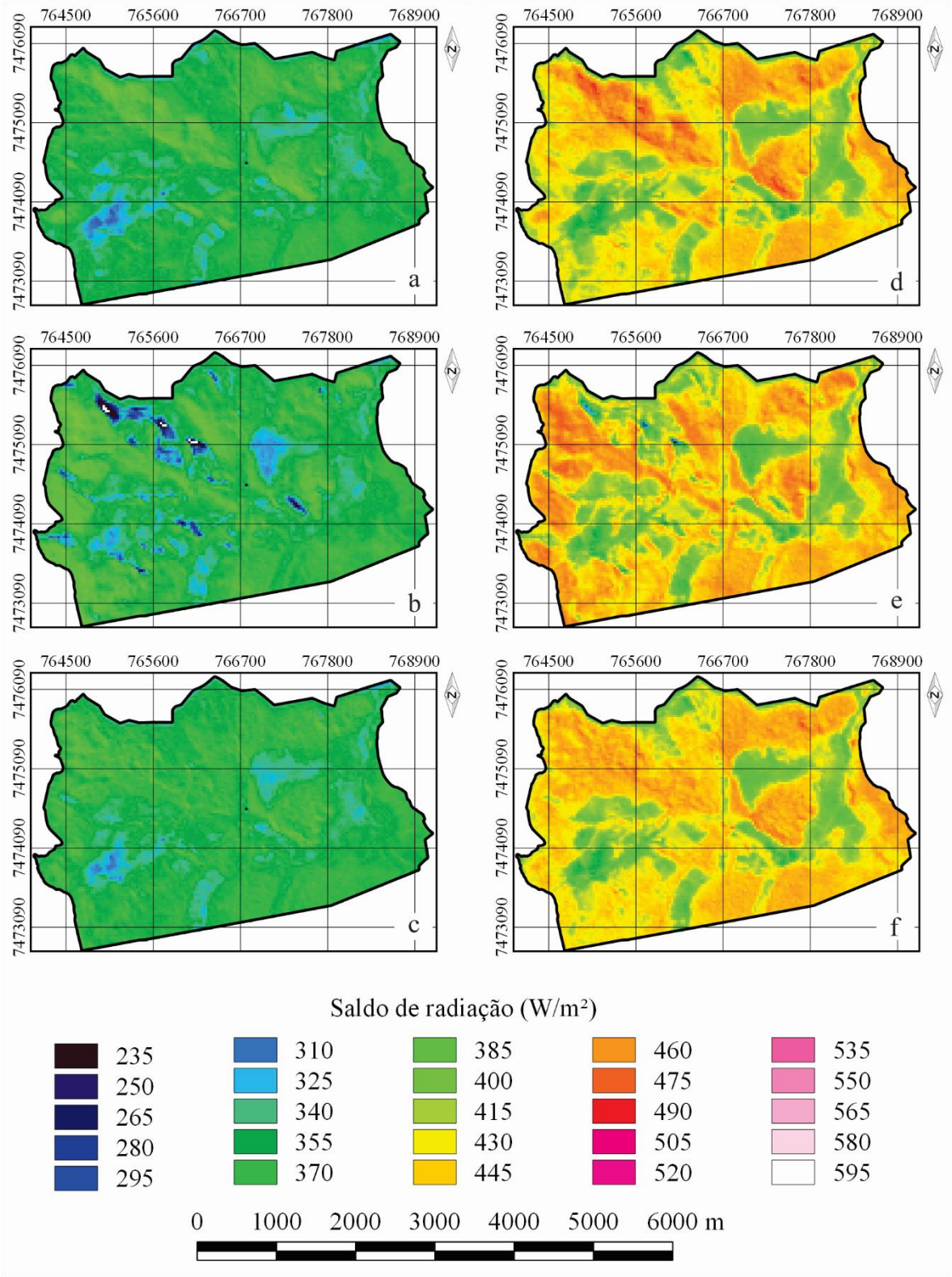


Figura 12. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 01/08/1999, 02/09/1999.

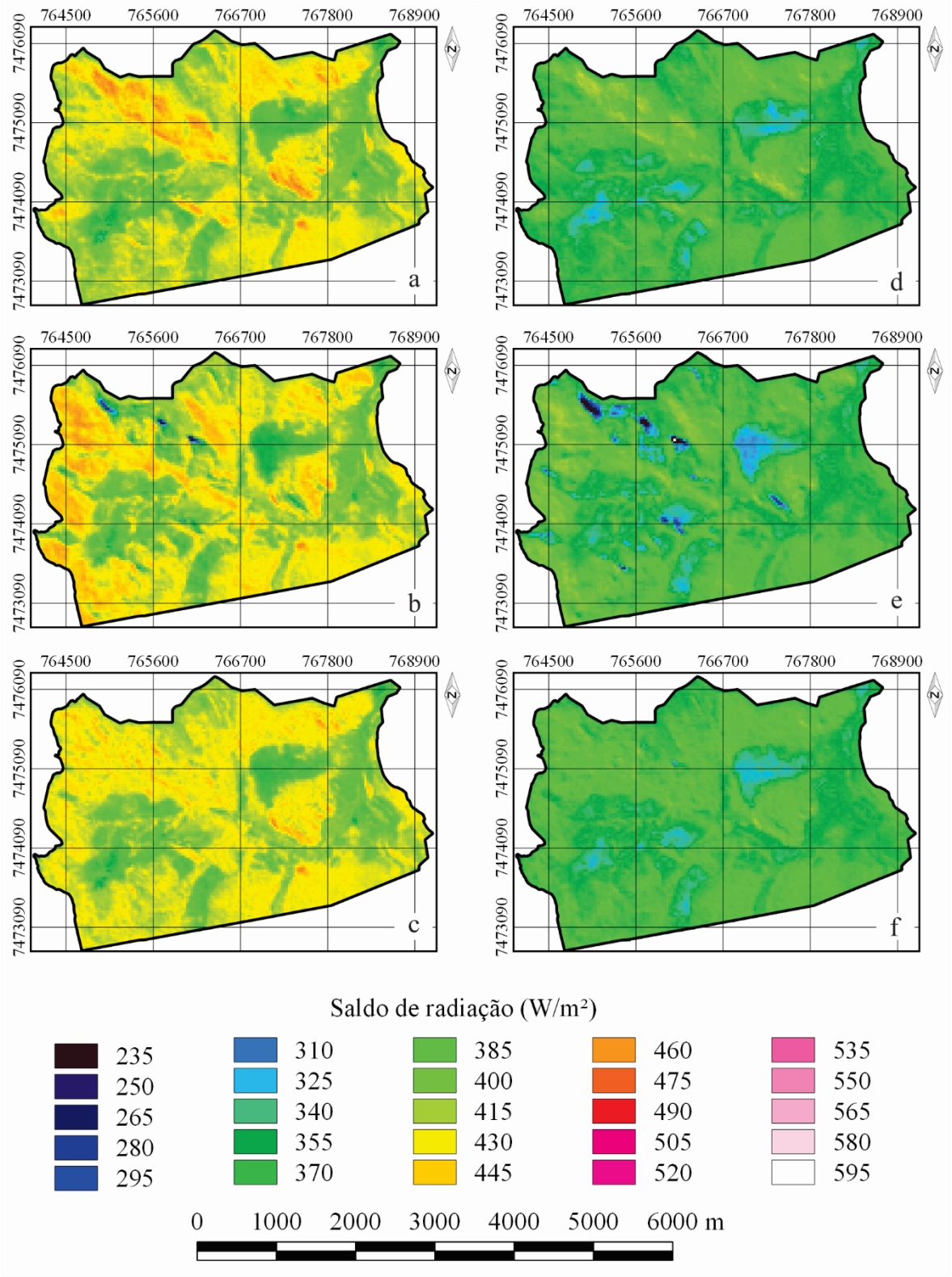


Figura 13. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referente às datas de 19/08/2000, 06/08/2001.

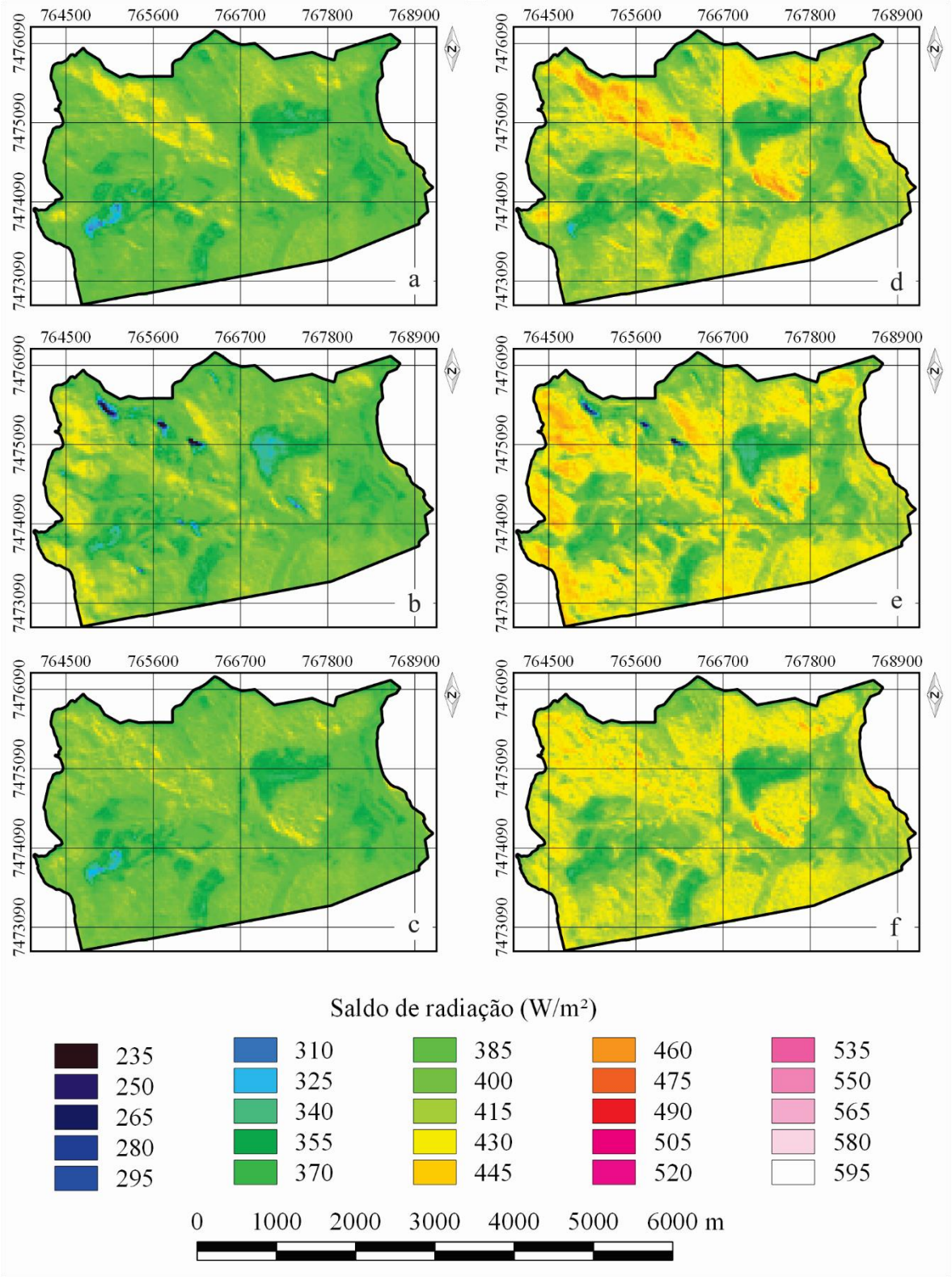


Figura 14. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 12/08/2003, 14/08/2004.

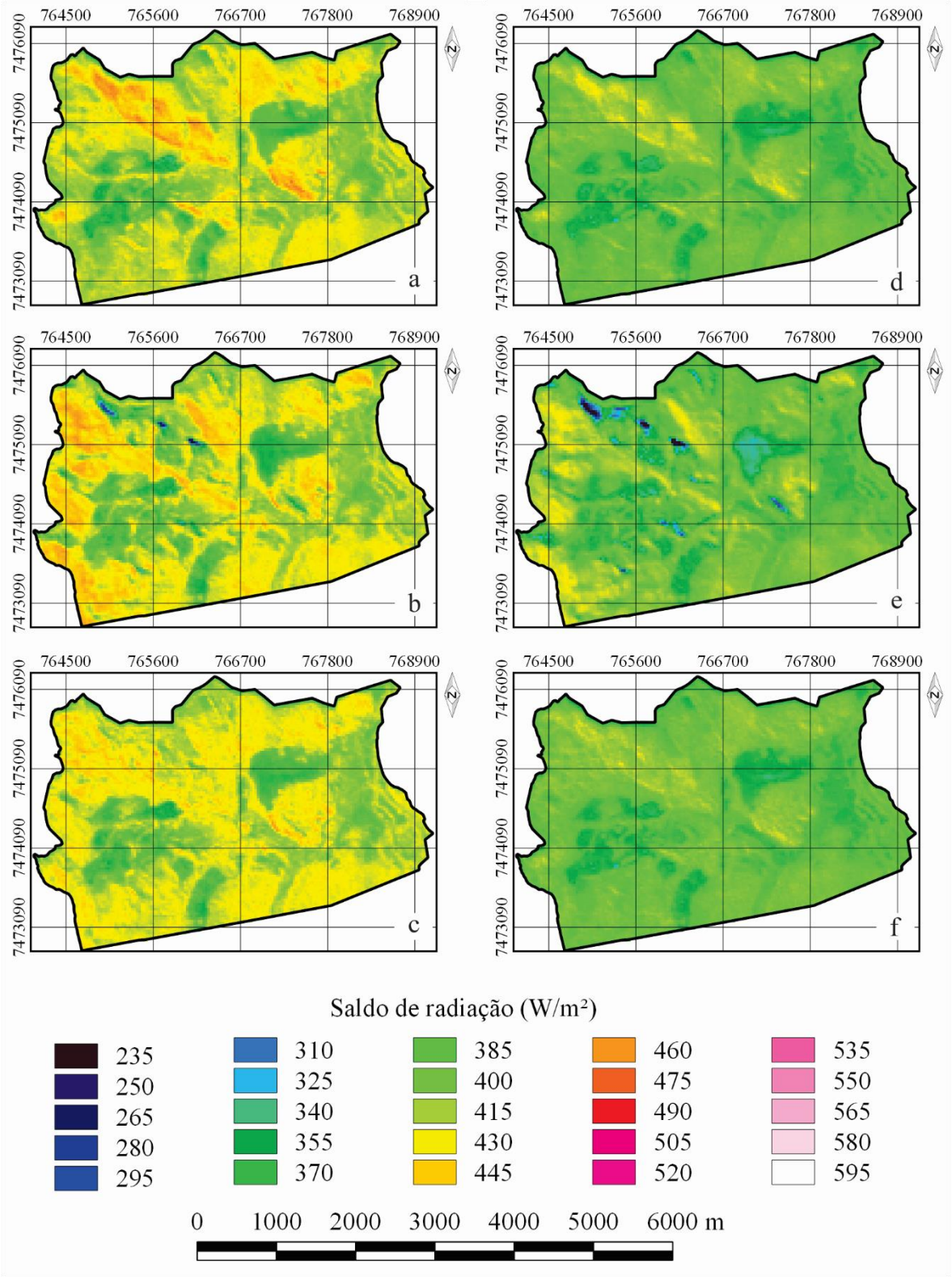


Figura 15. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 17/08/2005, 04/08/2006.

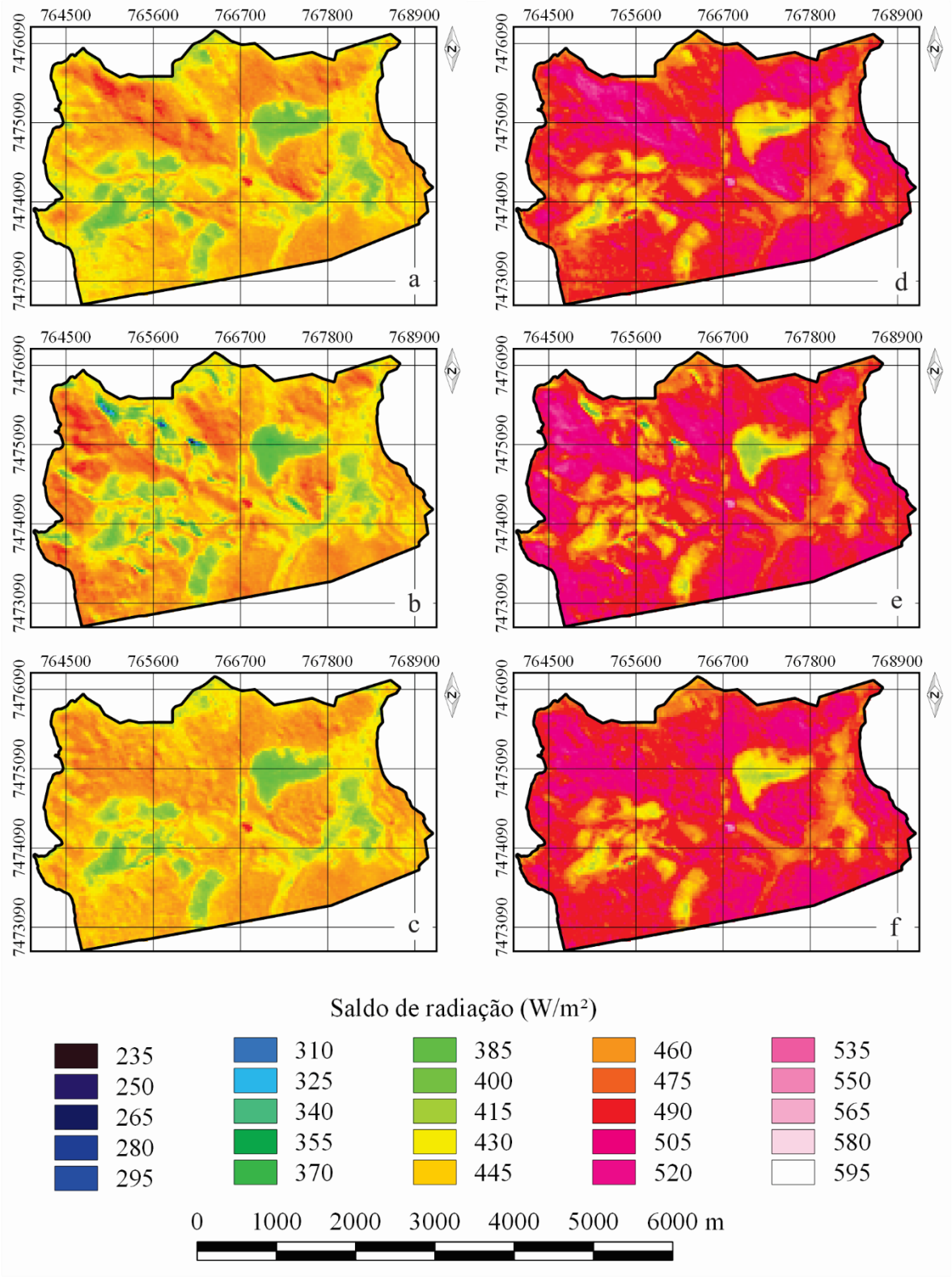


Figura 16. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 23/08/2007, 08/09/2007.

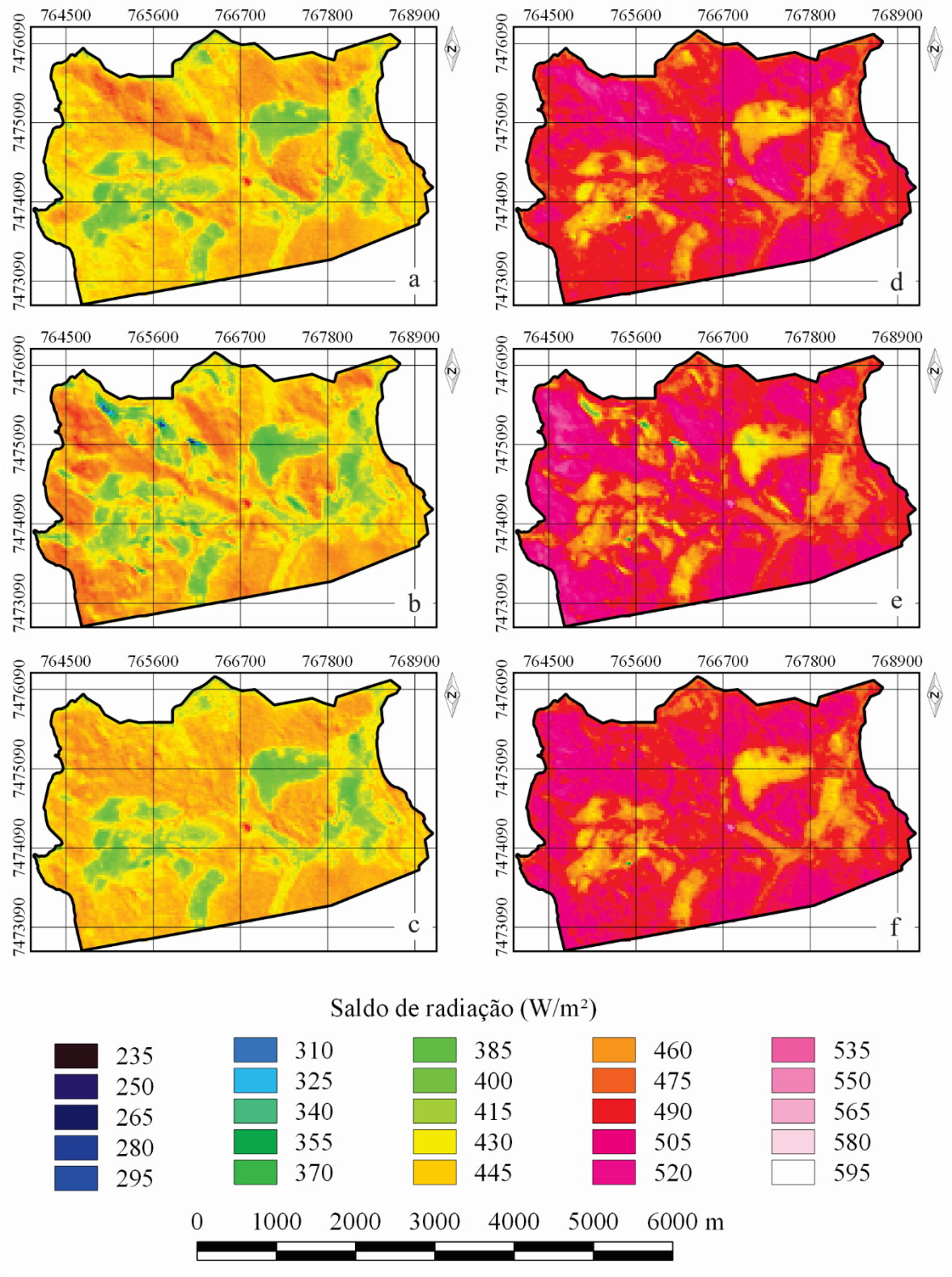


Figura 17. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a, d), com correção cosseno (b, e) e com correção C (c, f), referentes às datas de 25/08/2008, 10/09/2008.

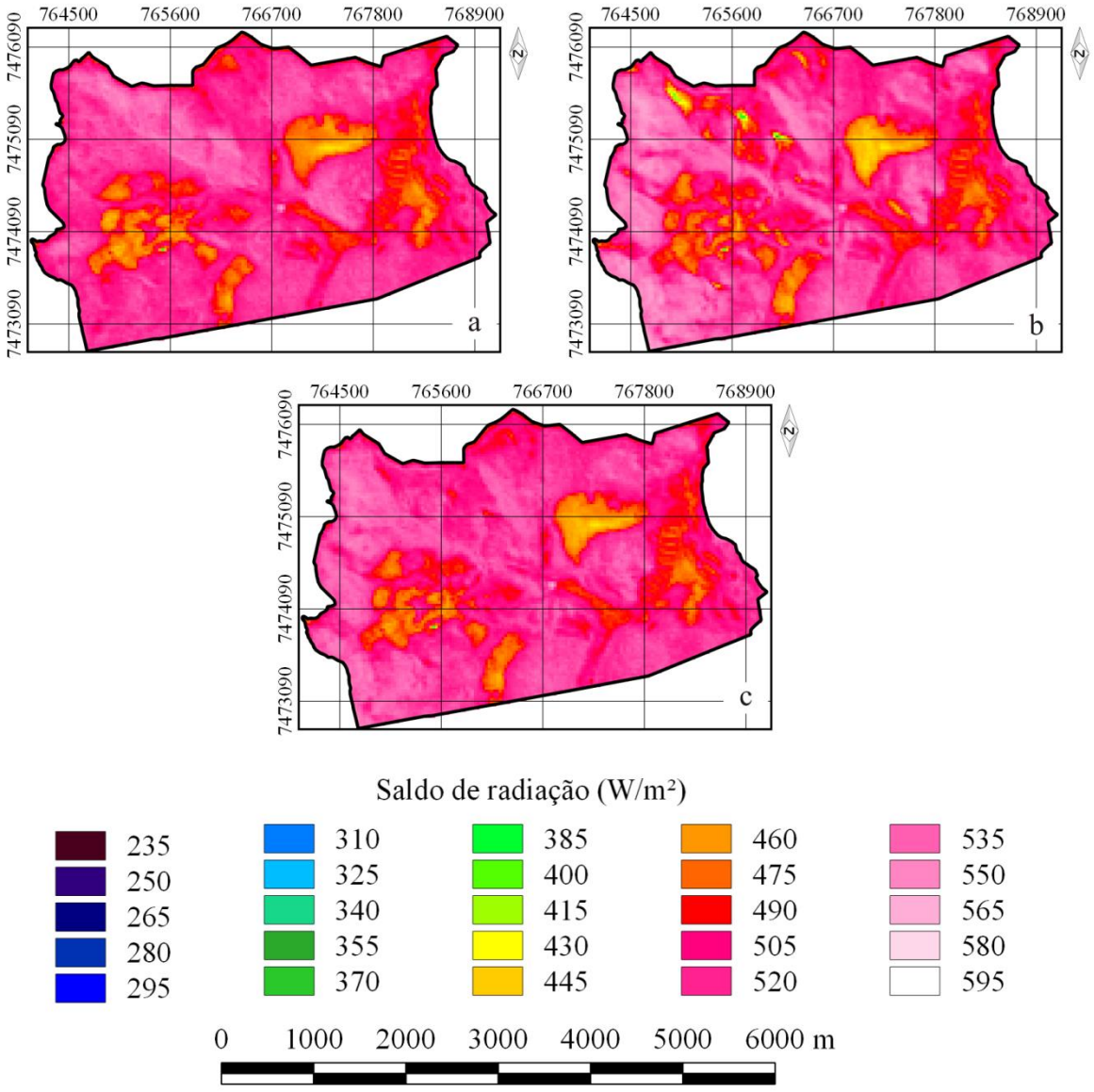


Figura 18. Imagens saldo de radiação, sem correção topográfica (a), com correção cosseno (b) e com correção C (c), referente à data de 16/09/2010.

Todas as imagens analisadas no estudo referem-se aos meses de agosto e setembro. Dessa forma, percebe-se que ao analisar temporalmente a grandeza do saldo de radiação, durante a época estudada, as imagens do mês de setembro apresentaram-se, na maioria das vezes, com valores mais elevados de saldo de radiação, quando comparados com as imagens de saldo de radiação referente ao mês de agosto. Esse comportamento deve-se às estações do ano, visto que, as imagens do início do mês agosto encontravam-se em pleno inverno, estação que vai de 21 de junho a 23 de setembro. Já, as imagens do início de setembro encontravam-se no final dessa estação e, consequentemente,

na transição entre inverno e primavera, que se inicia no dia 23 de setembro e vai até o dia 21 de dezembro. Vianello e Alves (2012) apresentaram uma tabela de irradiância solar diária média para o topo da atmosfera e na análise dessa tabela percebe-se que, para a latitude da FEE, o mês de agosto recebe em média 5,34 MJ m^{-2} dia^{-1} a menos que o mês de setembro. Esse fato pode explicar o comportamento temporal encontrado nas imagens.

Analisando as Figuras 8 a 18 nota-se a influência que a topografia exerce sobre os valores de saldo de radiação, uma vez que ao observar os mapas a e d dessas figuras (imagens de Rn que não foram topograficamente corrigidas), constatou-se tendência regional de elevados valores de Rn, no momento da passagem do satélite. Essa porção estende-se de noroeste ao sudeste desses mapas, mesma região que na Figura 7 apresenta sombreada, ou com baixa luminosidade. Essa é uma região que estão predominantemente voltadas para ângulos azimutais entre 135° a 225° (maioria), ou seja, predominantemente perpendicular aos raios solares, ocorrendo também nessa região a presença de ângulos entre 225° a 315°, opostos aos raios solares. Balthazar et al. (2012) encontram comportamento semelhante a esse, nas montanhas do Himalaya, na parte ocidental de Bhutan, onde os vales íngremes estão orientados de maneira perpendicular à direção de iluminação do sol. Esses autores constataram que, para esses locais, as imagens tinham aparência escura, comprovando o efeito da topografia dessa região.

De maneira análoga às montanhas do Himalaya, a porção dos mapas de RnSem, que apresentaram uma disposição tendenciosa para valores mais elevados de saldo de radiação, foram, justamente, as regiões que sofreram com o sombreamento da superfície. Dessa forma, percebe-se que o sombreamento ocorrido nessa região mascarou as características reflectivas do uso da terra presente nessa superfície. De acordo com Jorge e Sartori (2002), os quais realizaram um mapeamento do uso da terra para a FEE, a região com sombreamento da superfície é composta por uma floresta estacional semidecidual. Esse sombreamento, devido à disposição topográfica da região, fez com que essa superfície deixasse de apresentar um comportamento espectral típico de vegetação, para assumir um comportamento mais absortivo de radiação eletromagnética. Assim, se mais radiação é absorvida em contrapartida à refletida, é de se esperar um saldo de radiação mais elevado nesse lugar, por isso, essas regiões (sombreadas) apresentaram-se com saldos radioativos mais elevados que as demais, para a FEE. Os valores de Rn nesta superfície do mapa são mais elevados que em outras porções da FEE que apresentam o mesmo uso da terra. Riaño et al. (2003) relataram que os efeitos da topografia induzem em

variações na reflectância de um mesmo uso da terra, fazendo com que uma mesma vegetação apresente, em áreas sombreadas, comportamento menos reflectivo do que em áreas iluminadas, o que está de acordo com o constatado para a FEE.

As imagens de Rn processadas com a correção topográfica do tipo cosseno (RnCos), que estão apresentadas nas letras b e e, das Figuras 8 a 18, ocorreram sobrecorreção tanto dos valores mais baixos, quanto para os valores mais elevados. Observou-se também, que nas datas 01/08/1999 e 06/08/2001 ocorreram uma correção excessiva dos valores de saldo de radiação, para as regiões que apresentavam um elevado ângulo de incidência solar em relação ao eixo normal da superfície do pixel. Essas regiões, encontradas nas Figuras 12b e 13e, recebiam baixa incidência solar no momento da passagem do satélite. Para esses pixels foram encontrados valores irreais do parâmetro em questão.

As Figuras de 8 a 18, letras c e f, foram corrigidas topograficamente pela correção C e ao compará-las com as letras a e d, percebe-se que os mapas de saldo de radiação para a FEE deixaram de apresentar a tendência relacionada ao sombreamento da superfície, que se notava nos mapas não corrigidos topograficamente, letras a e d. Visualmente, foi eliminada a tendência que ocorria na porção noroeste sudeste desses mapas, visto nas Figuras 8 a18, letras c e f, quando comparados as letras a e d.

Sola et al. (2014) concluíram que, para quatro algoritmos analisados em seus estudos, a correção C foi a que apresentou a melhor performance para atenuar os efeitos da topografia, enquanto que, o a correção cosseno foi ranqueada como o pior algoritmo dentre as metodologias aplicadas. Esse resultado está em concordância com o estudo realizado para FEE.

Nas Tabelas 6 e 7 estão apresentados os erros médio relativo (RME) dos saldos radioativos corrigidos topograficamente, estratificados em função das faces de exposição da superfície e das classes de declividade presentes na FEE. As faces de exposição das superfícies são computadas, levando em consideração o sentido horário a partir do norte verdadeiro. Em ambas as correções topográficas, o erro médio relativo (RME) aos mapas não corrigidos, aumentou proporcionalmente ao aumento da declividade no terreno. Na Tabela 6 está apresentado o aumento do RME em função da declividade, para as faces Leste e Sul, sendo denominada face Leste, desde o azimute da superfície inclinada de 45° a 135° e face Sul, desde 135° a 225°. A face voltada, predominantemente, para o leste recebia energia solar diretamente no momento da passagem do satélite, visto

que, a plataforma orbital imagea a superfície da FEE na parte da manhã. Essas superfícies, quando comparadas com as demais classes de faces de exposição, foram as que apresentaram os maiores erros relativos médios. Esse comportamento manteve-se com o aumento da declividade. O comportamento observado para o RME nessa região deve-se ao fato dessas áreas receberem a radiação eletromagnética diretamente, o que fez com que essas assumissem um comportamento mais reflectivo do que o normal, fazendo com que o saldo de radiação assumisse valores inferiores nas imagens sem correção topográfica. Ao corrigir as imagens, as regiões fortemente iluminadas tiveram uma leve queda na reflectância, a qual era causada pela iluminação direta do sol e, consequentemente, assumiram um saldo de radiação superior, compatível ao uso da terra. Esse comportamento pode ser observado no reverso da cuesta (região localizada na porção oeste da FEE), analisando as alterações nas imagens sem correção topográficas com as imagens corrigidas pela correção C.

Tabela 6. Erro relativo médio dos saldos de radiação corrigidos topograficamente por classes de face de exposição da superfície (Leste e Sul), em funções das classes de declividades

Declividade	45 -135 RME (Leste)			135 -225 RME (Sul)		
	n	Rncos	RnC	n	Rncos	RnC
0-3 %	27153	5,96	5,19	9471	3,18	1,18
3-6 %	27279	7,04	5,86	14070	3,44	1,28
6-12 %	30177	7,77	6,19	17577	-	1,59
12-20 %	12894	8,53	6,65	10164	-	1,59
20-45 %	4200	9,54	7,05	4788	-	2,28

RME, erro relativo médio (%); n, número de amostras analisadas; RnCos, saldo de radiação corrigido pela correção topográfica do tipo cosseno; RnC, saldo de radiação corrigido com a correção topográfica do tipo C.

Balthazar et al. (2012) observaram comportamento semelhante ao constatado na FEE para os pixels voltados para o Leste. Esses pesquisadores verificaram um crescimento abrupto das reflectâncias dos pixels correspondentes às classes de aspectos que estavam voltadas para o sol, ao passo que essas reflectâncias diminuíam nas classes que estavam na direção oposta ao sol.

A face Sul (135° a 225°) apresentou o segundo maior RME para a classe de 0-3%, tanto para RnCos, quanto para RnC. A metodologia do cosseno, com o aumento da declividade, na face Sul, ocasionou sobrecorreção, não sendo possível

encontrar valores de RME para as classes de declividade de 6-12%, 12-20% e 20-45%. Essa sobrecorreção foi ocasionada em regiões, nas quais os cossenos dos ângulos de iluminação foram negativos. Já, a correção C, na mesma face de exposição (Sul), apresentou para a primeira classe de declividade o segundo maior RME, porém, à medida que ocorreu o aumento da declividade, não ocorreu o incremento do RME na mesma proporção.

Na Tabela 7 está apresentado o aumento do RME em função da declividade, para as faces Oeste e Norte, sendo denominada face Oeste, desde o azimute da superfície inclinada de 225° a 315° e face Norte, de 315° a 45°.

Tabela 7. Erro relativo médio dos saldos de radiação corrigidos topograficamente por classes de face de exposição da superfície (Oeste e Norte), em funções das classes de declividades

Declividade	225 -315 RME (Oeste)			315 - 45 RME (Norte)		
	n	Rncos	RnC	n	Rncos	RnC
0-3 %	12705	2,41	1,00	18417	1,70	0,76
3-6 %	7707	3,27	1,31	14007	2,34	1,05
6-12 %	6426	-	1,90	14511	2,85	1,29
12-20 %	2667	-	2,03	5460	3,48	1,59
20-45 %	567	6,56	2,35	1617	2,98	1,35

RME, erro relativo médio (%); n, número de amostras analisadas; RnCos, saldo de radiação corrigido pela correção topográfica do tipo cosseno; RnC, saldo de radiação corrigido com a correção topográfica do tipo C.

As superfícies que estão voltadas para o Oeste apresentaram o RME crescente à medida que a declividade aumentou, sendo constatada para essas superfícies uma influência considerável do relevo. O RME dessa face de exposição apenas foi menor à encontrada nas superfícies voltadas para o Leste.

A porção voltada para o Oeste estava oposta aos raios solares, no momento da aquisição das imagens, recebendo dessa forma, uma baixa incidência de energia solar, o que está de acordo com o considerável RME encontrado nessas regiões. A face Norte foi a que apresentou o menor RME, sendo, portanto, uma região menos dependente dos parâmetros relativos ao relevo.

Constatou-se que as faces voltadas para o Leste e para o Oeste foram as que apresentaram os maiores RMEs, sendo a primeira, as superfícies que

receberam diretamente a energia solar e a segunda as superfícies que estavam opostas à energia solar.

6.3 Validação do saldo de radiação

Para validar os dados de Rn obtidos pelo SEBAL, realizou-se uma correlação linear entre os dados de Rg e Rn obtidos na estação meteorológica instalada na Fazenda Experimental Edgardia da FCA/UNESP (Figura 19).

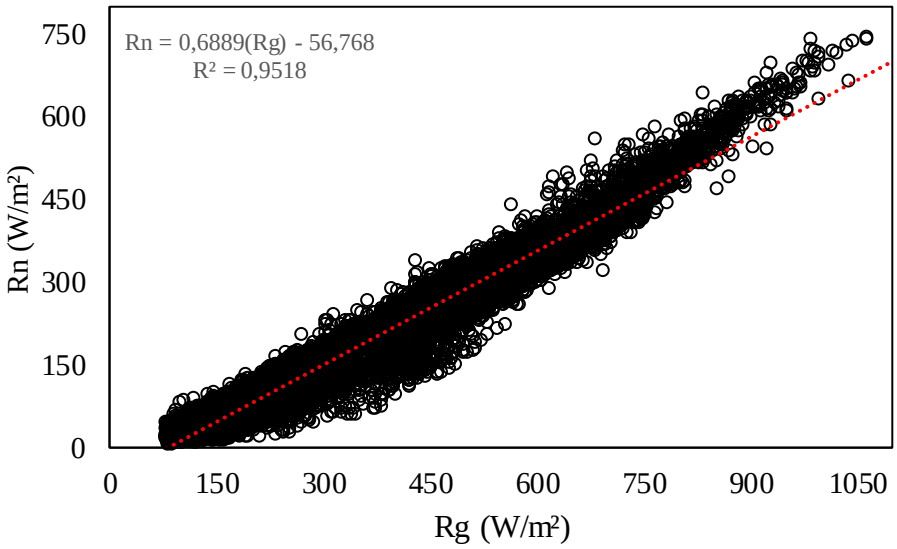


Figura 19. Correlação linear entre Rg e Rn, mensurados na estação meteorológica instalada na Fazenda experimental Edgardia.

A regressão foi realizada com 8386 pares de dados, os quais foram coletados durante dezembro de 2014 a agosto de 2015. O modelo linear apresentou forte coeficiente de determinação entre os dados, sendo o mesmo igual a 0,9518 (Figura 19).

Com a equação gerada a partir da correlação linear, estimou-se Rn para as datas que dispunham de Rg (Estação meteorológica FEL). Assim, com os valores de Rn, coletou-se, para o pixel da estação meteorológica do Lageado, os valores de Rn estimados pelas três metodologias, obtidas pelo SEBAL. Estão apresentados na Tabela 8 os valores de Rn estimados para a estação meteorológica FEL, os Rn estimados por satélite, bem como, o erro relativo entre eles.

Pela Tabela 8 é possível observar que os valores de Rn estimados pela estação meteorológica não apresentam grandes diferenças frente aos estimados por satélite, o que indica a viabilidade de se estimar variáveis meteorológicas por técnicas de sensoriamento remoto. Os erros relativos médios para RnSem, RnCos, RnC foram de 5,59 %, 4,23 % e 4,61 %, respectivamente, para o período de validação dos dados.

Tabela 8. Validação dos dados de saldo de radiação estimados pelo algoritmo SEBAL com os estimados utilizando as Estações meteorológicas da FEE e FEL

Datas	Rn estação	RnSem	RE RnSem (%)	RnCos	RE RnCos (%)	RnC	RE RnC (%)
12/09/1997	427,69	418,79	2,08	435,39	1,80	425,13	0,60
28/09/1997	470,67	484,97	3,04	498,69	5,95	492,36	4,61
01/08/1999	324,85	329,70	1,50	345,85	6,47	336,92	3,72
02/09/1999	417,50	377,59	9,56	393,90	5,65	383,39	8,17
19/08/2000	395,73	378,15	4,44	393,64	0,53	385,00	2,71
06/08/2001	359,32	338,42	5,82	354,19	1,43	342,68	4,63
12/08/2003	359,04	356,52	0,70	372,32	3,70	361,35	0,64
14/08/2004	395,84	364,98	7,80	381,32	3,67	373,11	5,74
17/08/2005	404,15	369,13	8,67	384,97	4,74	376,96	6,73
04/08/2006	345,00	367,13	6,41	381,87	10,69	369,74	7,17
23/08/2007	413,89	398,12	3,81	413,26	0,15	404,90	2,17
08/09/2007	502,11	433,18	13,73	447,94	10,79	441,37	12,10
25/08/2008	430,07	399,08	7,21	414,02	3,73	405,33	5,75
10/09/2008	462,44	450,82	2,51	464,90	0,53	458,71	0,81
16/09/2010	487,14	454,36	6,73	469,51	3,62	463,07	4,94

O fato do RnCos apresentar o menor RME para a série temporal, no pixel relativo à estação da FEL, dentre as três metodologias utilizadas no trabalho, pode ser explicado devido ao fato da análise ser baseada em apenas um pixel, o da estação, o qual está localizado em uma área relativamente plana. Portanto, esse resultado não é contraditório com os encontrados na FEE, pois a correção cosseno, como previsto por Teillet et al. (1982) e Meyer et al. (1993), tem aplicabilidade para correção da diferença da iluminação de superfícies planas, causada devido às diferentes posições que o sol assume em estudos temporais, sendo esta correção eficiente para análises nessas situações.

Wang et al. (2000) utilizaram imagens do Landsat-5/TM acoplado a modelos digitais de elevação para estimar o saldo de radiação em uma área experimental de 289 km², nas proximidades de Manhattan, Kansas, Estados Unidos. Para validação dos

resultados encontrados na pesquisa, esses autores mensuraram o parâmetro em 9 áreas ao longo do experimento e compararam com os dados calculados pelo satélite, obtendo um erro médio inferior a 1 %. Resultado similar a pesquisa desses pesquisadores foram obtidos para a FEE para os dias 12/09/1997, 19/08/2000, 12/08/2003, 23/08/2007 e 10/09/2008 (Tabela 8), considerando pelo menos uma metodologia de correção topográfica.

Gusmão et al. (2012), utilizando o algoritmo SEBAL e imagens do satélite Landsat-5/TM, determinaram o saldo de radiação na Ilha do Bananal-TO para quatro imagens. Esse estudo fez uso de estação meteorológica para validar os dados de saldo de radiação encontrados, tendo como resultado erros relativos de 0,1% a 4,8 %. Resultado similar a esse foi encontrado em boa parte das datas analisadas no presente estudo.

De acordo com os mesmos autores, na grande maioria dos trabalhos com o sensor TM, o Erro Relativo Médio (RME) é inferior a 5%, o que também foi constatado na presente pesquisa, para a estação meteorológica, visto que, encontrou-se um RME para a correção cosseno e correção C inferior a 5 %.

Na mesma linha de raciocínio estão os trabalhos de Santos et al. (2011) e Monteiro et al. (2014), em que, utilizaram o satélite Landsat-5/TM e estimaram componentes do balanço de energia, dentre esses o saldo de radiação. No primeiro trabalho encontraram RMEs de 10,75% e 7,75%, para duas regiões em Rondônia, Brasil. Já, os autores do segundo estudo, encontraram um RME de 7,66%, sendo o menor erro relativo de 2% e o maior de 19%.

É irrefutável o resultado encontrado na validação dos dados da pesquisa, visto que, a mesma está em concordância com os autores supracitados e com inúmeras outras pesquisas realizadas com metodologias semelhantes.

6.4 Considerações finais

Após a análise dos dados, é fato que as interferências do relevo devem ser levadas em consideração no processamento de imagens orbitais, sendo fundamental para que se alcancem maior precisão na estimativa de produtos derivados do sensoriamento remoto, haja visto que:

- foi constatada a influência da topografia nos mapas de RnSem (região sombreada e diretamente iluminada), a qual foi atenuada nos mapas de RnC;

- as classes de aspectos e declividades exerceram maior influência nos Rn das superfícies voltadas, predominantemente, para o leste (incidência de direta do raios solares) e para o oeste (oposta aos raios solares);
- como a estação meteorológica FEL encontra-se em área relativamente plana, a correção cosseno mostrou-se válida na correção topográfica da área.

7 CONCLUSÕES

De acordo com os processamentos realizados para a FEE, com intuito de analisar a dinâmica espaço-temporal do saldo de radiação e o grau de influência da topografia nesses parâmetros, pode-se concluir que:

- os algoritmos de correções topográficas apresentaram diferentes graus de eficiência;
- a correção cosseno não foi capaz de corrigir com eficácia as áreas com baixa luminosidade, onde foram encontrados pixels com notáveis sobrecorreções dos valores para essa metodologia;
- para a correção C, resultado antagônico foi obtido, apresentando-se adequada de acordo com parâmetros qualitativos e quantitativos, sendo capaz de corrigir os efeitos da topografia nos dados de saldo de radiação na FEE;
- questões sazonais foram observadas na série temporal de Rn, com o mês de setembro apresentando maior oferta de radiação solar, do que o mês de agosto;
- constatou-se que a metodologia SEBAL mostrou-se eficaz, o que foi comprovado pelos baixos RME encontrados quando comparados com os dados de Rn estimados para a estação meteorológica da FEL.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, S. Principles of Remote Sensing. In: SIVAKUMAR, M.v.k.; ROY, P.s.; SAHA, K. H.; S.k. (Ed.). **SATELLITE REMOTE SENSING AND GIS APPLICATIONS IN AGRICULTURAL METEOROLOGY AND WMO SATELLITE ACTIVITIES**. Geneva: Bishen Singh Mahendra Pal Singh, 2004. Cap. 2. p. 23-38.

ALLEN, R.G. et al.; BASTIAASSEN, W. **Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)** - Advanced training and User's Manual. Kimberly: Idaho Implementation, 2002. 98 p.

ANDRADE, R. G. et al. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Sebal e imagens Landsat.**Revista Brasileira de Meteorologia,** Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p.433-442, set. 2014.

ARIZA, A. **Decriptión y Corrección de Productos Landsat-8: LDCM - Landsat Data Continuity Mission**. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2013. 44 p.

BALTHAZAR, V.; VANACKER, V.; LAMBIN, E. F. Evaluation and parameterization of ATCOR3 topographic correction method for forest cover mapping in mountain areas. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, Amsterdam, v. 18, p.436-450, ago. 2012.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain – **A Remote Sensing Approach under Clear Skies in Mediterranean Climates**. Thesis, Land bouw universite it Wageningen, Netherlands, 273, 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** ASCE, v.131, p.8593, janeiro/fevereiro, 2005. Disponível em:<http://www.kimberly.uidaho.edu/water/papers/remote/ASCE_JIDE_2005_Bastiaanssen%20et%20al_p85.pdf>. Acesso em: 22 de maio de 2013.

BASTIAANSSEN, W. G.M.; MOLDEN, David J.; MAKIN, Ian W.. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. **Agricultural Water Management**, Colombo, p.137-155, 10 jan. 2000. Mensal.

BATISTA, W. R. M. **Balanço de Radiação e Evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré-SE Mediante Imagens Orbitais.** 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Agroecossistemas, Departamento de Núcleo de Pós-graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2011.

BEZERRA, B. G; DA SILVA, B.B; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Campina Grande, v.23, n.3, abril.2007/janeiro.2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010277862008000300005&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 12 mar. de 2013.

BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 454 p.

CAMARA, G. et al. Spring: integrating remote sensing and gis by object oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v.20, n.3, p 395-403, May-Jun 1996.

CARVALHO, W. A.; PANOSO, L. A.; MORAES, M. H. **Levantamento semidetalhado dos solos da Fazenda Experimental Edgardia – Município de Botucatu**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, 1991. 467 p.

CHAVEZ JR, P. S.. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing Of Environment,** Amsterdam. n. 24, p.459-479, 1988.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing,** Piscataway, v. 41, n. 11, p.2674-2677, nov. 2003.

COLBY, J. D.. Topographic Normalization in Rugged Terrain. **Phtogrammetric Engineering & Remote Sensing,** Bethesda, v. 57, n. 5, p.531-537, maio 1991.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação Climática para os Municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga,** Botucatu, v. 14, n. 1, p.1-11, 2009.

CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Balanço de energia em pimenteiro sob cultivo protegido e a campo. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 159-167, 2001.

CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 735-743, 2002.

CUNHA, A. R.; VOLPE, C.V.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com saldo de radiação medido por diferentes sensores. **Agronomia Tropical**. Maracay, v. 58, n. 1, p. 81-84, 2008.

DI PACE, F. T. et al. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 12, n. 4, p.385-392, 10 jan. 2008.

EBERT, M. **Uso da análise discriminante regularizada (rda) no reconhecimento de padrões em imagens digitais hiperespectral de sensoriamento remoto.** Dezembro de 2001. 118 f. Dissertações (mestrado em sensoriamento remoto) - Centro estadual de pesquisas em sensoriamento remoto e meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

EHLERS, M. Sensoriamento Remoto para Usuários de SIG - Sistemas Sensores e Métodos: entre as Exigências do Usuário e a Realidade. In: BLASCHKE, Thomas; KUX, Hermann. **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. Cap. 2, p. 303.

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SP; Rio de Janeiro: Embrapa-solos, 2013, 306 p.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **Using the USGS Landsat 8 Product:** Conversion to At-Satellite Brightness Temperature. 2013. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php>. Acesso em: 22 jul. 2014.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **Decommission.** 2013. Disponível em: < http://landsat.usgs.gov/L5_Decommission.php >. Acesso em: 23 jul. 2015.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **Landsat processing details.** 2014a. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php>. Acesso em: 23 jul. 2015.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **About Landsat-5.** 2014b. Disponível em: < http://landsat.usgs.gov/L5_Decommission.php >. Acesso em: 23 jul. 2015.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **Band designations Landsat satellites.** 2014c. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php >. Acesso em: 23 jul. 2015.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **Landsat-5 History.** 2014. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php>. Acesso em: 13 jul. 2015.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. **Landsat-5.** 2015. Disponível em: < http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3217>. Acesso em: 23 jul. 2015.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB. Brasília–DF, 2005.

FLORENZANO, T G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

GASH, J. H. C.; SHUTTLEWORTH, W. J.. Tropical deforestation: albedo and the surface-energy balance. **Climatic Change,** Amsterdam, v. 19, p.123-133, 1991.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. 122 f. Tese (Doutorado em irrigação e drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2011.

GIS AG MAPS (Bellevue) (Org.). **Landsat 8 Atmospheric Correction:** Includes COST, DOS, and TOA reflectance. 2014. Disponível em: <http://www.gisagmaps.com/landsat-8-atco/>. Acesso em: 11 ago. 2014.

GRASS Development Team, 2015. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software**, Version 7.0. Open Source Geospatial Foundation. http://grass.osgeo.org. Acesso em: 17/02/2015

GUSMÃO, A. C. V. L. et al. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 16, n. 10, p.1107-1114, 2012.

HANTSON, S.; CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery.**International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation,** Amsterdam, v. 13, n. 5, p.691-700, out. 2011.

HORN, B. K. P.. Hill Shading and the Reflectance Map. **Proceedings Of The Ieee,** New York, v. 69, n. 1, p.14-47, jan. 1981.

HUETE, A.R. **A soil adjusted vegetation index (SAVI)**, Remote Sensing of Environnment, v.2, n.25: p.295-309, 1988.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Centro de previsão de tempos e estudos climáticos - CPTEC. **El niño e la niña**. Disponível em: < http://enos.cptec.inpe.br/tab_elnino.shtml>. Acesso em: 10 dez. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **O que é El niño e La niña.** Disponível em: <http://www.inpe.br/acessoainformacao/node/399>. Acesso em: 10 nov. 2015.

IRONS, J. R.; LOVELAND, T. R. Eigth Land Satellite Becomes Operational. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,** Bethesda, v. 79, n. 5, p.398-401, 01 maios 2013.

JORGE, L. A. B.; SARTORI, M. S.. Uso do solo e análise temporal da ocorrência de vegetação natural na fazenda experimental Edgardia, em Botucatu-SP. **Árvore,** Viçosa, v. 26, n. 5, p.585-592, 2002.

KARA, I. et al. A new efficient method for topographic distortion correction, analytical continuation, vertical derivatives and using equivalent source technique: Application to field data. **Journal Of Applied Geophysics,** Amsterdam, v. 106, p.67-76, jul. 2014.

KOBAYASHI, S.; SANGA-NGOIE, K.. A comparative study of radiometric correction methods for optical remote sensing imagery: the IRC vs. other image-based C-correction methods. **International Journal Of Remote Sensing,** Abingdon, v. 30, n. 2, p.285-314, jan. 2009.

LANDIM, PMB (Coordenador); **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, Folha de Bauru (SF22-Z-B) - Governo do Estado de São Paulo/Unesp, 1984. Escala 1:250.000.

LI, Z. et al. Retrieval of the surface evapotranspiration patterns in the alpine grassland–wetland ecosystem applying SEBAL model in the source region of the Yellow River, China. **Ecological Modelling,** Amsterdam, v. 270, p.64-75, dez. 2013.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 2. ed. New York: Jonh Wiley & Sins, Inc, 1987. 721 p.

LIMA, R. N. de S.; RIBEIRO, C. B. de M. Comparação De Métodos De Correção Topográfica Em Imagens Landsat Sob Diferentes Condições De Iluminação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 5, p.1097-1116, 2014.

LINTZ JUNIOR, J.; SIMONETT, D. S.. **Remote Sensing of Environment**. Massachusetts: Addison-wesley Publishing Company, 1976. 694 p.

LORENZZETTI, J. A.. **Princípios físicos de sensoriamento remoto.** São Paulo: Blucher, 2015. 293 p.

LOVELAND, T. R.; DWYER, J. L.. Landsat: Building a strong future. **Remote Sensing Of Environment,** Amsterdam, v. 122, p.22-29, jul. 2012.

MATOS, R. C. de M. et al. Análise multitemporal do albedo, ndvi e temperatura no entorno do reservatório de Itaparica – Pe: Anos De 1985 E 2010. **Revista Brasileira de Cartografia,** Brasília, v. 67, n. 3, p.545-554, jan. 2015.

MÄTZLER, C.. Physical Principles of Remote Sensing. Bern. 2008. 126 f.

MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem landsat 5** - TM na bacia do Acaraú – CE. 2007. 89 f. Dissertações (Mestrado em irrigação e drenagem) - Departamento de Eng. Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2007.

MENESES, P. R. et al. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** 2012. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 10 maio 2014.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília, 2001. 262 p.

MENEZES, S. J. M. da C. de et al. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso. **Engenharia na Agricultura,** Viçosa, v. 17, n. 6, p.491-503, nov. 2009.

MEYER, P. et al. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment.**Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing,** Amsterdam, v. 48, n. 4, p.17-28, jan. 1993.

MONTEIRO, P. F. C. et al. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia,** Campinas, v. 73, n. 1, p.72-80, mar. 2014.

MOREIRA, M. A. **Sistemas Sensores**. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. INPE. Disponível em:< http://www. ltid. inpe. br/dsr/mauricio/sensores. PDF>. Acesso em, v. 20, 2001.

MOREIRA, M. A.. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora Ufv, 2007. 320 p.

MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M M.. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation,** Amsterdam, v. 32, p.208-217, out. 2014.

NOVO, E M. L. de M.. **Sensoriamento Remoto:** Princípios e Aplicações. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 388 p.

OLIVEIRA, T. H. de et al. Análise da Variação Espaço-Temporal das Áreas Verdes e da Qualidade Ambiental em Áreas Urbanas, Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física,** Recife, v. 7, n. 6, p.1196-1214, jan. 2014.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS**. Versão 2.8.3. 2015 Disponível em http://www.qgis.org/en/site/. Acesso em 23/07/2015

RANSON, K. J.; IRONS, J. R.; DAUGHTRY, C. S. T.. Surface albedo from bidirectional reflectance. **Remote Sensing Of Environment,** Amsterdam, v. 35, n. 1, p.201-211, 1991.

REESE, H.; OLSSON, H.. C-correction of optical satellite data over alpine vegetation areas: A comparison of sampling strategies for determining the empirical c-parameter. **Remote Sensing Of Environment,** Amsterdam, v. 115, n. 6, p.1387-1400, jun. 2011.

RIAÑO, D. et al. Assessment of different topographic corrections in landsat-TM data for mapping vegetation types (2003).**Ieee Trans. Geosci. Remote Sensing,** Piscataway, v. 41, n. 5, p.1056-1061, maio 2003.

RICHTER, R.; KELLENBERGER, T.; KAUFMANN, H. Comparison of Topographic Correction Methods. **Remote Sensing,** Basileia, v. 1, n. 3, p.184-196, 6 jul. 2009.

RICHTER, R.. **Correction of satellite imagery over mountainous terrain**. Applied Optics, Washington, v. 18, n. 37, p.4004-4015, jun. 1998.

ROBINOVE, C. J. et al. Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo Difference Images. **Remote Sensing Of Environment,** Amsterdam, v. 11, p.133-156, 1981.

ROY, D. P. et al. Landsat-8 Science and product vision for terrestrial global. **Remote Sensing of Environment,** Philadelphia, p.154-172, 5 abr. 2014.

ROUSE, J.W. et al. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371 p

SANTOS, C. A. C. dos; NASCIMENTO, R. L. do; RAO, T. V. R.. Net radiation estimation under pasture and forest in Rondônia, Brazil, with TM Landsat 5 images. **Atmósfera,** [s.i], v. 24, n. 4, p.435-446, jan. 2011.

SANTOS, E. G. dos et al. Análise de parâmetros ambientais no núcleo de desertificação de Irauçuba - CE usando imagens de satélite. **Revista Brasileira de Geografia Física,** Recife, v. 7, n. 5, p.915-926, jan. 2014.

SAUSEN, T.M. Sensoriamento remoto e suas aplicações para recursos naturais.1990. Disponível em: < http://200.132.36.199/elodio/downloads/sr/SR_T05.pdf> 23 de maio 2013.
SEBAL.**Surface Energy Balance Algorithms for Land**. Disponível em:<http://www.sebal.us>. Acesso em: 26 de maio de 2013.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. 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, fev. 2005.

SOLA, I. et al. Synthetic Images for Evaluating Topographic Correction Algorithms. **Ieee Trans. Geosci. Remote Sensing,**Piscataway, v. 52, n. 3, p.1799-1810, mar. 2014.

STEFFEN, C. A.; SOLAR, RADIAÇÃO. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 2006.
SZANTOI, Z.; SIMONETTI, D.. Fast and Robust Topographic Correction Method for Medium Resolution Satellite Imagery Using a Stratified Approach. **Ieee Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing**, Piscataway, v. 6, n. 4, p.1921-1933, ago. 2013.

TAN B.; W. R. et al.. **An illumination correction algorithm on Landsat-TM data**. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium
(IGARSS), 2010 IEEE International. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International; 2010. p. 1964-1967.

TANG, R. et al. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data.**Agricultural And Forest Meteorology,** Amsterdam, v. 174-175, p.28-42, jun. 2013.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R.. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. **Journal Of Hydrologic Engineering,** Reston, v. 13, n. 2, p.51-63, fev. 2008.

TEILLET, P.M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D.G.. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal Of Remote Sensing,** Ottawa, v. 8, n. 2, p.84-106, dez. 1982.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; **Meteorologia e Climatologia**, Versão Digital 2, Recife, 2006 Disponível em:<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce5702/Meteorologia_e_Climatologia_VD2_Mar_2006.pdf >. Acesso em: 17 agosto 2015

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R.. **Meteorologia básica e aplicações.** 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 460 p.

WANG, J.; WHITE, K.; ROBINSON, G. J.. Estimating surface net solar radiation by use of Landsat-5 TM and digital elevation models. **International Journal Of Remote Sensing,** Abingdon, v. 21, n. 1, p.31-43, jan. 2000.

WATERWATCH (Netherlands). **A scientific description of SEBAL procedure.** 2014. Disponível em: <http://www.waterwatch.nl/tools0/sebal/sebal-a-scientific-description.html>. Acesso em: 20 ago. 2014.

WATRIN, O. dos S.; MACIEL, M. de N. M. **Curso de Introdução as Técnicas de Sensoriamento Remoto.** 2005. Disponível em: <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Curso-De-Introdução-As-Tecnicas-De/596039.html>. Acesso em: 11 maio 2014.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals Of Botany,** Oxford, v. 41, n. 11, p.41-76, jan. 1947.
WU, J. et al. A comparison of illumination geometry-based methods for topographic correction of QuickBird images of an undulant area. **Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing,** Amsterdam, v. 63, n. 2, p.223-236, mar. 2008.

ZHANG, Xiao-chun et al. Simplified SEBAL method for estimating vast areal evapotranspiration with MODIS data. **Water Science And Engineering,** Nanjing, v. 4, n. 1, p.24-35, jan. 2011.