

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N<sup>o</sup> 66/5: 1097-1116  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CORREÇÃO TOPOGRÁFICA EM IMAGENS LANDSAT SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO**

*Comparison of Topographic Correction Methods on Landsat Imagery under  
Different Lighting Conditions*

**Ricardo Neves de Souza Lima<sup>1</sup> & Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**

**Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI**

Rua General Canabarro, 706, Maracanã, CEP: 20271-205, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

ricneves80@yahoo.com.br

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF**

**Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - ESA, Faculdade de Engenharia**

Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, CEP: 36036-900 - 4<sup>a</sup> Plataforma – Sala 4142, Juiz de Fora/MG, Brasil.

celso.bandeira@ufjf.edu.br

*Recebido em 07 de Janeiro, 2012/ Aceito em 12 de Maio, 2012*

*Received on January 07, 2012/ Accepted on May 17, 2012*

### **RESUMO**

Distorções geométricas e radiométricas em imagens orbitais são comuns, especialmente em terrenos montanhosos. O sombreamento topográfico dificulta a extração de informações a partir de imagens de satélite, limitando muitas vezes a análise multitemporal de fenômenos nestes locais. Nos últimos anos diversos métodos foram desenvolvidos para permitir a normalização topográfica de imagens orbitais e reduzir estes efeitos, baseados na modelagem do comportamento não-lambertiano da superfície. Este trabalho visou à avaliação destes métodos para a correção topográfica de imagens Landsat TM5 sob diferentes condições de iluminação, a partir de rotinas desenvolvidas em ambiente SIG/ArcGIS. Foram testados 6 algoritmos não-lambertianos de correção topográfica aplicados sobre 8 cenas TM/Landsat ortorretificadas. A iluminação solar sobre o terreno foi estimada a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE/TOPODATA) e dos ângulos solares em cada período analisado. Os resultados indicaram que todos os métodos testados reduziram significativamente o efeito topográfico nas imagens, com uma redução média de 78,6% no coeficiente de correlação entre a reflectância e o cosseno do ângulo de incidência solar, e de 10,4% no desvio padrão da reflectância. Estatisticamente não foram observadas diferenças no desempenho entre os algoritmos, porém, visualmente os métodos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional apresentaram desempenho sensivelmente superior, principalmente por não gerarem pixels com sobrecorreção. A implementação das rotinas de correção topográfica em SIG possibilitou automatizar a estimativa dos coeficientes empíricos de cada algoritmo, favorecendo a eficiência e a redução no tempo de processamento. Destaca-se a importância da aplicação destas técnicas para uma melhor utilização dos dados de sensoriamento remoto em terrenos montanhosos.

**Palavras chaves:** Normalização Topográfica, Landsat TM5, Ângulo de Iluminação, Áreas Montanhosas.

## ABSTRACT

Geometric and radiometric distortions on orbital images are common, especially in mountainous terrain. The topographic shading makes it difficult to extract information from satellite images, often limiting the multitemporal analysis of phenomena in these locations. In recent years several methods were developed to allow topographic normalization of orbital images and reduce these effects, based on the modeling of the non-Lambertian surface behavior. This study aims to evaluate these methods for topographic correction of Landsat TM5 images under different lighting conditions, from routines developed in ArcGIS/GIS environment. Were tested 6 non-lambertian topographic correction algorithms applied on 8 orthorectified TM / Landsat scenes. The ground solar lighting was estimated from the Digital Elevation Model (DEM / TOPODATA) and solar angles in each period. The results indicated that all methods tested significantly reduced the topographic effect on the images, with an average reduction of 78.6% in the correlation coefficient between the reflectance and the cosine of solar incidence angle, and 10.4% in the standard deviation of reflectance. Statistically no differences were observed in performance between the algorithms, however, visually the Empirical Statistical and Empirical Rotation methods showed significantly higher performance, especially by non-generate pixels with overcorrection. The implementation of topographic correction routines in GIS allowed automates the estimation of empirical coefficients of each algorithm, promoting efficiency and reduction in processing time. We highlight the importance of these techniques for better use of remote sensing data in mountainous terrain.

**Keywords:** Topographic Normalization, Landsat TM5, Illumination Angle, Mountainous Areas.

## 1. INTRODUÇÃO

A correta extração de informações provenientes de imagens orbitais depende em grande parte da qualidade radiométrica destes dados, os quais variam principalmente em função de interferências atmosféricas e das condições de iluminação do terreno.

Em ambientes topograficamente complexos o sinal recebido pelo sensor imageador orbital sofre variações devido às diferenças nos ângulos de incidência solar, causando os efeitos de sombreamento e de maior brilho nas encostas opostas e favoráveis ao Sol, respectivamente.

Estes efeitos, decorrentes basicamente das características topográficas do terreno, referem-se às variações de irradiância observada a partir de uma superfície inclinada, em comparação com as respostas espectralradiométricas de uma superfície horizontal, como uma função do ângulo de incidência efetivo e do ângulo emergente (HOLBEN & JUSTICE, 1980; JUSTICE *et al.*, 1981; WU *et al.*, 2008).

De acordo com Li *et al.* (2012) em superfícies anisotrópicas (não-lambertianas) o sinal detectado pelo sensor sofre também a influência da rugosidade da cobertura do solo, e que, combinado com os efeitos da geometria do terreno, dos ângulos de incidência solar e de visada do satélite, dificultam o monitoramento de ambientes montanhosos por imagens orbitais.

A redução destas distorções é de fundamental importância em estudos multi-temporais relacionados ao uso e cobertura do solo, análise de parâmetros biofísicos da vegetação, modelagem hidrometeorológica (HANTSON & CHUVIECO, 2011; EDIRIWEERA *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2010), entre outros. Neste sentido, a prévia homogeneização radiométrica e geométrica dos dados orbitais de entrada permitem um ganho expressivo de qualidade e confiabilidade nos resultados provenientes de análises que utilizam como base o sensoriamento remoto.

Com a crescente disponibilização do acervo de imagens Landsat nos últimos anos, assim como de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta resolução, como os produtos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e Aster GDEM, alguns algoritmos e técnicas de correção (ou normalização) topográfica passaram a ser utilizados para eliminar ou pelo menos reduzir a influência da topografia em imagens orbitais (EKSTRAND, 1996; RIANO *et al.*, 2003; SOENEN *et al.*, 2005; RICHTER *et al.*, 2009; BALTHAZAR *et al.*, 2012).

A maioria das técnicas de correção topográfica utiliza um MDE da região em estudo para descrever a topografia e assim permitir a modelagem das condições de iluminação através do cálculo do ângulo local de incidência solar

(SMITH *et al.*, 1980; HOLBEN & JUSTICE, 1980). Este parâmetro é obtido por meio da geometria esférica, com base em informações referentes à declividade e orientação da encosta e dos ângulos zenital e azimutal solares. O método mais simples de correção topográfica é a Correção Cosseno (TEILLET *et al.*, 1982), que assume a superfície como lambertiana, ou seja, onde a reflectância independe do ângulo de observação.

Como a superfície terrestre apresenta comportamento predominantemente não-lambertiano, a correção topográfica deve considerar também os efeitos da irradiância difusa em cada faixa espectral (banda), os quais podem ser modelados pela inclusão de constantes obtidas por regressão estatística entre o ângulo local de incidência solar e o fator de reflectância. Com este objetivo diversos algoritmos semi-empíricos foram desenvolvidos, destacando-se a correção Minnaert (MINNAERT, 1941; SMITH *et al.*, 1980); correção C (TEILLET *et al.*, 1982); correção SCS+C (SOENEN *et al.*, 2005); correção Empírico-Estatística (TEILLET *et al.*, 1982; MEYER *et al.*, 1993), entre outros (VANONCKELEN *et al.*, 2013).

## 2. REVISÃO DOS PRINCIPAIS ALGORITMOS DE CORREÇÃO TOPOGRÁFICA

A modelagem das condições locais de iluminação do terreno pelo sol requer o uso de um MDE com a mesma resolução espacial da imagem orbital a ser corrigida (RIAÑO *et al.*, 2003). O cosseno do ângulo local de incidência solar ( $i$ ) em relação à normal de cada pixel (Figura 1) pode então ser obtido a partir dos ângulos de inclinação ( $\phi_s$ ) e de orientação ( $\phi_N$ ) do terreno, assim como dos ângulos zenital ( $\theta_z$ ) e azimutal ( $\theta_N$ ) do sol, na forma da Equação 1 (HOLBEN & JUSTICE, 1980; SMITH *et al.*, 1980):

$$\cos i = \cos\phi_s \cos\theta_z + \sin\phi_s \sin\theta_z \cos(\theta_N - \phi_N) \quad (1)$$

Os valores de  $\cos i$  variam em geral de 0 a 1, onde os valores próximos a 0 representam áreas pouco iluminadas, com ângulo zenital solar  $\sim 90^\circ$  (ângulo de elevação solar  $\sim 0^\circ$ ), enquanto valores

em torno de 1 representam áreas com iluminação máxima, com ângulo zenital solar  $\sim 0^\circ$  (ângulo de elevação solar  $\sim 90^\circ$ ). Eventualmente, em áreas totalmente sombreadas ocorrem valores nulos ou negativos de  $\cos i$ , que representam locais onde não ocorre a incidência da radiação solar direta no instante da passagem do satélite.

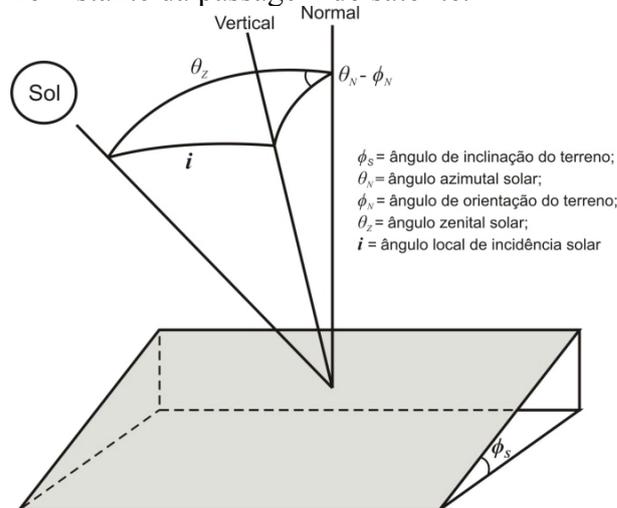


Fig. 1 - Ilustração dos ângulos envolvidos para o cálculo do ângulo local de incidência solar ( $i$ ) em cada pixel (adaptado de Füreder, 2010).

Uma vez que o  $\cos i$  é computado para toda a imagem da área de estudo, é possível estimar a reflectância normalizada para cada pixel com relação a uma superfície plana, a partir de métodos lambertianos e não-lambertianos (RIAÑO *et al.*, 2003).

### 2.1 Métodos Lambertianos

Um dos métodos lambertianos mais utilizados para a correção topográfica de imagens é a Correção Cosseno proposta por Teillet *et al.* (1982), na seguinte forma (Equação 2):

$$\rho_h = \rho_T \left( \frac{\cos\theta_z}{\cos i} \right) \quad (2)$$

onde  $\rho_h$  é a reflectância em uma superfície horizontal (normalizada), e  $\rho_T$  é a reflectância em uma superfície inclinada.

Apesar da facilidade de aplicação deste método, por não exigir parâmetros externos, em locais com pouca iluminação, isto é, baixos valores de  $\cos i$ , há a ocorrência de sobrecorreção dos valores de reflectância, resultando em áreas com brilho superior às encostas direcionadas

para o sol (TEILLET *et al.*, 1982; CIVCO, 1989; TWELE & ERASMI, 2005). Em outros casos não é possível a solução da Equação 2, pela ocorrência do valor “0” no denominador ( $\cos i = 0$ ), acarretando em valores de reflectância nulos (*NoData*).

Um aperfeiçoamento da correção cosseno proposto por Civco (1989), leva em consideração as condições médias de iluminação da cena, visando reduzir os efeitos da sobrecorreção (Equação 3):

$$\rho_h = \rho_T + \rho_T \left( \frac{\cos \bar{i} - \cos i}{\cos \bar{i}} \right) \quad (3)$$

onde  $\bar{i}$  é a média do ângulo local de incidência solar para a área de estudo.

Li *et al.* (2012) afirmam que a maior parte dos trabalhos têm demonstrado que a correção cosseno não permite a efetiva correção topográfica de imagens orbitais, atribuindo este fato a não consideração da irradiância difusa em sua formulação. Além disso, os métodos lambertianos utilizam o mesmo fator de correção para todas as bandas, sendo uma forma inapropriada para modelar a irradiância difusa (RIÑO *et al.*, 2003).

## 2.2 Métodos Não-Lambertianos

Os métodos de correção não-lambertianos consideram os ângulos de incidência e de observação da irradiância no cômputo da variação da reflectância em cada banda. Desta forma, a irradiância difusa provocada pelas imperfeições do terreno pode ser modelada, tornando mais próximo da realidade física o processo de correção topográfica de imagens através deste tipo de método.

Dentre os métodos não-lambertianos, a correção Minnaert é a mais amplamente utilizada. Baseada nas idéias de Minnaert (1941), que inicialmente propôs uma equação semi-empírica para descrever a rugosidade da superfície da lua, esta correção foi posteriormente utilizada por Smith *et al.*, 1980 para a obtenção da reflectância normalizada a partir de imagens de satélites. A correção Minnaert pode ser descrita pela Equação 4 (RIÑO *et al.*, 2003; FÜREDER, 2010):

$$\rho_h = \rho_T \left( \frac{\cos \theta_Z}{\cos i} \right)^k \quad (4)$$

onde  $k$  é a constante de Minnaert para cada banda espectral do sensor. Esta constante descreve a função de distribuição da reflectância bidirecional na superfície, em que  $k = 1$  representa um comportamento lambertiano, enquanto a redução de  $k$  indica o aumento do comportamento anisotrópico (não-lambertiano). Esta constante é igual ao coeficiente angular gerado pela seguinte equação de regressão linear (Equação 5), na forma :

$$\log(\rho_T \cos \theta_Z) = k \log(\cos \theta_Z \cos i) + \log \rho_h \quad (5)$$

onde  $\log(\rho_T \cos \theta_Z)$  é a variável dependente (y);  $\log(\cos \theta_Z \cos i)$  é a variável independente (x);  $k$  é a constante de Minnaert para cada banda (coeficiente angular) e;  $\log \rho_h$  é o coeficiente linear ou intercepto (b).

Colby (1991) propôs um aperfeiçoamento do método Minnaert com a inclusão do ângulo de inclinação do terreno ( $\phi_S$ ), sendo conhecido como método Minnaert com declividade (Equação 6):

$$\rho_h = \rho_T \cos \phi_S \left( \frac{\cos \theta_Z}{\cos i \cos \phi_S} \right)^k \quad (6)$$

Outro método semi-empírico, similar à correção Cosseno, é a correção C (Equação 7), desenvolvida por Teillet *et al.* (1982), porém, esta utiliza a constante  $c$  para modelar a irradiância difusa sobre a superfície e também para compensar os efeitos da sobrecorreção da correção cosseno:

$$\rho_h = \rho_T \left( \frac{\cos \theta_Z + c}{\cos i + c} \right) \quad (7)$$

onde  $c$  é a constante derivada a partir da relação linear entre a reflectância espectral ( $\rho_T$ ) e o cosseno do ângulo de incidência solar ( $\cos i$ ). A constante  $c$  é obtida para cada banda pela divisão entre o coeficiente linear ou intercepto (b) e o coeficiente angular (m) (Equação 8) da regressão linear entre  $\rho_T$  (y) e  $\cos i$  (x) (Equação 9):

$$c = \frac{b}{m} \quad (8)$$

$$\rho_T = m \cos i + b \quad (9)$$

O método SCS+C proposto por Soenen *et al.* (2005), baseia-se na correção C com a adição do método *Sun-Canopy-Sensor* (SCS) que inclui a modelagem da irradiância difusa em dosséis, a qual é influenciada também pelo sombreamento gerado pelas diferenças geométricas entre as árvores. A formulação do método SCS+C é dada pela Equação 10 (SOENEN *et al.*, 2005):

$$\rho_h = \rho_T \left( \frac{\cos \phi_s \cos \theta_z + c}{\cos i + c} \right) \quad (10)$$

onde  $\phi_s$  é o ângulo de inclinação do terreno (declividade).

Teillert *et al.* (1982) também propuseram um método totalmente baseado no ajuste empírico-estatístico (Equação 11) entre os valores de reflectância ( $\rho_T$ ) e o cosseno do ângulo de incidência solar ( $\cos i$ ) (HANTSON & CHUVIECO, 2011):

$$\rho_h = \rho_T - m \cos i - b + \bar{\rho}_T \quad (11)$$

onde  $m$  e  $b$  são respectivamente, o coeficiente angular e o intercepto da regressão da Equação 9 e  $\bar{\rho}_T$  é a reflectância média de cada tipo de cobertura da terra em investigação. De acordo com Füreder (2010) a desvantagem deste método é a necessidade de uma classificação prévia dos tipos de cobertura da terra e a aplicação separadamente deste método para cada classe, o que resulta em um maior esforço operacional e de tempo de processamento dos dados.

O método recentemente desenvolvido por Tan *et al.* (2010) denominado modelo empírico rotacional (Equação 12), também baseia-se na abordagem empírica, e visa remover a dependência da reflectância de cada banda em função da iluminação, conforme a relação linear da Equação 9, anteriormente descrita:

$$\rho_h = \rho_T - m(\cos i - \cos \theta_z) \quad (12)$$

onde  $m$  é o coeficiente angular proveniente da regressão linear da Equação 9.

Diversos autores demonstraram a eficiência destes algoritmos na minimização dos efeitos topográficos em imagens orbitais sobre áreas montanhosas, especialmente para fins de avaliação da cobertura do solo e da vegetação (EKSTRAND, 1996; RIAÑO *et al.*, 2003; GAO & ZHANG, 2009; BALTHAZAR *et al.*, 2012; TAN *et al.*, 2013; VANONCKELEN *et al.*, 2013).

Entretanto, ainda são poucas as pesquisas que avaliam a eficiência dos algoritmos de correção topográfica sob diferentes condições de iluminação, ou seja, em diferentes períodos do ano (RICHTER *et al.*, 2009; HANTSON & CHUVIECO, 2011; LI *et al.*, 2012). Além disso, a complexidade e as dificuldades de automação destes algoritmos limitam sua aplicação sistemática em extensas bases de dados de imagens orbitais.

Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo avaliar a eficiência de alguns algoritmos não-lambertianos de correção topográfica em imagens Landsat TM5 sob diferentes condições de iluminação, através da implementação de rotinas operacionais em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi selecionada uma área topograficamente complexa cujo sombreamento causado pelo relevo prejudica a interpretação de imagens de satélites que operam nas faixas do visível e infravermelho, limitando a utilização destes dados, especialmente em estudos multi-temporais.

#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho corresponde a um retângulo envolvente que abrange o município de Juiz de Fora – MG e entorno, localizando-se na porção sudeste do estado de Minas Gerais (Mesorregião da Zona da Mata), entre as coordenadas geodésicas 21°29'10,6" S; 43°06'14,2" W e 22°00'05,1" S; 43°43'56,4" W (Figura 2).

Esta área se caracteriza por um relevo

acidentado variando de ondulado a montanhoso, geralmente exibindo elevações com topos arredondados ou alongados, com vertentes convexas e côncavo-convexas. As menores altitudes situam-se em torno de 300m, na porção

sudeste e nordeste da área de estudo, enquanto as maiores elevações apresentam altitudes que ultrapassam os 1000m, especialmente em trechos serranos a oeste e noroeste da área.

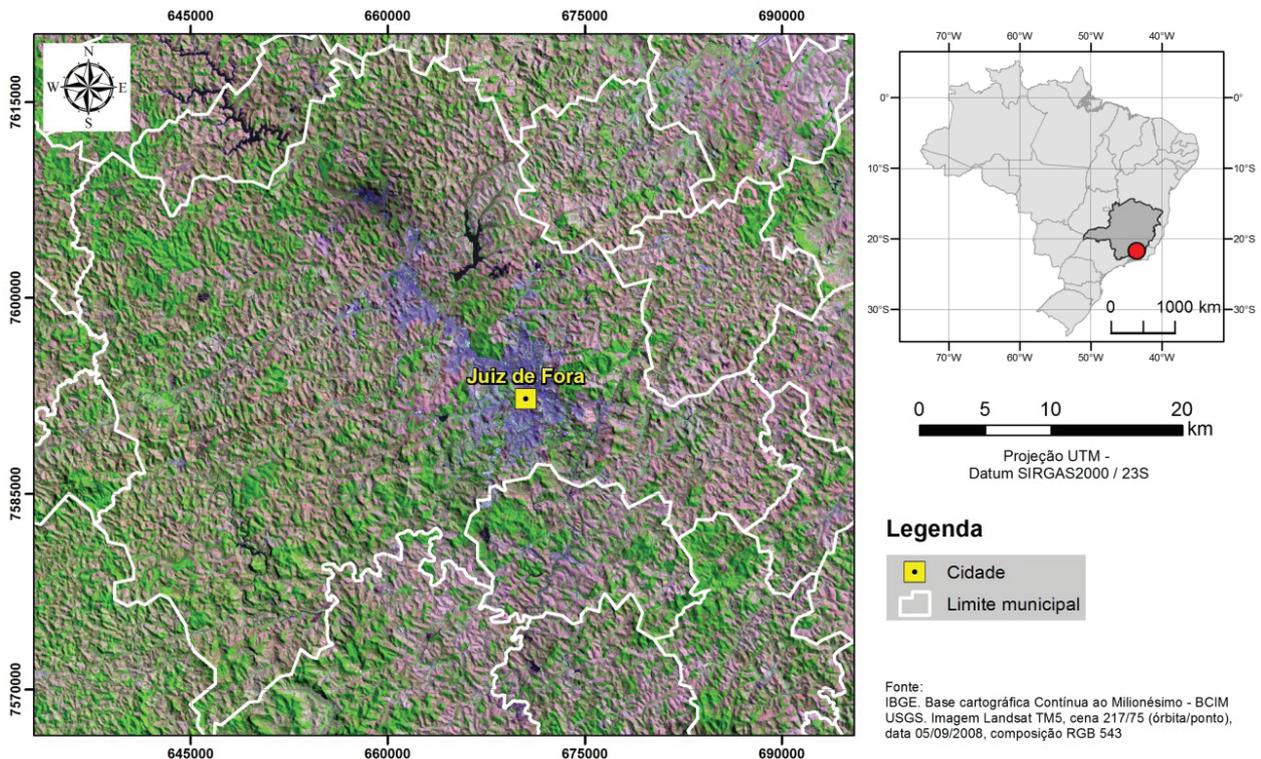


Fig. 2 - Localização da área de estudo.

As declividades associadas ao relevo acidentado são proeminentes em toda a área, exceto nos vales fluviais. A declividade média da área de estudo situa-se em torno de  $14^\circ$ , no entanto, há a ocorrência frequente de encostas com declividades superiores a  $20^\circ$ .

Devido às características topograficamente complexas desta área as condições de iluminação apresentam grande variação, o que representa um fator de interesse na aplicação de técnicas que permitam a redução dos efeitos topográficos em imagens orbitais, especialmente em períodos com menor incidência dos raios solares.

### 3.2 Aquisição e Pré-processamento dos dados

Neste trabalho optou-se por utilizar imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat 5, que operou de março de 1984 a novembro de 2011 (USGS, 2013a). Devido ao grande acervo histórico de imagens disponíveis do sensor TM e a alta

repetitividade de dados sobre uma mesma região, a sua utilização apresenta muitas vantagens em estudos que envolvem mudanças temporais na paisagem.

#### 3.2.1 Base de Dados

Foram obtidas 8 cenas do sensor TM do satélite Landsat 5 da base de dados da *U.S. Geological Survey* (USGS), correspondente à órbita/ponto 217/75 (WRS-2), em diferentes datas de passagem (Tabela 1). Buscou-se utilizar cenas sob condições de iluminação variadas, nos meses de março a outubro, de forma a abranger, na medida do possível, a variação sazonal nos ângulos zenital e azimutal do sol. Foram selecionadas cenas com fração de cobertura de nuvens (FCN) inferior a 10%.

As cenas do satélite Landsat adquiridas da USGS foram fornecidas ortorretificadas com nível de correção *Standard Terrain Correction* (*Level 1T*) (USGS, 2013b). Mais informações

sobre os produtos Landsat fornecidos pela USGS podem ser encontradas em Loveland e Dwyer (2012).

O MDE utilizado foi proveniente do projeto TOPODATA (VALERIANO *et al.*, 2009) desenvolvido a partir do refinamento espacial dos dados SRTM de 3 arcos-segundo para 1 arco-segundo (~30m), através da aplicação de um conjunto único de coeficientes geoestatísticos. A opção de utilização do MDE TOPODATA em detrimento do produto ASTER GDEM, com resolução original de 30m, justifica-se pelo fato de que os dados SRTM são menos sujeitos a erros sistemáticos, como faixas (*stripes*) e anomalias provocadas por nuvens (HIRT *et al.*, 2010).

Tabela 1: Características das cenas do sensor TM/Landsat, em diferentes meses e anos, utilizados no estudo.

Data	Zênite Solar (°)	Azimu-te Solar (°)	FCN (%)
02/03/1998	40,42	74,97	0
19/04/2004	47,69	49,53	6
06/05/2010	49,24	41,58	0
27/06/2000	57,52	40,80	0
22/07/2003	55,82	43,88	0
13/08/2011	49,45	45,67	0
05/09/2008	43,28	53,06	3
04/10/2001	35,78	65,99	0

(\*) FCN - Fração de Cobertura de Nuvens

### 3.2.2 Correção Atmosférica FLAASH

Como a atmosfera é uma importante fonte de distorções radiométricas em imagens orbitais (VERMOTE *et al.*, 1997), é desejável que seja realizada, previamente à correção topográfica, a minimização de seus efeitos através de métodos de correção atmosférica.

Neste trabalho, cada banda das imagens Landsat, no formato original (*Digital Numbers* – DN), foi convertida para radiância espectral no topo da atmosfera (aparente), através dos coeficientes de calibração apresentados em Chander *et al.* (2009), utilizando a Equação 13:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \tag{13}$$

onde  $L_{\lambda}$  é a radiância espectral ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ );  $Q_{cal}$  é o valor do pixel na imagem original (DN);  $Q_{calmin}$  é o mínimo valor do pixel correspondente à  $LMIN_{\lambda}$  (DN);  $Q_{calmax}$  é o máximo valor do pixel correspondente a  $LMAX_{\lambda}$  (DN);  $LMIN_{\lambda}$  é a radiância espectral mínima no sensor ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ) e;  $LMAX_{\lambda}$  é a radiância espectral máxima no sensor ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ).

Após a conversão de cada cena Landsat para radiância espectral aparente foi calculada a reflectância de superfície, através do algoritmo de correção atmosférica FLAASH® (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*), utilizando o software ENVI, versão 5.0. O algoritmo FLAASH se baseia no código de transferência radiativa MODTRAN®, que permite estimar a reflectância de superfície por meio da modelagem das condições atmosféricas e de aerossóis sobre cada cena, eliminando as principais interferências. Maiores detalhes sobre o algoritmo FLAASH e o código MODTRAN podem ser encontrados em Adler-Golden *et al.* (1998) e Berk *et al.* (1989), respectivamente.

O modelo de aerossóis utilizado no algoritmo FLAASH foi o “*rural*” com o método “*Kaufman-Tanre*” com duas bandas (TM7 e TM3) para a estimativa da quantidade de aerossóis. A visibilidade inicial foi selecionada em 40 km, considerando para todas as cenas as condições de céu claro, sem nuvens. Com relação ao modelo atmosférico foi selecionada a opção “*Mid-Latitude Summer*” para as cenas compreendidas entre julho e setembro, e para as demais cenas a opção “*Tropical*” conforme indicado em Exelis (2013). A altitude média da área de estudo foi definida em 700m.

### 3.3 Implementação dos algoritmos de correção topográfica em ambiente SIG

Os algoritmos de correção topográfica testados no estudo foram: Minnaert (Equação 4); Minnaert com Declividade (Equação 6); Correção C (Equação 7); SCS+C (Equação 10); Empírico-Estatístico (Equação 11) e Empírico-Rotacional (Equação 12).

Estes algoritmos, assim como o cálculo do ângulo local de incidência solar (Equação 1), foram implementados em ambiente SIG através da construção de rotinas operacionais no módulo

*ModelBuilder* do software ArcGIS®, versão 10.1. Deste modo foi elaborada uma ferramenta de geoprocessamento (*toolbox*), com rotinas para cada método de correção topográfica testado.

Uma das dificuldades da utilização de métodos não-lambertianos de correção topográfica em grandes áreas é que seus parâmetros são dependentes do tipo de cobertura da terra (HANTSON & CHUVIECO, 2011). Por isso, como forma de agrupar sistematicamente superfícies com características espectrais similares, optou-se por utilizar o NDVI (ROUSE *et al.*, 1974) de cada cena, definindo-se um limiar arbitrário de 0,4 para a separação das áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal daquelas com vegetação de maior porte. Para a definição deste limiar considerou-se que áreas vegetadas com formação de dossel (culturas agrícolas, matas, reflorestamentos, etc) geralmente apresentam valores de NDVI superiores a 0,4 (GURGEL *et al.*, 2003; ROSENDO & ROSA, 2005; DALLA NORA & SANTOS, 2010; MOREIRA *et al.*, 2013), tendo sido este o mesmo limiar adotado por Hantson & Chuvieco (2011) para a estimativa dos parâmetros de correção topográfica na região central da Espanha. Assumiu-se que nas áreas de

vegetação arbórea/arbustiva a irradiância difusa é mais intensa, devido ao maior espalhamento da radiação pelas folhas e pela geometria do dossel.

Para evitar a estimativa dos parâmetros de correção em áreas planas, também foi utilizado um limiar de 1° de declividade para eliminar áreas com declividades inferiores a este valor, utilizando o MDE/TOPODATA. Dessa forma os parâmetros de correção foram calculados apenas sobre estas áreas.

O fluxograma geral dos procedimentos adotados pode ser observado na Figura 3, e a descrição da sequência de rotinas do *toolbox* de correção topográfica desenvolvido é apresentada nos subitens a seguir.

### 3.3.1 Iluminação e Reflectância

Para permitir a aplicação das rotinas de correção topográfica, propriamente ditas, foram implementados, no *toolbox*, os algoritmos para o cálculo do ângulo de incidência solar e para conversão das imagens Landsat brutas em valores de reflectância. Esta última consiste em um parâmetro intrínseco dos objetos sensorizados e, portanto, com significado físico (GÜRTLER *et al.*, 2005). Detalhes de cada rotina são

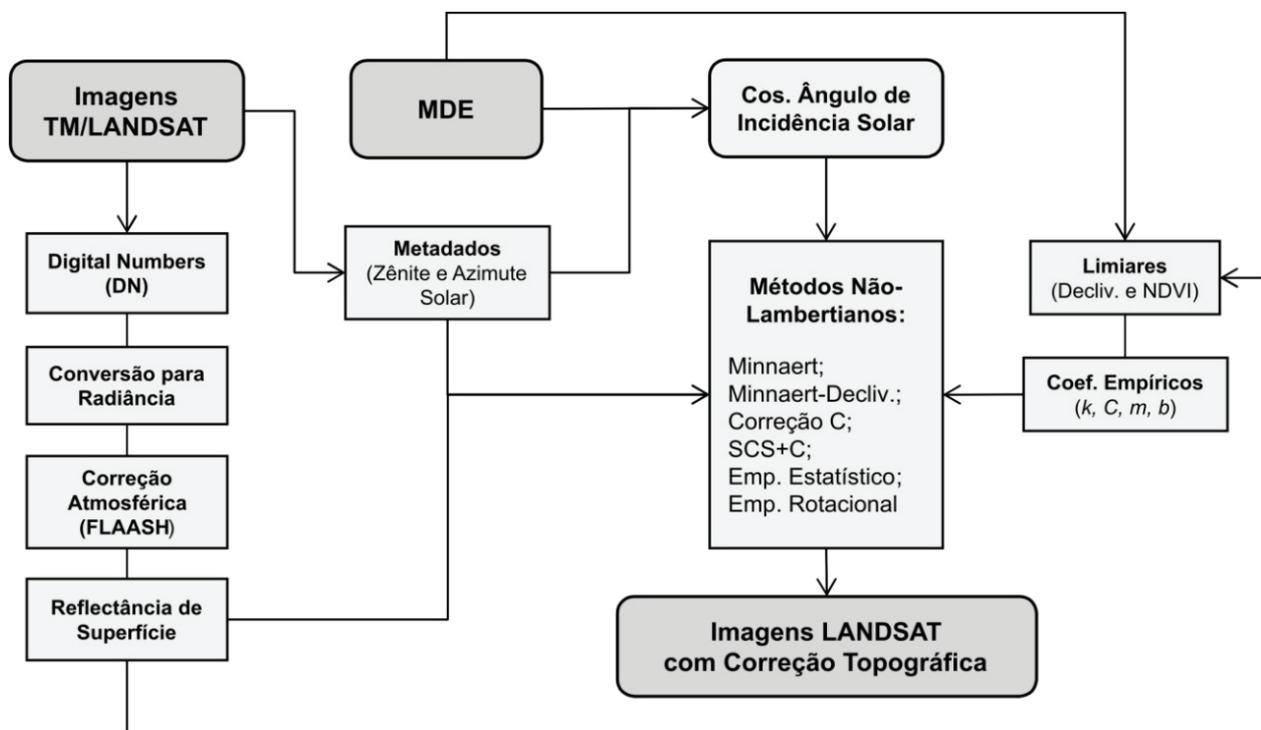


Fig. 3 - Fluxograma geral dos procedimentos utilizados para a correção topográfica das imagens TM/Landsat selecionadas.

apresentados a seguir.

**Rotina 1.1 - Cálculo da Incidência Solar:** foi utilizado como entrada o MDE da área de estudo assim como os ângulos zenital e azimutal solares (obtidos dos metadados das imagens Landsat) para o cálculo do  $\cos i$  (saída), através da Equação 1.

**Rotina 1.2 - Conversão DN para Reflectância TOA:** esta rotina permite o cálculo da reflectância no topo da atmosfera (*Top Of Atmosphere – TOA*) de acordo com Chander *et al.* (2009), utilizando como entrada as bandas originais do Landsat (DN). Também utiliza como entrada as informações do dia do ano (Juliano) e do ângulo de elevação solar, que podem ser obtidas nos metadados das imagens. Este processamento é opcional, caso o usuário deseje utilizar os dados Landsat sem correção atmosférica. No entanto, esta rotina também pode ser utilizada caso seja realizado a correção atmosférica pelo método *Dark Object Subtraction* (DOS) (CHAVEZ, 1988) a partir da planilha desenvolvida por Gürtler *et al.*, (2005), sendo que as imagens corrigidas devem estar escalonadas em 8 bits (intervalo entre 0 a 255).

### 3.3.2 Algoritmos Não-Lambertianos

As rotinas de correção não-lambertianas, utilizadas no estudo, foram aplicadas sobre os dados de reflectância de superfície (após correção atmosférica) para cada banda, individualmente. Além disso, foram utilizados os limiares de 0,4 no NDVI e 1° de declividade, conforme descrito anteriormente. Desta forma os parâmetros de correção foram obtidos em áreas com maior cobertura vegetal e não planas.

A sequência de rotinas de correção não-lambertianas foi assim definida:

- Rotina 2.1 – Minnaert;
- Rotina 2.2 – Minnaert com Declividade;
- Rotina 2.3 – Correção C;
- Rotina 2.4 – Correção SCS+C;
- Rotina 2.5 – Empírico Estatística;
- Rotina 2.6 – Empírico Rotacional

Os arquivos e informações de entrada para cada rotina foram os seguintes: as bandas

individuais do Landsat, em valores de reflectância de superfície; o arquivo *raster* referente ao  $\cos i$ ; o MDE; o NDVI; as informações referentes aos limiares de declividade e do NDVI (1° e 0,4, respectivamente) e o valor em graus do ângulo de elevação solar (exceto para a correção Empírico Estatística).

Foram implementados em cada rotina as equações para determinação do coeficiente angular (Equação 14) e do intercepto (Equação 15) da regressão linear entre os dados de reflectância e os dados de iluminação, para a estimativa automática dos parâmetros de correção em cada algoritmo:

$$m = \frac{\sum xy - \left[ \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \right]}{\sum x^2 - \left[ \frac{(\sum x)^2}{n} \right]} \quad (14)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (15)$$

onde  $m$  e  $b$  são respectivamente, o coeficiente angular e o intercepto da regressão;  $x$  é a variável independente;  $y$  é a variável dependente;  $\bar{x}$  é o valor médio de  $x$ ;  $\bar{y}$  é o valor médio de  $y$  e  $n$  é o número de observações ( $n^\circ$  de pixels).

### 3.4 Avaliação dos resultados da correção topográfica

Além da análise visual, inúmeros trabalhos indicam o uso de métodos estatísticos para uma avaliação quantitativa do desempenho da correção topográfica em imagens orbitais (JUSTICE *et al.*, 1981; RIAÑO *et al.*, 2003; RICHTER *et al.*, 2009).

Neste estudo a avaliação estatística dos algoritmos de correção topográfica em cada imagem foi realizada a partir da definição de cerca de 3000 pontos amostrais distribuídos de forma aleatória sobre áreas vegetadas e de solo exposto, e em declividades superiores a 1°. Foram utilizados os seguintes métodos estatísticos para a avaliação dos resultados:

- Coeficiente de correlação ( $r$ ) entre o ângulo de incidência ( $\cos i$ ) e a reflectância corrigida ( $\rho_h$ ) e não-corrigida ( $\rho_T$ ), em cada banda espectral (GAO & ZHANG, 2009). Considera-se que as imagens submetidas à correção topográfica apresentem redução da

- correlação entre a reflectância e a iluminação;
- Média da reflectância em cada banda. Espera-se que nas imagens corrigidas os valores médios de reflectância sejam similares ao das imagens não-corrigidas, considerando que a correção topográfica visa a normalização da reflectância em relação ao ângulo de incidência solar;
- Desvio Padrão (DP) dos valores de reflectância ( $\rho_h$  e  $\rho_r$ ) em cada banda. Em imagens topograficamente corrigidas o desvio padrão da reflectância deve reduzir, o que significa que o impacto da iluminação é minimizado (HANTSON & CHUVIECO, 2011).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados do processamento realizado nas 8 cenas Landsat TM5 utilizadas no trabalho, e que envolveu a correção atmosférica e a correção topográfica das mesmas. Também é apresentado o resultado do cálculo do ângulo local de incidência solar, a partir do MDE, em cada data analisada.

##### 4.1 Correção Atmosférica

A correção atmosférica das imagens Landsat pelo algoritmo FLAASH permitiu reduzir significativamente o fator de reflectância na região espectral do visível (bandas 1, 2 e 3), influenciado principalmente pelo retroespalhamento da radiação por aerossóis presentes na atmosfera, que caracteriza o espalhamento *Rayleigh* (GÜRTLER *et al.*, 2005). De forma inversa, para a região do infravermelho (bandas 4, 5 e 7), houve incremento no fator de reflectância, em função da modelagem da absorção espectral, decorrente da umidade atmosférica. Estes resultados podem ser visualizados através do gráfico da Figura 4, gerado a partir do cômputo da reflectância média de 1000 pontos amostrais sobre áreas vegetadas em cada uma das cenas utilizadas.

##### 4.2 Ângulo local de incidência solar

O ângulo local de incidência solar calculado através do MDE e dos ângulos zenital e azimutal do sol nas datas analisadas pode ser observado na Figura 5. A diferença nos ângulos de incidência

solar em cada período do ano gerou variações no padrão de sombreado do terreno, sendo mais significativo entre as cenas de 02/03/1998 e 27/06/2000.

Em todas as datas foram observados ângulos locais de incidência solar iguais a zero, caracterizando áreas totalmente sombreadas no momento da passagem do satélite. Em alguns pixels a ocorrência de valores negativos de  $\cos i$ , assim como de valores nulos, foi automaticamente substituída para valores baixos, diferentes de zero (ex.: 0,01), para minimizar a saturação do fator de reflectância e a presença de pixels sem valor nas imagens topograficamente corrigidas.

##### 4.3 Correção Topográfica

Neste item são avaliados os resultados da correção topográfica das imagens Landsat a partir da abordagem qualitativa, que se baseia na análise e interpretação visual, e quantitativa, com base na análise de parâmetros estatísticos.

###### 4.3.1 Análise visual

Na Figura 7 é possível avaliar qualitativamente os resultados dos algoritmos de correção topográfica sobre diferentes trechos de cada cena. Todos os algoritmos reduziram significativamente a presença de sombras causadas pela topografia, assim como o brilho em áreas voltadas para o sol, normalizando o fator de reflectância entre as vertentes favoráveis e opostas à luz solar.

No entanto, nas imagens corrigidas pelos algoritmos Minnaert, Minnaert com Declividade, Correção C e SCS+C verificou-se a ocorrência de pixels com valores de reflectância acima do normal, ou seja, com brilho elevado, principalmente em áreas fortemente sombreadas, como encostas íngremes. Esta sobrecorreção foi mais pronunciada nas cenas com menor incidência solar (junho e julho) devido ao baixo ângulo de elevação do sol, acarretando reduzidos valores de  $\cos i$ . Para as cenas do mês de verão (02/03/1998) os resultados foram similares em todos os métodos testados, principalmente pela ausência da sobrecorreção, em razão da menor ocorrência de áreas totalmente sombreadas. As cenas corrigidas pelos algoritmos Empírico

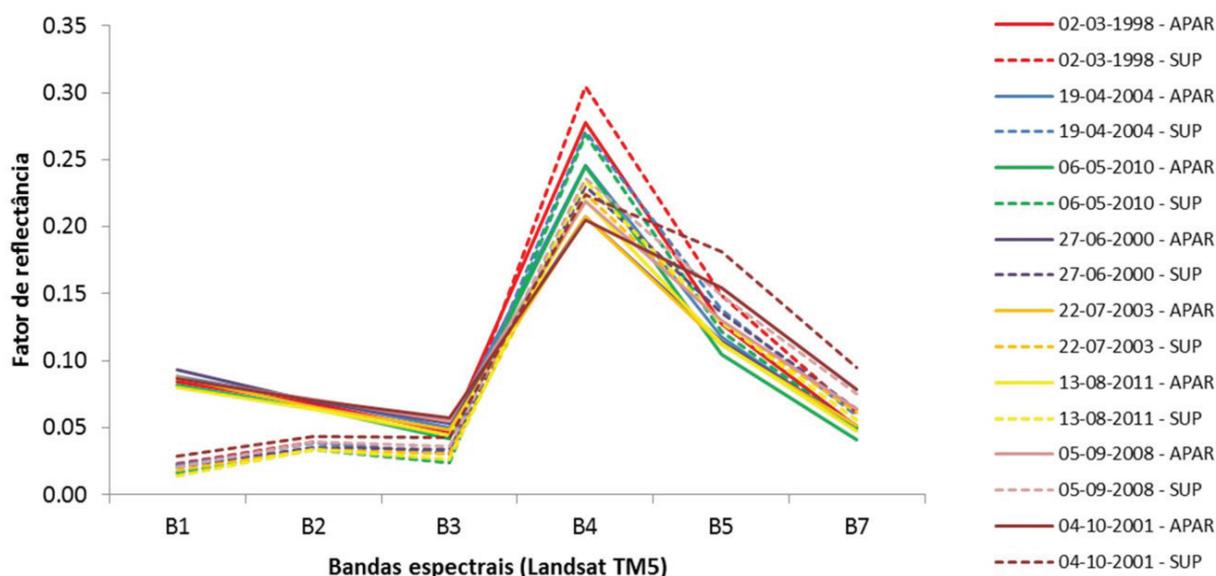


Fig. 4 - Reflectância média aparente (APAR – linha contínua) e de superfície (SUP – linha tracejada) em áreas vegetadas sobre cada cena (n = 1000).

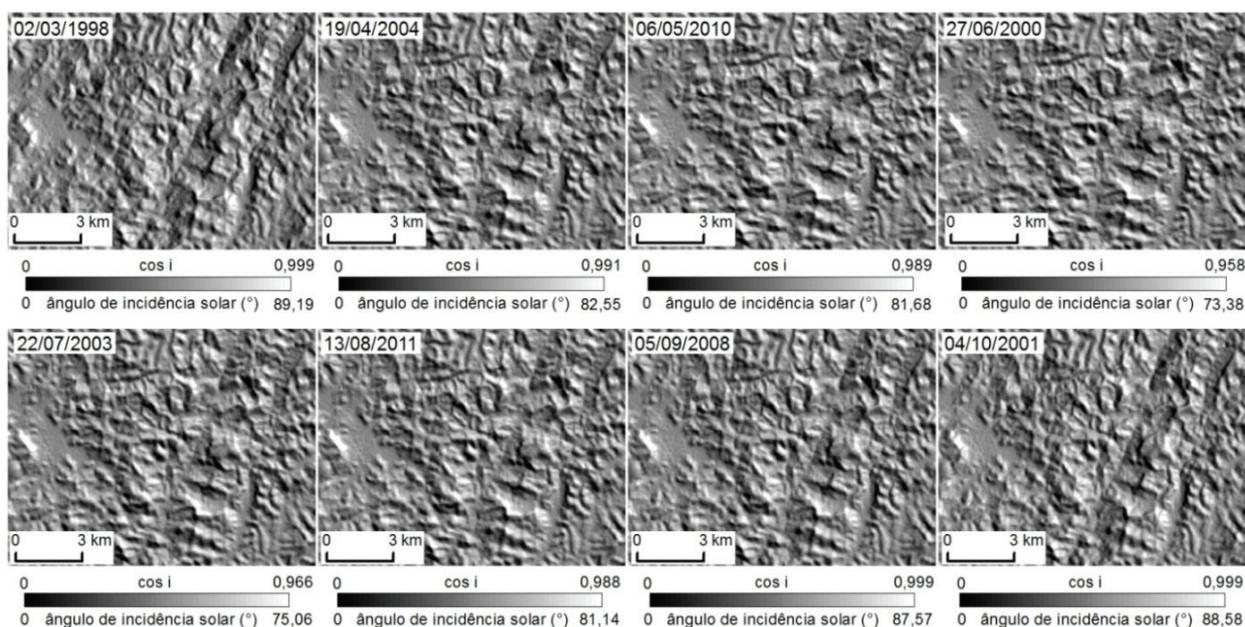


Fig. 5 - Comparação entre os ângulos locais de incidência solar em um trecho da área de estudo em cada data analisada.

Estatístico e Empírico Rotacional apresentaram qualitativamente os melhores resultados, não sendo observada a ocorrência de sobrecorreção dos valores de reflectância. Eventualmente, em áreas totalmente sombreadas o cálculo da reflectância por estes algoritmos não conseguiu representar de forma adequada as características naturais da superfície, devido à ausência de radiação proveniente destes locais, sendo a

reflectância, neste caso, estimada a partir do ajuste empírico em cada cena.

Na Figura 8 podem ser observadas as diferenças entre os algoritmos de correção topográfica sobre uma área fortemente sombreada, com valores de  $\cos i$  próximos a 0. Nesta área, os algoritmos Minnaert, Minnaert com Declividade, Correção C e SCS+C apresentaram pixels com sobrecorreção, sendo que os dois primeiros

apresentaram também pixels com reflectância nula (pixels sem valor - *NoData*), enquanto os algoritmos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional não apresentaram sobrecorreção e nem pixels sem valor, permitindo estimar de forma mais eficiente a reflectância normalizada nesta área.

#### 4.3.2 Análise estatística

O coeficiente de correlação entre o  $\cos i$  e a reflectância nas imagens topograficamente corrigidas apresentou significativa redução em comparação às imagens originais, indicando que a dependência da reflectância em relação à topografia foi praticamente eliminada, como pode ser observado no gráfico da Figura 6.

Nas cenas originais, ou seja, sem correção topográfica, o coeficiente de correlação médio foi de 0,46, variando de 0,40 para a cena de 04/10/2001 a 0,57 para a cena de 27/06/2000.

Nas cenas corrigidas o coeficiente de

correlação médio foi de 0,10, variando de 0,09 para o algoritmo C a 0,12 para os algoritmos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional. Com relação ao período, as cenas corrigidas que apresentaram as menores correlações foram 19/04/2004 e 06/05/2010, com 0,073 e 0,079 em média, respectivamente.

No gráfico da Figura 9 pode ser observada uma leve redução no desvio padrão da reflectância, em toda a área de estudo, antes e após a correção topográfica, fornecendo um indicativo da normalização da reflectância nas imagens corrigidas.

Nas cenas sem correção topográfica o desvio padrão da reflectância variou de 0,039 em 02/03/1998 a 0,067 em 13/08/2011, com média de 0,053. Para as cenas corrigidas, o melhor resultado, ou seja, o menor desvio padrão foi de 0,033 para os algoritmos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional em 02/03/1998, enquanto que o maior desvio padrão foi de 0,062 para a

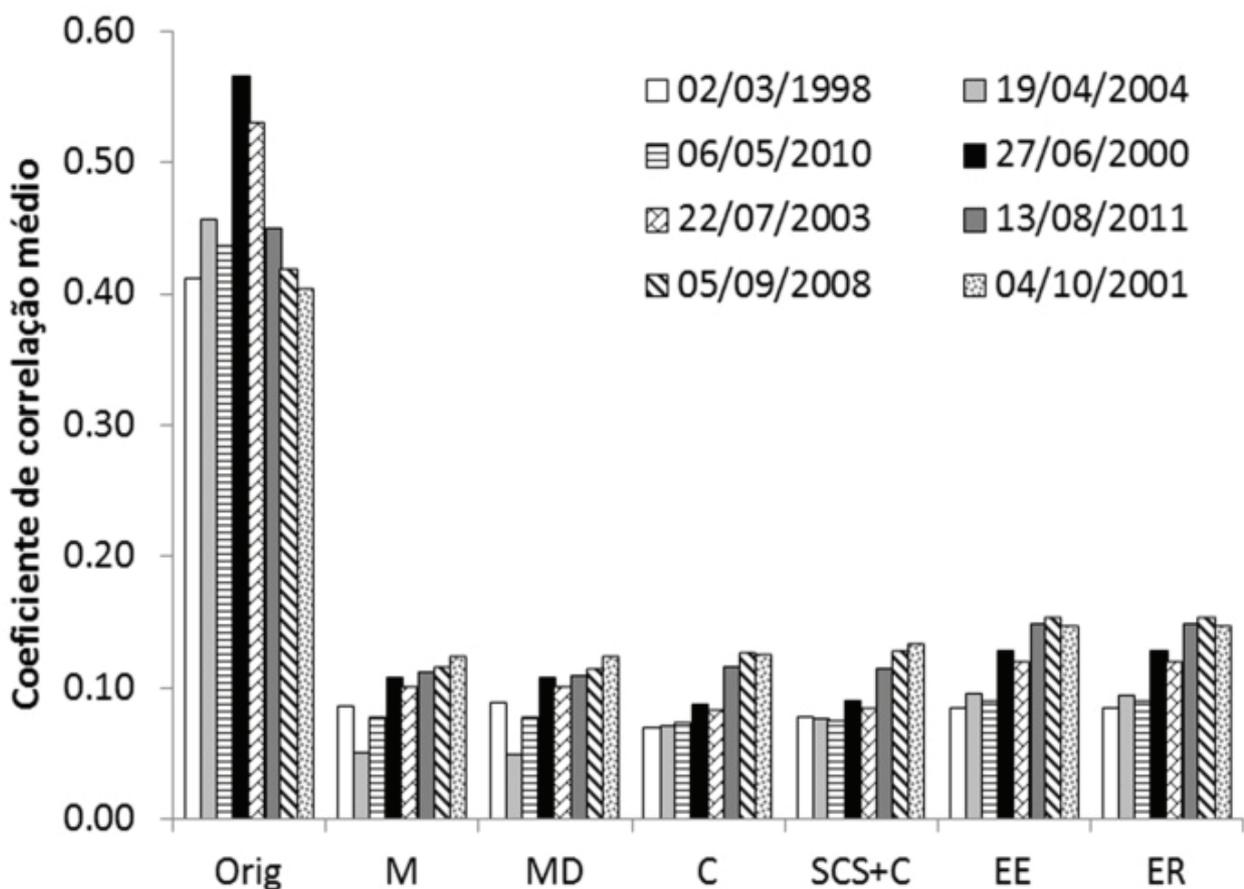


Fig. 6 - Comparação entre os coeficientes de correlação ( $\cos i \times \rho$ ) nas cenas originais (Orig) e nas cenas corrigidas pelos algoritmos: Minnaert (M); Minnaert com Declividade (MD); Coeficiente C (C); *Sun-Canopy-Sensor* + C (SCS+C); Empírico-Estatístico (EE) e, Empírico Rotacional (ER), ( $n = 2903$ ).

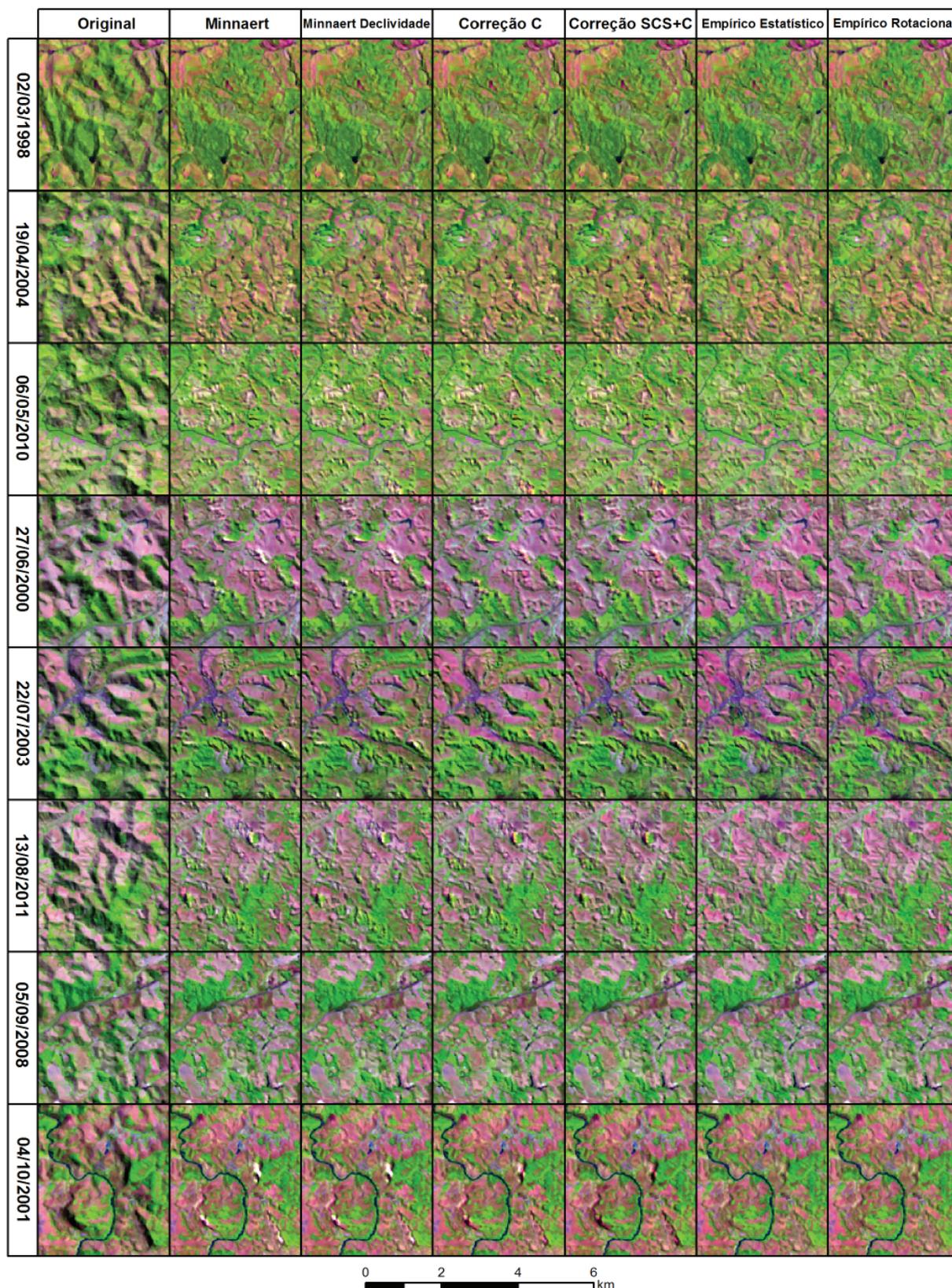


Fig. 7 - Comparação entre as imagens sem correção topográfica (originais) e após a aplicação dos algoritmos de correção topográfica em diferentes trechos da área de estudo (Composição RGB/543).

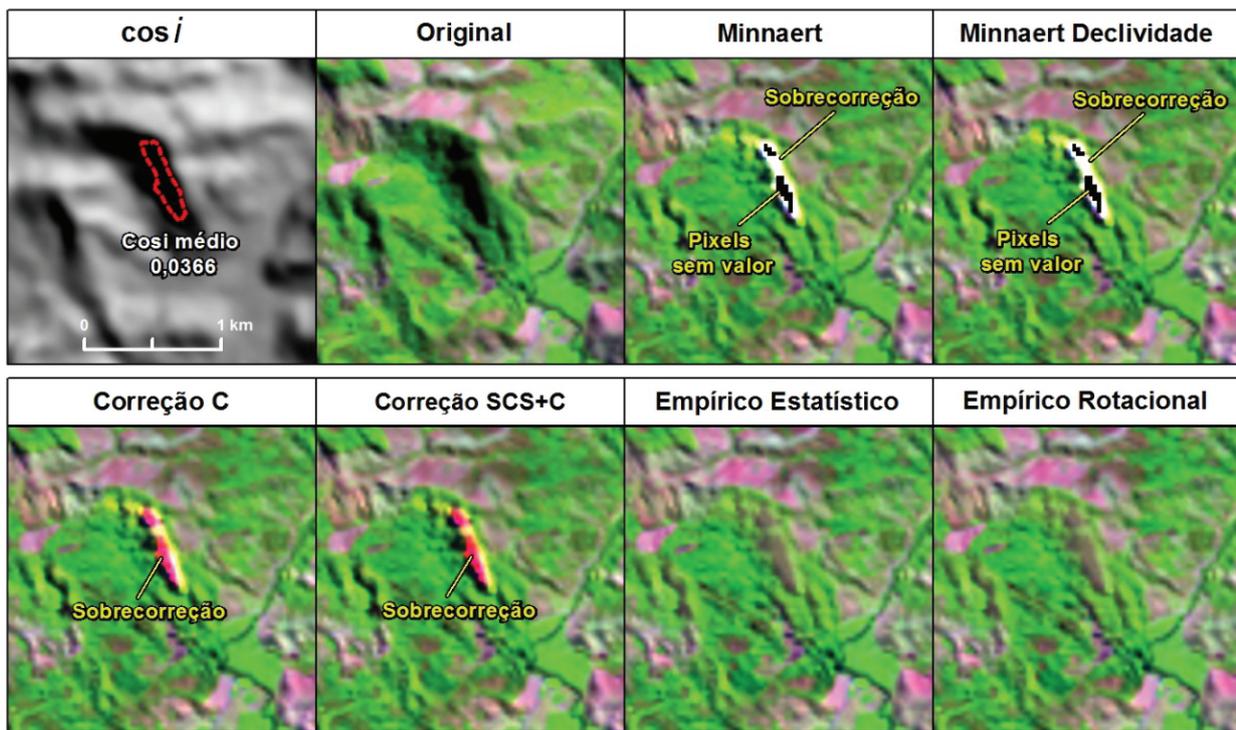


Fig. 8 - Comparação entre os algoritmos de correção topográfica em área fortemente sombreada (Área tracejada em vermelho). Imagem de 13/08/2011 (composição RGB/543).

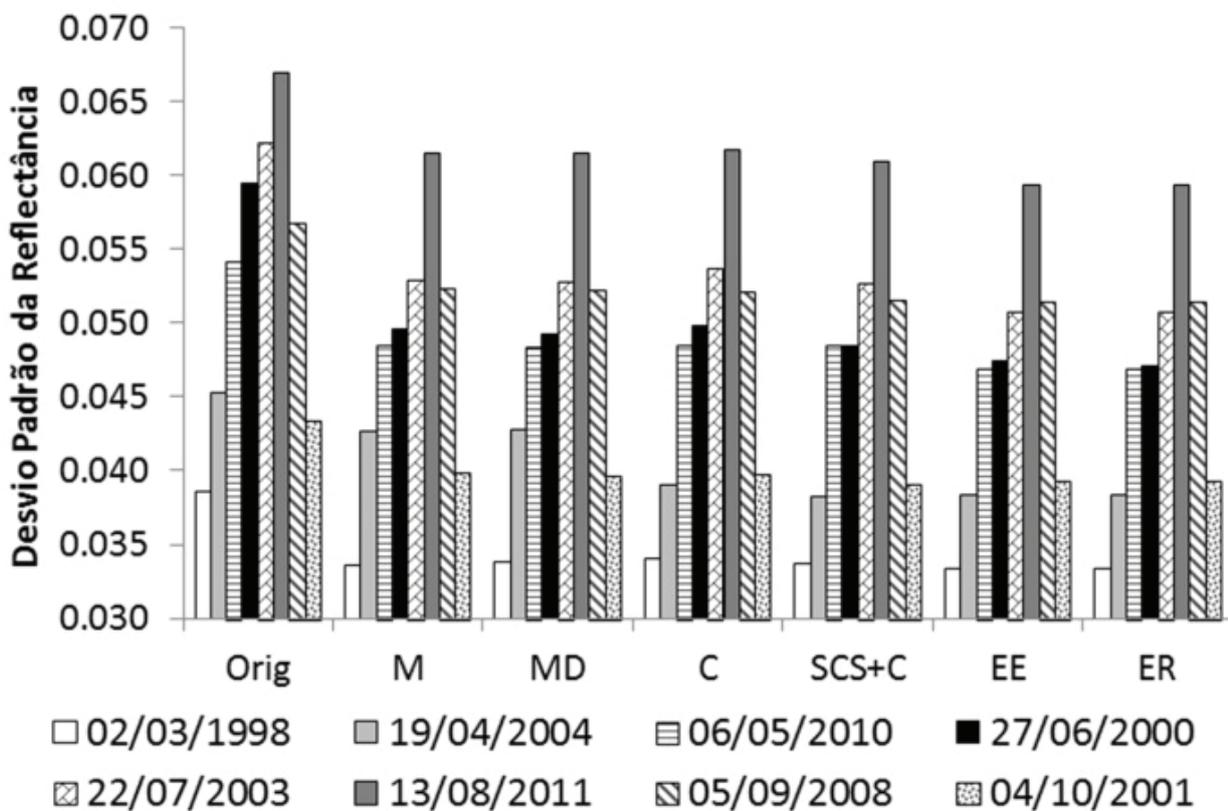


Fig. 9 - Comparação entre o desvio padrão médio da reflectância nas cenas originais (Orig) e nas cenas corrigidas pelos algoritmos: Minnaert (M); Minnaert com Declividade (MD); Coeficiente C (C); Sun-Canopy-Sensor + C (SCS+C); Empírico-Estatístico (EE) e, Empírico Rotacional (ER), (n = 2903).

correção C em 13/08/2011.

Em média, nas cenas corrigidas o desvio padrão variou de 0,046 para os algoritmos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional a 0,048 para os algoritmos Minnaert e Minnaert com Declividade. Considerando o período, as cenas corrigidas de 02/03/1998 apresentaram em média o menor desvio padrão, com 0,034, enquanto que o maior foi de 0,061 nas cenas de 13/08/2011.

A reflectância média em cada cena, antes e após a correção topográfica, pode ser observada no gráfico da Figura 10.

Para as cenas originais, a reflectância média variou de 0,1216 em 02/03/1998 a 0,1396 em 05/09/2008, com média geral de 0,1292. Nas cenas corrigidas a reflectância média sofreu pouca variação, com mínimo de 0,1168 para o

algoritmo Empírico Estatístico em 19/04/2004, máximo de 0,1417 para o algoritmo Empírico Rotacional e, média geral de 0,1293. O algoritmo Minnaert com Declividade apresentou em todas as datas os valores médios de reflectância mais próximos aos das cenas originais, com média de 0,1301.

Considerando a redução média percentual (em cada banda espectral) do desvio padrão e do coeficiente de correlação nas imagens corrigidas, em relação às imagens originais, observa-se na Tabela 2, que a banda 4, correspondente ao infravermelho próximo, apresentou o maior percentual de redução nestes dois parâmetros. Este resultado demonstra o maior efeito das condições de iluminação sobre a reflectância nessa região do espectro, conforme descrito por Li *et al.* (2012).

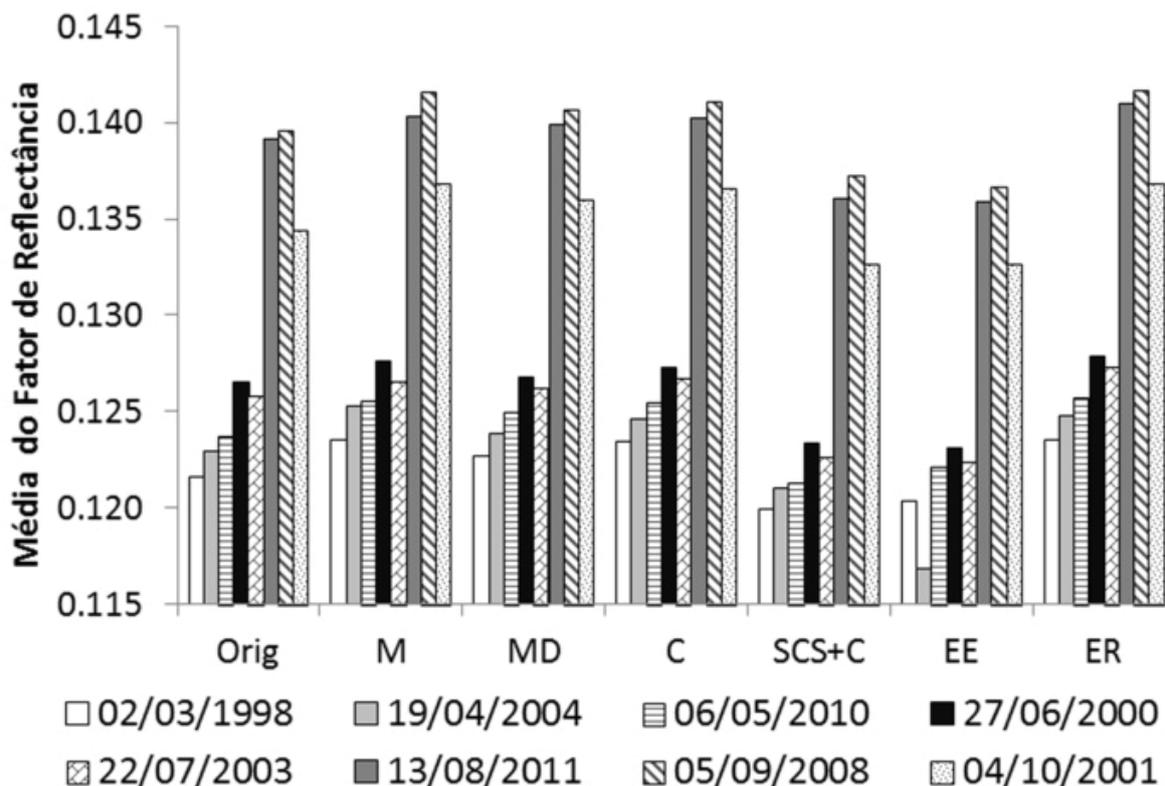


Fig. 10 - Comparação entre a reflectância média nas cenas originais (Orig) e nas cenas corrigidas pelos algoritmos: Minnaert (M); Minnaert com Declividade (MD); Coeficiente C (C); *Sun-Canopy-Sensor* + C (SCS+C); Empírico-Estatístico (EE) e, Empírico Rotacional (ER), (n = 2903).

Por outro lado, a banda 3, correspondente a região do vermelho, apresentou em geral o menor percentual de redução, possivelmente em razão da absorção espectral em áreas vegetadas (pastagens e matas) predominantes na região, resultando em tonalidades escuras e portanto

com fator de reflectância mais próximo a de áreas sombreadas pela topografia.

Para toda a região do visível (bandas 1, 2 e 3) a correção Minnaert apresentou claramente o maior percentual de redução no coeficiente de correlação, com 75,07% em média. Para as

Tabela 2: Redução média percentual (%) do Desvio Padrão (DP) e do coeficiente de correlação (Correl.) entre *cosi* e a reflectância, em relação à imagem original.

	Banda 1		Banda 2		Banda 3		Banda 4		Banda 5		Banda 7		Média Geral	
	DP	Correl.	DP	Correl.	DP	Correl.	DP	Correl.	DP	Correl.	DP	Correl.	DP	Correl.
M	1,94	<b>77,80</b>	5,04	<b>77,99</b>	3,78	<b>69,42</b>	16,57	<b>112,43</b>	14,84	79,58	9,56	74,11	8,62	<b>81,89</b>
MD	3,01	76,68	5,38	77,00	3,93	68,80	17,06	110,08	14,64	79,08	9,30	73,89	8,89	80,92
C	6,11	69,65	6,82	71,86	4,84	66,40	19,47	109,77	14,57	<b>84,90</b>	7,68	<b>80,05</b>	9,91	80,44
SCS+C	<b>7,18</b>	67,38	7,30	69,51	<b>5,88</b>	64,38	20,37	103,65	16,09	81,14	9,66	77,02	11,08	77,18
EE	6,43	66,17	<b>7,46</b>	68,96	5,03	59,27	23,23	112,36	17,94	77,33	11,64	68,97	11,95	75,51
ER	6,46	66,17	7,44	69,08	5,05	59,26	<b>23,35</b>	112,33	<b>17,99</b>	77,33	<b>11,66</b>	68,97	<b>11,99</b>	75,52

Obs.: Em **negrito**, os maiores percentuais de redução em cada banda.

bandas 4, 5 e 7 o melhor desempenho ocorreu entre os algoritmos Minnaert, Correção C, Empírico Estatístico e Empírico Rotacional, variando de 80,05 a 112,43% de redução no coeficiente de correlação. Com relação ao Desvio Padrão os maiores percentuais de redução ocorreram entre os algoritmos SCS+C, Empírico Estatístico e Empírico Rotacional, variando de 5,88 a 23,35%.

Considerando os resultados médios obtidos nas 8 cenas utilizadas neste estudo, que abrangeram diferentes condições de iluminação, constatou-se que a correção Empírico Rotacional apresentou o melhor desempenho referente ao Desvio Padrão, com percentual de redução de 12% em relação a imagem sem correção, enquanto a correção Minnaert apresentou a maior redução no coeficiente de correlação, com 81,9% em média.

Estas variações de desempenho entre os algoritmos testados mostraram-se, no entanto, estatisticamente não significativas, como pode ser observado na Tabela 3, onde o teste de Tukey obteve valores de P superiores a 0,05 em todos os parâmetros avaliados.

Devido à similaridade estatística nos desempenhos dos algoritmos, não foi possível indicar quantitativamente a superioridade de um ou outro método para a normalização topográfica das cenas utilizadas, ao contrário de outras pesquisas, em que os algoritmos C e Empírico Estatístico apresentaram, em geral, desempenho superior (RIANO *et al.*, 2003; RICHTER *et al.*, 2009; FÜREDER, 2010; HANTSON & CHUVIECO, 2011). No entanto, constatou-se que qualitativamente o melhor desempenho pode ser atribuído aos algoritmos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional, devido a não ocorrência da sobrecorreção nas cenas, ao contrário do

ocorrido nos demais métodos testados.

Tabela 3: Valores de P obtidos através do teste de Tukey entre os algoritmos de correção topográfica

Comparações	P (Correl.)	P (Desv. Pad.)	P (Reflect. Média)
EE-C	0,296	0,999	0,841
ER-C	0,300	0,999	1,000
M-C	1,000	1,000	1,000
MD-C	1,000	1,000	1,000
SCS+C-C	1,000	1,000	0,899
ER-EE	1,000	1,000	0,781
M-EE	0,423	0,998	0,808
MD-EE	0,405	0,999	0,900
SCS+C-EE	0,443	1,000	1,000
M-ER	0,427	0,998	1,000
MD-ER	0,410	0,999	1,000
SCS+C-ER	0,447	1,000	0,851
MD-M	1,000	1,000	1,000
SCS+C-M	1,000	1,000	0,873
SCS+C-MD	1,000	1,000	0,943

#### 4.3.3 Detalhes da implementação em SIG

Com relação à implementação das rotinas de correção topográfica e do cálculo do ângulo local de incidência solar em SIG, pode-se observar, na Figura 11, exemplos da interface de entrada e saída de dados das rotinas no *toolbox* desenvolvido no SIG ArcGIS.

O tempo médio de processamento para correção de uma cena Landsat completa, utilizando todos os algoritmos testados, variou em torno de 2 horas, dependendo da configuração de hardware em uso.

Em cada rotina de correção topográfica foi possível estimar de forma automatizada os coeficientes empíricos  $k$ ,  $c$ ,  $m$  e  $b$  em

cada banda espectral, sobre áreas com maior irradiância difusa, o que reduziu as etapas envolvidas na correção topográfica das imagens, e conseqüentemente o tempo total de processamento. Além disso, foi possível reduzir também a necessidade de intervenção do usuário,



Fig. 11 - Exemplo da interface de entrada e saída de dados para o cálculo do ângulo de incidência solar (A) e da reflectância normalizada em cada banda Landsat pelo algoritmo Minnaert (B).

evitando assim possíveis erros de operação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram testados e implementados em SIG 6 métodos não-lambertianos de correção topográfica sobre imagens Landsat TM5, em uma região topograficamente complexa, abrangendo períodos com diferentes condições de iluminação.

As rotinas de correção topográfica desenvolvidas em ambiente SIG permitiram a automação completa dos processos de obtenção e aplicação dos coeficientes empíricos de cada algoritmo, a partir do estabelecimento de uma correlação entre a reflectância de superfície e o cosseno do ângulo de incidência solar.

Todos os métodos testados foram capazes de reduzir significativamente os efeitos topográficos

sobre o padrão de reflectância de cada cena, permitindo sua normalização entre as vertentes opostas e favoráveis à luz solar incidente, durante a passagem do satélite.

Com base em inspeção visual de cada cena, os algoritmos Empírico Estatístico e Empírico Rotacional apresentaram os melhores resultados qualitativos, principalmente devido a inexistência de áreas com sobrecorreção, as quais foram observadas nos demais métodos testados, especialmente nos períodos com menor ângulo de elevação solar, nas cenas de junho e julho. No entanto, estatisticamente, os algoritmos apresentaram resultados equivalentes, em termos de redução da dependência da reflectância em relação à topografia, assim como na manutenção da reflectância média, conforme indicado no teste de Tukey.

Os resultados aqui obtidos corroboram com inúmeras pesquisas que vem sendo conduzidas no sentido de possibilitar uma melhor utilização dos dados de sensoriamento remoto em terrenos montanhosos. A sistematização dos métodos de correção topográfica a partir do desenvolvimento de ferramentas SIG permitiu reduzir significativamente o tempo de processamento, assim como a necessidade de intervenção do usuário, o que representa um ganho de produtividade em atividades que utilizem um grande número de imagens de satélite.

Apesar da estratificação aplicada para estimar os parâmetros empíricos de correção, com a utilização de limiares para o NDVI e para a declividade, é necessário, em futuros estudos, utilizar também diferentes classes de uso do solo e de iluminação (*cosi*), com objetivo de modelar de forma mais eficiente a irradiância difusa e consequentemente melhorar o desempenho dos algoritmos de correção topográfica.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER-GOLDEN, S.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; RICHTSMEIER, S.; ACHARYA, P. K.; MATTHEW, M. W.; ANDERSON, G. P.; ALLRED, C. L.; JEONG, L. S.; CHETWYND, J. H. Flaash, a MODTRAN4 Atmospheric Correction Package for Hyperspectral Data Retrievals and Simulations. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 7., Pasadena, CA. **Summaries...** Pasadena: NASA. JPL Publication 97-21, v.1, p.9-14, 1998.
- 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**. v. 18, p. 436–450, 2012.
- BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ROBERTSON, D. C. **MODTRAN®: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7**, GL-TR-89-0122, Geophysics Directorate, Phillips Laboratory, Hanscom AFB, MA 01731, ADA214337, 1989, 44p.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n. 5, p. 893-903, 2009.
- CHAVEZ, J. P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**. New York, v.24, p. 459-479, 1988.
- CIVCO, D. L. Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 55, p. 1303–1309, 1989.
- COLBY, J. D. Topographic normalization in rugged terrain. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 57, n.5, p. 531-537, 1991.
- DALLA NORA, E. L.; SANTOS, J. E. Análise da dinâmica sazonal de duas formações florestais do bioma mata atlântica com base em índices de vegetação. **Perspectiva**, v. 34, n. 125, p. 41-51, 2010.
- EDIRIWEERA, S.; PATHIRANA, S.; DANAHER, T.; NICHOLS, D.; MOFFIET, T. Impact of different topographic corrections on prediction accuracy of Foliage Projective Cover (FPC) in a topographically complex terrain. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. I-7, p. 123-128, 2011.
- EKSTRAND, S. Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 1, p. 151–161, 1996.
- EXELIS. **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)**. Disponível em: < <http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>>. Acesso: 20 dez. 2013.
- FÜREDER, P. Topographic correction of satellite images for improved LULC classification in alpine areas. 2010 in: 10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, **Proceedings...** 2010, p. 187 - 194.
- GAO, Y.; ZHANG, W. A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 2259–2275, 2009.
- GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o

- Brasil utilizando-se a análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 85-90, 2003.
- GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIS, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Planilha Eletrônica para o Cálculo da Reflectância em Imagens TM e ETM+ Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57/02, p. 162-167, 2005.
- HANTSON, S., CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, p. 691–700, 2011.
- HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2010.
- HOLBEN, B.; JUSTICE, C. The topographic effect on spectral response from nadir pointing sources. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, p. 1191–1200, 1980.
- JUSTICE, C. O.; WHARTON, S. E.; HOLBEN, B. N. Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 213–230, 1981.
- LI, F.; JUPP, D. L. B.; THANKAPPAN, M.; LYMBURNER, L.; MUELLER, N.; LEWIS, A.; HELD, A. A physics-based atmospheric and BRDF correction for Landsat data over mountainous terrain. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 756-770, 2012.
- LOVELAND, T. R.; DWYER, J. L. Landsat: Building a strong future. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 22-29, 2012.
- MEYER, P.; ITTEN, K. I.; KELLENBERGER, T.; SANDMEIER, S.; SANDMEIER, R. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 48, p. 17-28, 1993.
- MINNAERT, M. The reciprocity principle in lunar photometry. **The Astrophys. J.**, v. 93, p. 403-410, 1941.
- MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S.; ALMEIDA, R. P.; NERY, C. V. M. Análise do Comportamento Espectral de Fitofisionomias no Parque Estadual Lapa Grande por meio de dados MODIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 6, p. 1705-1718, 2013.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 5, p. 1056–1061, 2003.
- RICHTER, R.; KELLENBERGER, T.; KAUFMANN, H. Comparison of topographic correction methods. **Remote Sensing**, v. 1, p. 184-196, 2009.
- ROSENDO, J.S.; ROSA, R. A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari – MG. **Sociedade & Natureza**, v. 17, n. 33, p. 91-104, 2005.
- ROUSE, J. W. JR.; HAAS, R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A.; HARLAN, J. C. **Monitoring the Vernal Advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of Natural vegetation**. NASA/GSFC. Type III Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371p.
- SMITH, J. A.; TZEU, L. L.; RANSON, K. J. The Lambertian assumption and Landsat data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, n. 10, p. 1183–1189, 1980.
- SOENEN, S.A.; PEDDLE, D.R.; COBURN, C.A. SCS+C: A modified Sun-Canopy-Sensor topographic correction in forested terrain. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 9, p. 2148–2159, 2005.
- TAN, B.; WOLFE, R.; MASEK, J. G.; GAO, F.; VERMOTE, E. F. An illumination correction algorithm on Landsat-TM data. **IGARSS 2010: International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 1964–1967, 2010.
- TAN, B.; MASEK, J. G.; WOLFE, R.; GAO, F.; HUANG, C.; VERMOTE, E. F.; EDERER, G. Improved forest change detection with terrain illumination corrected Landsat. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 469-483, 2013.

- TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D. G. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. **Canadian Journal of Remote Sensing**. v. 8, n. 2, p. 84 – 106, 1982.
- TWELE, A.; ERASMI, S. Evaluating topographic correction algorithms for improved land cover discrimination in mountainous areas of Central Sulawesi. **Remote Sensing and GIS for Environmental Studies: Applications in Geography**. v. 113, p. 287-295, 2005.
- USGS (*U.S Geological Survey*). **The Legacy of Landsat 5**. Disponível em: < <http://landsat.usgs.gov/Landsat5Tribute.php> >. Acesso: 16 set. 2013.a
- USGS (*U.S Geological Survey*). **Landsat Processing Details**. Disponível em: < [http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Processing\\_Details.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php) >. Acesso: 16 set. 2013.b
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. TOPODATA: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 25-30 abril 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos p. 5499-5506. Disponível em: <<http://martem.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.21.06/doc/5499-5506.pdf>>. Acesso: 12 set. 2012.
- VANONCKELEN, S.; LHERMITTE, S.; VAN ROMPAEY, A. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 24, p. 9-21, 2013.
- VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675- 686, 1997.
- WANG, Y-C.; CHANG, T-Y.; LIOU, Y-A. Terrain correction for increasing the evapotranspiration estimation accuracy in a mountainous watershed. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 7, p. 352-356, 2010.
- WU, J.; BAUER, M. E.; WANG, D.; MANSON, S. 2008. A comparison of illumination geometry-based methods for topographic correction of QuickBird images of an undulant area. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, p. 223–236, 2008.