

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/6: 1347-1362
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MODELAGEM DE COMPENSAÇÃO RADIOMÉTRICA POR ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PARA O AJUSTE RADIOMÉTRICOS DE SENSORES ORBITAIS: UMA PROPOSTA PARA O APERFEIÇOAMENTO DE CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS PARA O BIOMA CERRADO

*Model for Radiometric Compensation Based on Topographic Attributes for
Adjustment of Orbital Sensors: A Proposal for Improving the Images Classification
for the Cerrado Biome*

**Romero Gomes Pereira da Silva¹, Carlos Henke de Oliveira¹ & Carlos Hiroo
Saito¹**

1Universidade de Brasília – UnB

Departamento de Ecologia - Laboratório de Ecologia Aplicada
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF - CEP 70910-900
romerogomes1@gmail.com; carlos.henke@yahoo.com.br
carlos.h.saito@hotmail.com

Recebido em 16 de Maio, 2014/ Aceito em 20 de Junho, 2014
Received on May 16, 2014/ Accepted on June 20, 2014

RESUMO

A diversidade fitofisionômica e características morfoestruturais geológicas do cerrado, tais como dobramentos, escarpas e falhas dificultam a classificação de cobertura e uso da terra a partir das imagens de satélites, principalmente em áreas de remanescentes vegetacionais deste bioma. No presente estudo, a eliminação ou minimização do efeito do sombreamento oriundo desta diversidade, bem como o refinamento da classificação de imagens de satélite demandou da Modelagem de Compensação Radiométrica por Atributos Topográficos (MCRAT). Isso foi implementado em um ambiente SIG, partindo-se originalmente de um modelo digital de elevação (MDE), do modelo radiométrico de Bird e Hulstrom (1981) e da análise de imagens Landsat-TM da região do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros – Goiás. Foram utilizados mapas de uso da terra para comparar as classificações com e sem compensação de radiação. Os usos mais sensíveis às mudanças promovidas pelo modelo foram: formações savânicas, florestais e solo exposto. A água, cuja classe apresenta comportamento espectral mais suscetível de ser confundido com sombra, obteve uma redução de área relativamente alta (20,72%). Com o auxílio de um banco de dados de mídias (áudio e fotografias) para o registro da verdade terrestre, construiu-se uma matriz de erros para avaliar a exatidão das classificações (Índice de Kappa). Foram obtidos acertos de 79% (com compensação) e 65% (sem compensação) sobre as classificações de uso da terra. Pelos valores de Kappa, obteve-se 0,70 para mapas de uso da terra gerados com o uso da MCRAT e 0,39 sem o uso da MCRAT.

Palavras chaves: Cerrado, Sombras, MCRAT, Classificação Híbrida, Índice de Kappa

ABSTRACT

The natural diversity of vegetation and geology of Cerrado biome bring some difficulties to satellite based land use

classification. To eliminate or minimize the shading effect due this characteristics and enhancing the final land use classification we designed a model for radiometric compensation based on topographic attributes (MCRAT). This paper presents the steps on a GIS platform, starting on a digital elevation model (DEM) and using a radiometric model described by Bird and Hulstrom (1981) on a Landsat-TM image of Chapada dos Veadeiros National Park (Goiás, Brazil). We compared land use maps generated with and without compensation of radiation. There are land uses more sensitive to changes promoted by MCRAT, specially: savanna formations, forestry formations and bare soil. Due it spectral behavior, the water bodies was more susceptible to confusion among other classes, mainly shadowing areas. Additionally the MCRAT promoted high area reduction (20.72%) for relief shadowing. A geo-referenced media database (photographs and audio) allow us to proceed the ground truth verification and produce a errors matrix to evaluate the classification accuracy (Kappa Index). It was obtained 79% of accuracy with MCRAT compensation and only 65% without. These values correspond respectively to 0.70 and 0.39 for Kappa Index of Agreement.

Keywords: Cerrado, Shadow, MCRAT, Hybrid Classification, Kappa Index.

1. INTRODUÇÃO

O cerrado é composto por um mosaico fitofisionômico constituído de formações campestres (por ex., campo limpo, cerrado rupestre), formações savânicas (por ex., cerrado *stricto sensu*) e formações florestais (por ex., matas de galeria). Embora estas formações tendam a seguir os macroclimas, outros agentes justificam a formação de mosaicos de diferentes tipos fisionômicos, como variação edáficas e de drenagem, topografia local, profundidade do lençol freático e a frequência de queimadas (RIBEIRO; WALTER, 1998; FERREIRA; HUETE, 2004).

A diversidade fitofisionômica do cerrado implica em dificuldades na utilização de imagens de satélite (SANO *et al.* 2008). Silva *et al.* (2008) ao analisarem a exatidão de quatro métodos de classificação supervisionada encontraram dificuldades para discriminar as principais fitofisionomias do cerrado com base em imagens ópticas de resolução espacial decimétrica. Os valores de exatidão geral inferiores a 61%, nos seus estudos, corroboram essa afirmação.

Para aumentar a acurácia da classificação de uso e ocupação da terra, vários pesquisadores têm estudado alternativas para obter uma boa discriminação espectral de fitofisionomias do cerrado (LIMA 2008). Sano *et al.* (2005) analisaram o desempenho dos índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e realçada (EVI), derivada de imagens do satélite *Landsat* no Parque Nacional de Brasília. Silva *et al.* (2008) recomendaram o uso de técnicas mais sofisticadas como o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). Liesenberg *et al.* (2007) analisaram dados do MISR (Multi-

Angle Imaging Spectroradiometer), com capacidade de imageamento em nove ângulos distintos de incidência, para discriminar cinco fitofisionomias presentes nos limites dos estados de Minas Gerais e da Bahia. Ratana *et al.* (2005) demonstraram, por meio de análise de dados multitemporais do MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que os índices de vegetação acumulados em um ano podem melhorar a capacidade de discriminar fitofisionomias do cerrado.

O número digital expresso em uma imagem, principalmente para alvos vegetados, é resultado de uma interação complexa que envolve as condições da atmosfera (JACKSON *et al.*, 1983), a geometria de imageamento, os ângulos e direção de iluminação (JACKSON *et al.*, 1990), do solo de fundo (QI *et al.*, 1993) e a topografia (RICHTER, 1997). Essa complexidade aumenta a variabilidade da resposta espectral de uma dada classe e acarreta erros na rotulagem dos pixels e na extração de informações quantitativas. Assim, obter uma classificação de forma automática é um desafio, uma vez que vários fatores interferem no sinal captado por um sensor, levando a erros de classificação.

As técnicas de classificação de imagens são agrupadas em três categorias gerais: supervisionada, não-supervisionada e híbrida (LILLESAND *et al.*, 2000). Independentemente da técnica de classificação adotada, a resposta espectral representada no pixel pode sofrer, além dos fatores antes mencionados, interferências originadas das próprias características da paisagem, como por exemplo, a distribuição e intensidade das sombras. A resolução espacial da imagem orbital é outro fator que influencia

a acurácia da classificação, pois interfere tanto na definição da área mínima a ser mapeada para as classes de alvos, quanto na sua identificação (PONZONI *et al.*, 2001).

A combinação da iluminação solar oblíqua e uma topografia irregular geram efeitos de iluminação diferenciada das faces do relevo que alteram as respostas espectrais dos alvos, de tal forma que o efeito topográfico provoca uma variação da resposta radiométrica da superfície inclinada em relação a uma superfície horizontal, ou entre faces opostas do relevo. Isto é baseado na posição (declividade e orientação) da superfície das encostas frente às fontes de luz e do observador (ou sensor remoto). Outro efeito importante é causado por ocultação topográfica, isto é, o sombreado produzido pelo ambiente para um ponto de terra pela posição do sol, no momento do imageamento (FELICÍSIMO; GARCÍA-MANTECA, 1990).

As sombras estão frequentemente presentes em imagens de satélites, principalmente em áreas naturais vegetadas e em relevos acidentados. Com o aumento da resolução espacial das imagens de sensoriamento remoto, que hoje alcançam 50 centímetros, este fator passou a ser visivelmente notável nas imagens (CENTENO *et al.*, 2011). As sombras dificultam a interpretação visual da cobertura de interesse, assim como na classificação digital de imagens de satélite, especialmente quando se pretende discriminar corpos d'água, que são alvos com elevada absorvância e se confundem com as sombras causadas pelo relevo (GONZÁLES, 2008).

Em termos de pesquisas, recomenda-se a inclusão da técnica de correção topográfica em adição à correção atmosférica. A correção ou normalização topográfica diz respeito à compensação da diferença de iluminação causada pela irregularidade do terreno, fazendo com que diferentes declividades e faces de exposição do terreno causem aumento da radiância na face iluminada e um sombreado da face oposta à iluminação (CONESE *et al.*, 1993; RIAÑO *et al.*, 2003). Assim, processar correções radiométricas antes da execução de procedimentos de classificação é necessário para promover a correção topográfica (ANDRADE *et al.* 2007).

Um certo número de algoritmos de correção topográfica já foi publicado, na sua

maioria aplicados para regiões dos Alpes, montanhas, e cordilheiras, comuns na Ásia, Europa e na América Andina. O método de correção publicado pela primeira vez por Teillet *et al.* (1982), e referido por Meyer, *et al.* (1993), é conhecido como correção-C. Ele é semelhante a uma correção simples de iluminação a qual faz uso da lei dos cossenos, mas introduz um ajuste derivado a partir da regressão do número digital contra o ângulo de incidência solar.

Embora raramente empregados nos protocolos de processamento de imagens *Landsat*, os requerimentos para a referida correção são relativamente simples, exigindo-se o uso de modelos digitais de elevação para sua execução (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2008). Dados de distribuição da radiação solar e a posição do sol referente ao momento que as imagens de satélite são registradas constituem pontos de partida para adequar e modelar as etapas de geoprocessamento que minimizem os efeitos da sombra. Logo, o mapeamento das áreas que recebem apenas radiação solar difusa (de várias direções), bem como daquelas sob diferentes intensidades de radiação direta, é um aspecto de grande importância em estudos de climatologia local, fitossociologia, ordenamento do território, agricultura, entre outros (VIEIRA, 2000).

Neste trabalho, é apresentada uma metodologia de modelagem da compensação radiométrica por atributos topográficos (MCRAT), aplicada a uma região de bioma cerrado. O desenvolvimento algébrico do MCRAT visa poder ser utilizado em distintos *softwares*, tendo sido testado no SIG IDRISI KILIMANJARO. A concepção geral do MCRAT é a correção radiométrica das distorções produzidas pelo sombreado, e tem por base o uso do modelo digital de elevação (MDE) e do modelo de radiação para céu claro desenvolvido por Bird e Hulstrom (1981). A avaliação do efeito da redução do efeito da exposição à radiação é estabelecida sobre a classificação de uso da terra.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A escolha da área de estudo está relacionada com imagens de satélite que apresentam características espectrais que dificultam sua classificação de uso da terra, seja por fatores fitofisionômicos ou geológicos. Dessa forma,

o presente artigo apresenta procedimentos para uma modelagem de compensação radiométrica que visa aumentar a acurácia na classificação de uso da terra deste tipo de imagem. Para avaliar o grau de efetividade do uso desta modelagem, é realizada uma análise de validação da exatidão do método, através de comparações de amostras das classificações (com e sem o uso de modelagem) com dados de verdade terrestre.

2.1 Área de Estudo

Foi selecionada uma área que engloba o Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (PNCV) e seu entorno, situada no estado de Goiás, entre as coordenadas $47^{\circ} 53' 54.5604''$ W a $47^{\circ} 25' 17.5404''$ W e $14^{\circ} 10' 48.5148''$ S a $13^{\circ} 53' 14.604''$ S e coberta pelas cenas *Landsat-TM* de órbita 221 e pontos 69 e 70 (Figura 1). As cenas escolhidas datam de 8 de julho de 2011 às 10:02:43: horário local (-03:00 UTC), que caracterizou menor quantidade de nuvens e maior capacidade de distinção de alvos, como resultado direto de uma melhor distribuição radiométrica na cena.

O PNCV constitui uma das áreas mais expressivas em termos de ocorrência de cerrado rupestre no estado de Goiás. Esta é uma das fitofisionomias mais representativas do bioma cerrado e é típica de ambientes campestres, os quais englobam cerca de 7% da região de domínio do referido bioma (REATTO *et al.*, 2008). Formações campestres apresentam grau

relativamente elevado de conservação, pois ocorrem sob condições topográficas e edáficas peculiares, isto é, elevadas altitudes e em solos rasos e com elevado número de afloramentos de rochas de quartzito e arenito. A heterogeneidade de substrato, topografia e microclima são refletidas na estrutura das comunidades e na composição florística dos campos, agregando vários microambientes em espaços restritos (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005). A vegetação campestre é tipicamente xeromórfica (Giulietti *et al.*, 1997), dominada por plantas com grande capacidade de fixação ao substrato e tolerantes à dessecação ou resistentes ao estresse hídrico. As folhas são geralmente coriáceas e fibrosas, estando reduzidas a espinhos em cactos ou formando tanques de água em bromélias.

As áreas de ocorrência desta fitofisionomia atuam como importantes barreiras para a expansão agropecuária no cerrado favorecendo a conservação da vida silvestre do bioma (NASCIMENTO; SANO, 2010). Por ser uma região predominantemente conservada, com presença de dobramentos, escarpas e falhas geológicas, são recorrentes sombras nas imagens orbitais.

2.2 Metodologia

Os procedimentos para a modelagem da compensação radiométrica por atributos topográficos (MCRAT) são apresentados na Figura 2 e descritos a seguir.

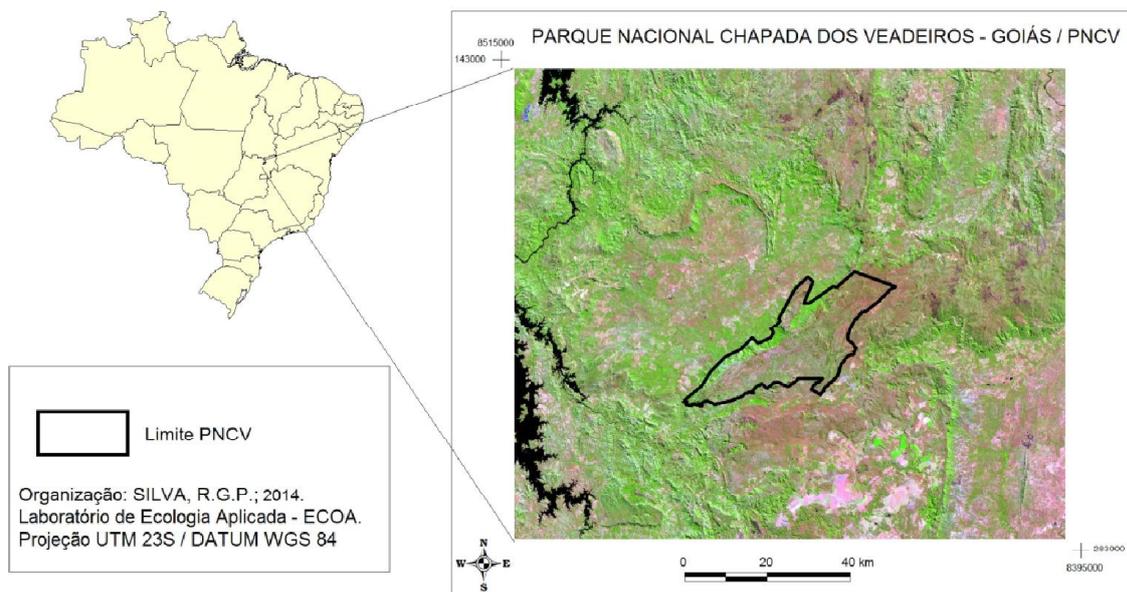


Fig. 1 - Área de estudo englobando a Chapada dos Veadeiros e seu entorno.

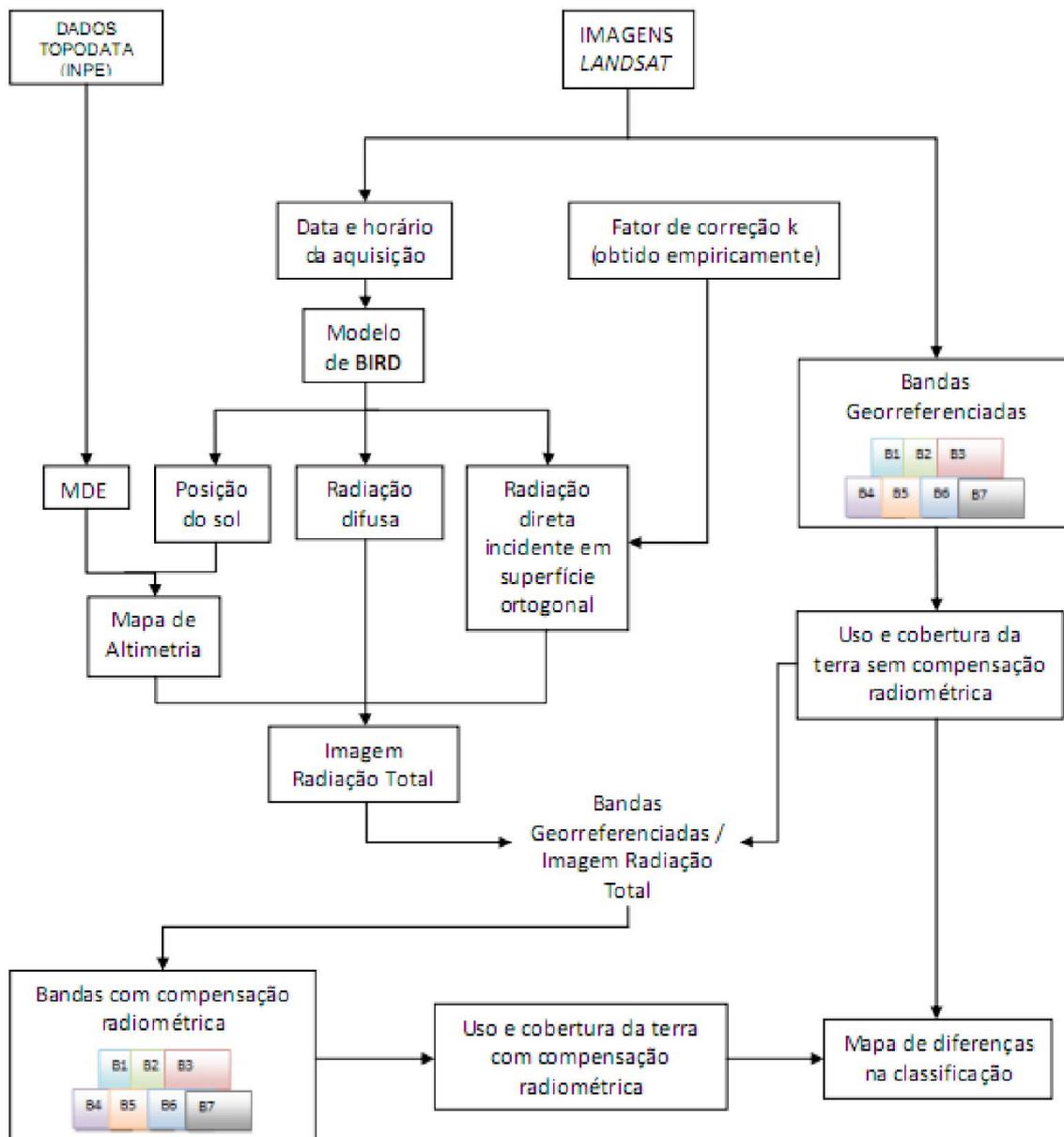


Fig. 2 - Etapas para execução e avaliação do Modelo de Compensação Radiométrica por Atributos Topográficos.

Inicialmente foi realizada a composição colorida falsa-cor RGB (*red, green e blue*) das bandas espectrais três, quatro e cinco. O procedimento foi conduzido em ambiente SIG IDRISI Kilimanjaro (comando: *Display / Composite*).

2.2.1 Compensação radiométrica

O modelo de Bird e Hulstrom (1981), ou simplesmente Modelo de Bird, se baseia em constantes de atenuação e difusão atmosférica da radiação e nas coordenadas de uma localidade. As funções deste modelo foram incorporadas numa biblioteca virtual, desenvolvida pela equipe, e acessadas por meio de uma rotina (programa) de cálculo de radiação solar a partir

de uma dada posição no tempo e no espaço (http://ecoa.unb.br/sundial/tabua_de_radiacao_no_periodo.php). Esta rotina fornece a posição do Sol, em termos de azimute e elevação, além de dados de radiação direta em superfície ortogonal ao Sol ($R_{\text{ortogonal}}$), radiação direta em superfície horizontal ($R_{\text{horizontal}}$) e radiação difusa (R_{difusa}) para o instante do imageamento da cena *Landsat* (obtido nos metadados da imagem), tomando-se por base a coordenada central da cena.

O MDE (modelo digital de elevação), com pixel de 30 m foi fornecido pelo Topodata INPE (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>). Visando suavizar os efeitos de ruídos existentes, foi aplicado um filtro de média 3x3 (módulo

filter). O módulo “*surface*” foi empregado para obter o modelo analítico de sombreamento (*analytical hillshading*), tendo como parâmetros de entrada o MDE e a posição do Sol (azimute e elevação). A imagem resultante tem valores proporcionais à quantidade de radiação esperada para uma superfície ortogonal à incidência solar (um). Contudo, valores acima de 1 são obtidos em condições em que o ângulo de incidência aproxima ao ortogonal em áreas íngremes, quando a projeção se dá no plano da projeção cartográfica adotada, visto que nas áreas inclinadas, a área efetiva é maior que na área projetada. Também, valores nulos (zero) ocorrem quando o ângulo de incidência solar é paralelo à superfície. Valores abaixo de zero surgem quando a incidência está acima de 90 graus, ou seja, nas vertentes opostas ao Sol, onde a incidência direta não existe, sendo totalmente sombreadas pela vertente oposta (direcionada ao Sol). Para eliminar o problema de valores negativos, os quais não devem ser incorporados nos cálculos, foi feita uma reclassificação (módulo *reclass*), onde a única alteração é que valores negativos passam a assumir valor zero. Esta imagem foi denominada “modelo digital de radiação direta proporcional” (MDRP).

Qualquer pixel na paisagem recebe uma radiação total dada pela soma da radiação direta e da radiação difusa:

$$R_{total} = R_{ortogonal} \times MDRP + R_{difusa} \quad (1)$$

Onde:

R_{total} : Radiação Total na para um pixel na paisagem;

R_{difusa} : Radiação Difusa fornecida pelo Modelo de Bird;

$R_{ortogonal}$: Radiação Direta em Superfície Ortogonal fornecida pelo Modelo de Bird;

MDRP: Modelo de Radiação Direta Proporcional.

Embora esta formulação seja adequada para o cálculo de radiação disponível nos pixels de uma paisagem, não é possível a sua aplicação direta para fins de correção de resposta espectral de bandas de sensores orbitais antes que se façam algumas correções. A radiação refletida

ao espaço e que é captada pelo sensor orbital (reflectância) dependerá das características do alvo (uso da terra). Naturalmente, para um mesmo uso da terra, a refletância também dependerá da quantidade total de radiação solar incidente. Assim, uma área de mata densa exposta à grande quantidade de radiação tende a ter maior reflectância que a mesma fitofisionomia em áreas menos iluminadas. Contudo, esta relação não é linear, visto que a heterogeneidade interna ao pixel exerce efeito sobre a reflectância. Por exemplo, a heterogeneidade das copas das árvores e a estrutura do sub-bosque associadas à micro-rugosidade do relevo conduzem a processos de reflexão, absorção e transmissão da radiação que resulta num complexo processo energético no sub-bosque e numa menor reflectância acima do dossel. Visando a correção deste efeito, propomos um fator de correção K aplicado à radiação ortogonal, resultando na Radiação Compensada, que é modificação da equação 2:

$$R_{compensada} = K \times R_{ortogonal} \times MDRP + R_{difusa} \quad (2)$$

K: Fator de Correção de Radiação Ortogonal.

O K é um valor positivo menor ou igual a um e é dependente das características da paisagem, particularmente do relevo e da estrutura da vegetação, e deve ser obtido empiricamente caso a caso. Sugere-se começar a testar o valor de K, com números decimais com um algarismo significativo (0,1; 0,2; 0,3 e assim sucessivamente) juntamente à análise visual da banda 3 (red) resultante, com base na redução de áreas sombreadas. Uma vez encontrado o valor inicial para K, é realizado seu ajuste fino com dois algarismos significativos (0,21; 0,22; 0,23 e assim sucessivamente). No presente estudo, após uma série de testes sempre baseados em análise visual dos resultados parciais, foi adotado um valor 0,23 para o K. O módulo *image calculator* foi utilizado para efetuar o cálculo da radiação compensada (equação 2).

Para finalizar a operação de compensação radiométrica sobre as bandas espectrais, utilizou o módulo *image calculator* para cada banda, tendo como base a fórmula (3):

$$Z_i = \frac{X_i}{R_{compensada}} \quad (3)$$

Onde:

X_i : reflectância original para a banda i ;

Z_i : reflectância compensada para a banda i .

A ideia implícita nesta formulação é de que a reflectância compensada para uma banda é inversamente proporcional à radiação compensada, de modo em que uma área com um determinado uso da terra que recebe maior quantidade de radiação deve ter a mesma reflectância compensada que outra área que tenha menor quantidade de energia e apresente o mesmo uso da terra. Assim, a formulação proposta fornece a possibilidade de obter uma resposta radiométrica uniforme para determinado uso da terra, independentemente do efeito do relevo, da posição do sol e das características estruturais da vegetação e da heterogeneidade interna ao pixel.

Trata-se, portanto, de um modelo simplificado, pelo qual a radiação direta projetada ortogonalmente (em relação ao plano de projeção cartográfica adotada) depende tanto da quantidade de radiação em plano ortogonal à incidência do Sol (RDSO) quanto da inclinação do pixel em relação ao Sol (MDRP). A constante K diminui o valor da radiação ortogonal direta recebida por um pixel (R_{direta}), de modo a compensar processos internos que afetam a reflectância.

Visando comparar a efetividade do modelo proposto foram feitas duas classificações de uso da terra: a primeira utilizando as bandas não corrigidas e a segunda, com base nas bandas corrigidas pelo MCRAT.

As assinaturas espectrais para análise do uso da terra foram obtidas por meio de uma classificação não-supervisionada (módulo cluster; LEVIA; PAGE, 2000), seguida de reagrupamento visual das classes. Tais assinaturas espectrais formaram a base para as classificações finais de uso da terra (com e sem MCRAT), baseadas em algoritmo de máxima verossimilhança (MASCARO; FERREIRA, 2003) através do módulo *maxlike*. Foram adotadas iguais probabilidades para todas as

classes (formações savânicas, campestres, florestais, solo exposto, água e agricultura).

2.2.2 Validação da exatidão do método

Inicialmente, a efetividade do MCRAT foi analisada visualmente por meio de composições coloridas em falsa cor RGB. Para Congalton (1991), as técnicas usadas para aferir a exatidão de mapeamento têm como ponto de partida a construção de uma matriz de erro. Assim, a análise estatística para avaliar a diferença/similaridade entre as duas classificações (com e sem correção) teve base em consultas e análise de exatidão. A superfície mapeada (extensão) para cada classe foi obtida pelo módulo *area* e a análise de exatidão considerou a identidade, a localização e as diferenças de classificação pelo cruzamento das duas imagens com o uso do módulo *crosstab*. A análise possibilitou saber qual uso foi atribuído para um determinado local (pixel) em ambas as classificações, de forma permitir um diagnóstico que fornecesse uma matriz de confusões, ou seja, uma avaliação classe-a-classe que mostrasse as congruências e incongruências entre as duas classificações.

A última análise para a verificação da efetividade do MCRAT foi feita baseada em dados de campo. Com apoio do Sistema de Aquisição, Processamento, Hospedagem e Integração de Informações sobre Recursos Ambientais (SAPHIRA) (HENKE-OLIVEIRA; SAITO, 2012; <http://ecoa.unb.br/saphira/>), contendo informações visuais (fotos) e auditivas (áudio) fixadas em pontos georreferenciados da paisagem foram aferidas as duas classificações. O objetivo desta análise é realizar uma comparação entre a real fisionomia e as classificações de uso da terra por meio de uma matriz de erros a qual apresenta a distribuição de percentagem de pontos classificados correta e erroneamente.

Hay (1988) define três objetivos na utilização da matriz de erro: a) oferece dados que permitem o ajuste das áreas das classes obtidas por algum tipo de classificação; b) cálculo de parâmetros de exatidão geral da classificação e c) identificação de erros específicos que afetam cada uma das categorias. Ippoliti-Ramilo (1998) comenta que a estatística mais simples derivada da matriz de erro é a exatidão geral (P0) que é

calculada segundo a equação (4):

$$PO = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad (4)$$

Onde:

N : número total de unidades amostrais contempladas pela matriz;

x_{ii} : número de elementos da diagonal principal (número de pontos corretamente classificados);

r : número de categorias presentes na matriz.

Apartir das matrizes de erros, a concordância entre o mapeamento e a verdade terrestre pode ser mais criteriosamente estudada com a utilização de análises estatísticas multivariadas. Essas técnicas são apropriadas, pois os dados são de natureza discreta (não contínuos) e encontram-se multinomialmente distribuídos (CONGALTON; MEAD, 1983). Neste sentido, o coeficiente de Kappa é um método muito utilizado e sua maior vantagem é que possibilita incluir todos os elementos (classes) da matriz de erro e não somente os elementos da diagonal principal, como no caso da exatidão geral (equação 4). Para a determinação do valor Kappa, emprega-se a seguinte equação (5), resultando na qualidade fornecida pela Tabela 1 (LANDIS; KOCH, 1977).

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (5)$$

Onde:

K : coeficiente de Kappa;

r : número de linhas da matriz;

x_{ii} : número de observações na linha e coluna i ;

x_{i+} e x_{+i} : totais marginais da linha i e da coluna i , respectivamente;

N : número total de unidades amostrais contempladas pela matriz.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise visual das duas composições coloridas (Figura 3) corrobora a efetividade do uso do MCRAT, mostrando a redução das sombras em regiões de quebra de relevo, escarpas e falhas. Basicamente, isto pode ser notado pela redução da percepção da rugosidade

Tabela 1: Qualidade da classificação associada aos valores da estatística KAPPA

Valor de Kappa	Qualidade do mapa temático
< 0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito boa
0,80 – 1,00	Excelente

do terreno na imagem corrigida.

O uso de correção radiométrica para redução de áreas sombreadas é bastante efetiva para regiões sem grandes variações fitofisionômicas como apresentaram os estudos de Andrade *et al.* (2007), na zona da mata mineira (Mata Atlântica) e no de Celinski; Zimback (2010) nos campos gerais do Paraná (floresta ambrófila mista). Nestes casos, a correção radiométrica não acarretou maiores mudanças nas demais classes de uso da terra, principalmente pelas formações vegetais serem mais homogêneas.

Além da visualização das imagens de satélite, é oportuno avaliar os resultados das classificações de uso da terra de imagens com correção radiométrica, para verificar se áreas sombreadas foram melhor classificadas e se a correção radiométrica influiu na classificação de outros temas.

A Figura 4 indica as diferenças nas classificações resultantes. As sombras obtidas na primeira classificação sofreram redução de área após o uso do MCRAT. Além disso, houve uma redução de área de corpos d'água, basicamente pelo fato de que muitas áreas situadas nas quebras de relevo apresentaram uma menor resposta espectral nos dados originais, conduzindo a uma errônea detecção de lagos e represas. Os resultados obtidos em relação à quantidade de áreas mapeadas por classe estão no Quadro 1.

As diferenças percentuais em relação à classificação sem correção de sombras descrevem claramente as modificações de cada classe em relação a ela mesma. As diferenças mais significativas, considerando as maiores classes de uso da terra, ocorreram nas áreas de formações savânicas que reduziram em 11,36% e solo exposto que aumentou 17,90%.

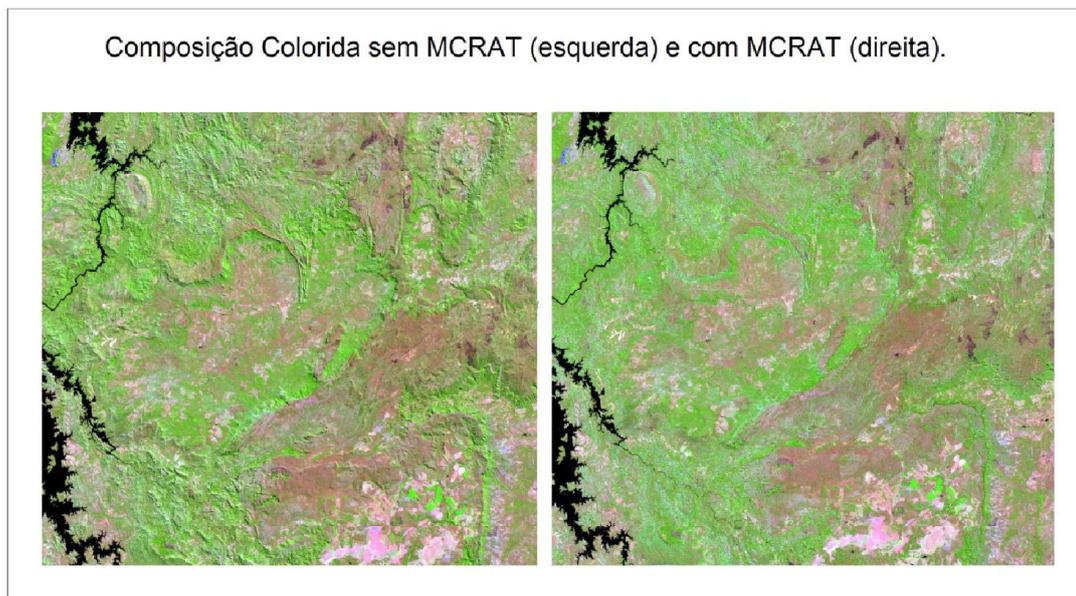


Fig. 3 - Comparação entre as composições coloridas (R5G4B3) sem correção (esquerda) e com correção de radiação (direita), evidenciando a melhoria da resposta espectral proporcionadas pelo MCRAT.

As formações florestais aumentaram 6,71% e as campestres aumentaram em 1,6%. A água, cuja classe apresenta comportamento espectral mais suscetível a confusões com sombras, obteve uma redução relativamente alta, de 20,72%. A agropecuária apresentou uma diminuição de 28,67% considerado um valor alto, porém não muito significativo dada a pequena área desta classe em relação a paisagem total. Esses valores denotam a importância da compensação da radiação nos procedimentos.

A redução acentuada da área de formação savânica e o aumento de área de solo exposto e formação florestal podem ser melhor analisados e relacionadas. De acordo com Lima (2008), em termos espectrais, formações savânicas confundem-se principalmente com a mata seca, florestas de baixo porte e formações campestres. A transição gradual e complexa das formações de cerrado contribui para a diminuição da exatidão global da classificação de uso da terra, o que dificulta maiores inferências e análises sobre este bioma (OLIVEIRA-FILHO; FLUMINHAN-FILHO, 1999).

De acordo com Ribeiro; Walter (2008), as formações savânicas ocorrem em ilhas mescladas às outras fitofisionomias de formação campestre. Numa toposequência, é comum encontrarem formações campestres nas porções mais elevadas e mata seca ou cerrado *sensu stricto* nas porções

mais intermediárias e baixas, dificultando a discriminação de cada formação de cerrado nas imagens *Landsat* (LIMA, 2008).

As áreas classificadas como formação campestre estão associadas a solos rasos ou afloramentos rochosos, com predominância de rochas quartzíticas e arenitos. Em período de seca é comum essas áreas ficarem descobertas de vegetação e serem classificadas como solo exposto (HARLEY, 1995). No período de chuva, fica evidente que estes afloramentos rochosos abrigam plantas de diversos portes, desde pequenas árvores até ervas, sendo de fato um tipo de formação campestre (PEREIRA, 1994; SAFFORD, 1999).

O estudo das fitofisionomias de cerrado por sensoriamento remoto é, portanto, um desafio em razão da diversidade florística e estrutural existente, dada as variações fenológicas perante o regime de chuvas, de sua inter-relação com outros biomas, pela ocorrência de queimadas e seus efeitos (SOUSA, 2009). Agregado a essas características, a análise de fitofisionomias rupestres, pode incluir o fator topográfico, onde o relevo pode gerar efeitos de sombreamento, tornando as tipologias muitas vezes indistinguíveis em imagens multiespectrais.

Esse caráter, da vegetação de cerrado, em resposta às variações do ambiente, com certo

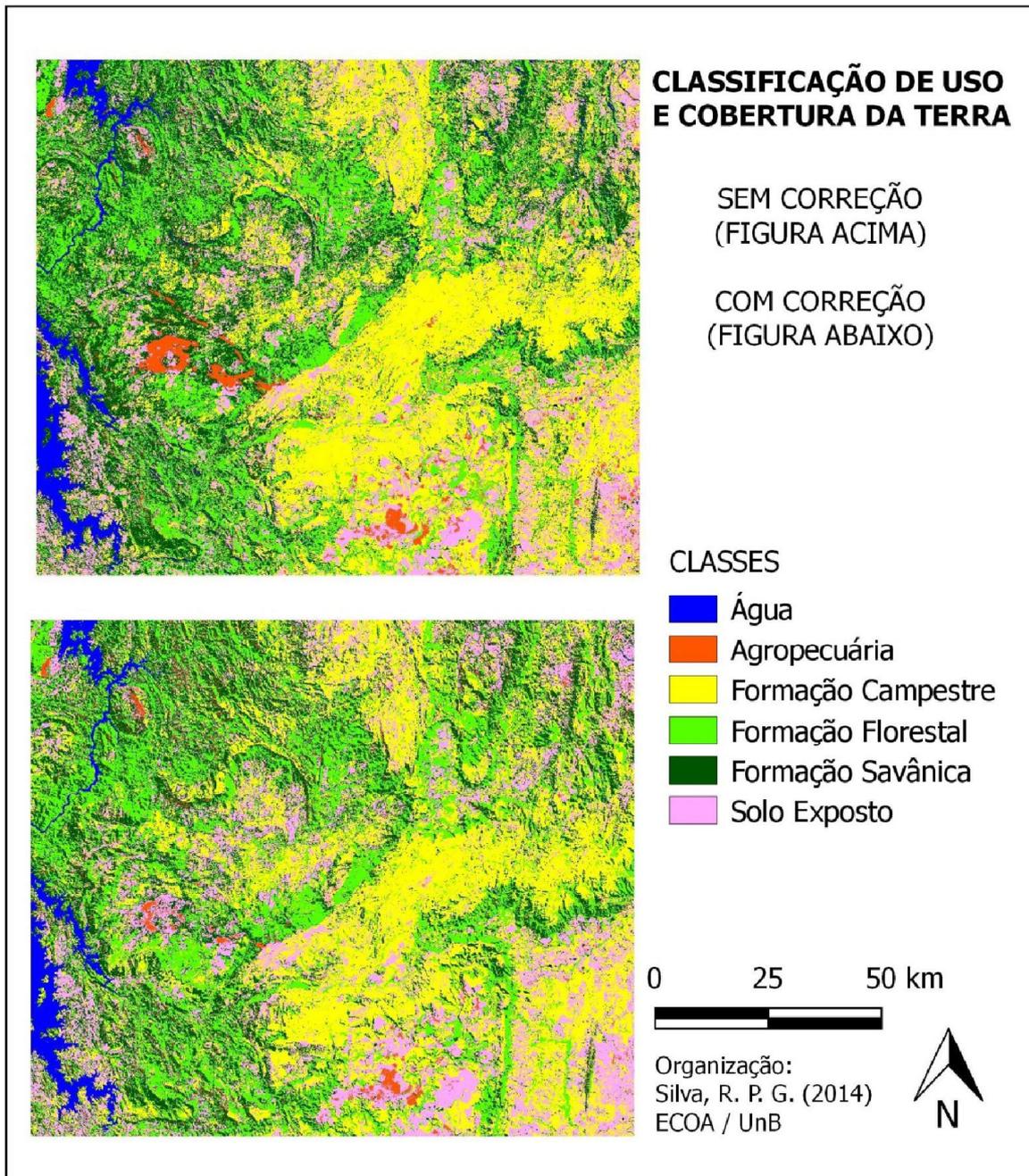


Fig. 4 - Comparação entre as classificações sem compensação radiométrica (acima) e com compensação radiométrica (abaixo), evidenciando a melhoria da resposta espectral proporcionadas pelo MCRAT.

grau de heterogeneidade na sua composição, justifica a alta susceptibilidade na mudança de classificação das formações savânicas e solo exposto após correção pelo MCRAT.

O Quadro 2 descreve a variação percentual das mudanças entre classes obtidas pelo cruzamento classe-a-classe, possibilitando verificar onde se deu a confusão, mas especificamente, permitindo verificar “quais usos cederam área a quais usos” entre as classificações. A soma das áreas que permaneceram na mesma classe nos dois mapeamentos (soma

das células na diagonal da matriz) foi de 71.65%. Esta análise permite identificar as diferenças entre as classificações, portanto, representa um bom indicador do efeito do uso de atributos topográficos e de radiação sobre uma classificação. Contudo, não indica qual é a melhor das classificações. Conseqüentemente, também não possibilita avaliar como as áreas mapeadas para as diferentes classes de usos da terra respondem ao MCRAT. Estas relações, contudo, são bem estabelecidas quando comparadas as classificações aos dados da verdade terrestre

Quadro 1: Valores de área mapeada nas duas classificações e respectivas diferenças

Classes de uso da terra	Área em hectares (e percentual da paisagem - %)		Diferenças		
	Sem compensação radiométrica	Com compensação radiométrica	Absoluta	Relativa à classe	Relativa à área total da paisagem
			(hectares)	(%)	(%)
Formação savânica	401933,70	356275,71	-45657,99	-11,36	-2,99
	26,35	23,35			
Formação campestre	484615,62	490738,41	6122,79	1,26	0,40
	31,77	32,17			
Solo exposto	242234,01	285589,98	43355,97	17,90	2,84
	15,88	18,72			
Formação florestal	298395,99	318417,39	20021,40	6,71	1,31
	19,56	20,87			
Água	54662,04	43336,17	-11325,87	-20,72	-0,74
	3,58	2,84			
Agropecuária	43654,68	31138,38	-12516,30	-28,67	-0,82
	2,86	2,04			
Total	1525496,04	1525496,04	0,00	0,00	0,00
	100,00	100,00			

(Quadros 3 e 4).

Ao se fazer uso de 189 pontos de verdade terrestre e considerando para cada ponto duas topologias (lado esquerdo e direito), poderiam ser analisadas 378 (o dobro) de verdade de campo em relação à classificação com e sem MCRAT. Contudo, em alguns casos a descrição da verdade terrestre, mesmo com fotos e áudio, ficou impossibilitada. Assim, o número total de análises foi reduzido para 323 (Quadros 3 e 4). A alta congruência da classe água é justificada pela origem dos registros de verdade terrestre que são regiões de fácil acesso (trilhas, estradas, vilarejos e cidades). As incongruências dessa classe eram esperadas por regiões de grandes acidentes topográficos, logo de difícil acesso. Desta forma não se obteve registros onde possivelmente sombras eram classificadas como água.

Ao analisar o cruzamento dos pontos de verdade terrestre, considerando a topologia direita e esquerda, utilizados para a composição da matriz de erros, foi obtida uma exatidão geral de 58,20% ($kappa = 0,39$) sem uso MCRAT (Quadro 3) e 78,94% ($kappa = 0,70$) com o seu

uso (Quadro 4).

Pela classificação de Landis; Koch (1977, Tabela 1) o uso do MCRAT conduziu a uma classificação considerada como “de muito boa qualidade”, enquanto que sem o uso do modelo a classificação é considerada como de “razoável”. Isto significa que o emprego da MCRAT contribui positivamente para a melhora na classificação de imagens para fins de geração de mapa de uso da terra, com mudança na classe de avaliação, com base, principalmente, no coeficiente Kappa.

Utilizando correções radiométricas e a mesma técnica de classificação de uso da terra para duas cenas de imagens CBERS-2, Celinski; Zimback (2010) chegaram a resultados de exatidão geral de 77,90% ($kappa = 0,74$) e de 84,86% ($kappa = 0,80$). É importante ressaltar que neste caso, o tipo de ambiente (floresta ombrófila mista) há menos variações do tipo de vegetação, o que colabora para maiores acertos.

Os resultados apresentados mostraram importantes alterações da classificação de cobertura da terra mediante o uso do MCRAT.

Quadro 2: Matriz de congruências e erros entre as duas classificações realizadas. O índice de Kappa (KIA) indica as congruências da classificação classe-a-classe. O valor de KIA igual a 0,63 indica a congruência global

Usos da terra		Sem MCRAT							KIA	
		Congruência proporcional ao tamanho da paisagem (0 a 1)								
		Formação savânica	Formação campestre	Solo exposto	Formação florestal	Água	Agropecuária	Total		
Com MCRAT	Congruência (0 a 1)	Formação savânica	(14,76%)	5,84%	1,12%	3,94%	0,08%	0,60%	26,35%	0,50
		Formação campestre	3,74%	(24,35%)	2,63%	0,89%	0,02%	0,13%	31,77%	0,64
		Solo exposto	0,54%	1,17%	(13,48%)	0,36%	0,00%	0,32%	15,88%	0,67
		Formação florestal	2,99%	0,64%	0,19%	(15,55%)	0,01%	0,18%	19,56%	0,68
		Água	0,81%	0,01%	0,00%	0,03%	(2,72%)	0,01%	3,58%	0,95
		Agropecuária	0,52%	0,15%	1,30%	0,09%	0,01%	(0,79%)	2,86%	0,37
		Total	23,35%	32,17%	18,72%	20,87%	2,84%	2,04%	(100,00%)	
KIA		0,43	0,66	0,81	0,74	0,75	0,26		0,63	

Quadro 3: Matriz de congruências e erros entre a classificação SEM MCRAT e dados de campo. O índice de Kappa (KIA) indica as congruências da classificação classe-a-classe. O valor de KIA igual a 0,39 indica a congruência global

USOS		Verdade terrestre (campo)							KIA	
		Congruência (número de observações em campo)								
		Agropecuária	Água	Formação campestre	Formação florestal	Formação savânica	Solo exposto	Total		
Classificação (SEM MCRAT)	Congruência (número de observações na imagem)	Agropecuária	3	0	0	2	0	9	14	0,21
		Água	0	6	0	0	0	0	6	1,00
		Formação campestre	10	0	106	31	12	20	179	0,59
		Formação florestal	0	0	14	19	2	0	35	0,54
		Formação savânica	0	0	3	4	33	0	40	0,83
		Solo exposto	9	0	17	2	0	21	49	0,43
		TOTAL	22	6	140	58	47	50	323	
KIA		0,14	1,00	0,76	0,33	0,70	0,42		0,39	

Tal melhoria se dá não somente pela redução de áreas sombreadas, mas, sobretudo pela melhoria na capacidade de conduzir uma análise da fitofisionômica mais acurada. Dada a importância desse tipo de correção (ANDRADE *et al.* 2007; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2008), é comum encontrar relatos sobre a dificuldade dela ser realizada por depender de informações sobre as condições climáticas no momento da geração da imagem (CUNHA, 2001). Ao apresentar uma rotina, de livre acesso, que disponibiliza tais dados (http://ecoa.unb.br/sundial/tabua_de_radiacao_no_periodo.php) o presente artigo torna a correção radiométrica, um processo executável com auxílio dos metadados

das imagens.

4. CONCLUSÃO

Áreas de formações savânicas, campestres e solo exposto foram mais susceptíveis a mudanças mediante a correção radiométrica promovida pelo MCRAT. A transição gradual e complexa das formações campestres para as fisionomias adjacentes justifica a maior intensidade de mudanças dessas classes. Água, que possui um comportamento espectral que tende a ser confundido com sombra, teve uma redução significativa de 20,72%.

Para verificar a acurácia da modelagem MCRAT, com auxílio de dados reais dispostos

Quadro 4: Matriz de congruências e erros entre a classificação COM MCRAT e dados de campo. O índice de Kappa (KIA) indica as congruências da classificação classe-a-classe. O valor de KIA igual a 0,70 indica a congruência global

USOS		Verdade terrestre (campo)							KIA	
		Congruência (número de observações em campo)								
		Agropecuária	Água	Formação campestre	Formação florestal	Formação savânica	Solo exposto	Total		
Classificação (COM MCRAT)	Congruência (número de observações na imagem)	Agropecuária	7	1	0	2	0	1	11	0,64
		Água	0	5	0	0	0	0	5	1,00
		Formação campestre	7	0	117	16	1	1	142	0,82
		Formação florestal	0	0	12	34	2	0	48	0,71
		Formação savânica	0	0	1	4	44	0	49	0,90
		Solo exposto	8	0	10	2	0	48	68	0,71
		TOTAL	22	6	140	58	47	50	323	
KIA	0,32	1,00	0,84	0,59	0,94	0,96		0,70		

em banco de dados de verdade terrestre, foi constatado que o MCRAT possibilitou 21% a mais de acertos na classificação.

Esses dados permitem concluir, portanto, que mapas de uso da terra gerados por classificação de imagens que não levem em conta a compensação radiométrica por atributos topográficos (MCRAT) podem conter erros de interpretação que superestimem de um lado e subestimem por outro algumas classes de uso da terra. Estes erros podem ser muito significativos e apresentarem forte influência na conclusão de diagnósticos e cenários prospectivos, sendo capazes de produzir efeitos imprevisíveis na definição de políticas públicas.

O presente trabalho procurou mostrar a necessidade dessa compensação radiométrica por atributos topográficos (MCRAT), bem como, o modo de executá-la e sua fundamentação. Embora tenha sido realizada num ambiente SIG específico, comandos e rotinas facilmente utilizados expressam sinalizações claras de como fazê-lo em qualquer outro *software* de SIG.

Estes cuidados se tornam ainda mais relevantes nas regiões de cerrado rupestre, que sofrem forte influência da morfologia terrestre, o mesmo sendo válido para outras regiões com forte interferência da topografia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. F.; SILVA, J. R.; GLERIANI, J.M.; SOARES, V. P.; Ribeiro, C. A. A. S.; SCHIMITH, R. S. Utilização de modelos de normalização topográfica para a classificação

de fragmentos florestais na Zona da Mata Mineira. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis, Brasil, INPE: p. 1591-1598. 2007.

BIRD, R. E.; HULSTROM, R. L. **A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces**. Solar Energy Research Institute, Colorado, SERI-TR-642-76 I, p. 38, 1981.

CELINSKI, T. M; ZIMBACK, C. R. L. Discriminação de classes de cobertura vegetal utilizando técnicas de classificação digital de imagens de sensoriamento remoto. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 1, p. 152- 170, 2010.

CENTENO, J., PACHECO, A. Classificação de sombra em imagens orbitais e aéreas utilizando uma matriz de co-ocorrência modificada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, América do Norte, 17, abr. p. 75-92, 2011.

CONCEIÇÃO, A. A.; RAPINI, A.; PIRANI, JR.; GIULIETTI, A. M.; HARLEY, R. M.; SILVA, T. R. S.; SANTOS, A. K. A.; COSME, C.; ANDRADE, I. M.; COSTA, J. A. S.; SOUZA, L. R. S.; ANDRADE, M. J. G.; FUNCH, R. R.; FREITAS, T. A.; FREITAS, A. M. M.; OLIVEIRA, A. A. Campos rupestres. In: JUNCÁ, F.A.; FUNCH, L.; ROCHA, W. (org.). **Biodiversidade e conservação da Chapada Diamantina**. p. 153-180. Ministério do Meio Ambiente, Brasília. 2005.

CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A quantitative method to test for consistency and correctness

- in photointerpretation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.1, p.69-74, 1983.
- CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A review of assessing the accuracy of classifications of remote sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-46, 1991.
- CONESE, C.; GILABERT, M. A.; MASELLI, F.; BOTTAI, L. Topographic normalization of TM scenes through the use of an atmospheric correction method and digital terrain models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.59, n. 12, p.1745-1753, 1993.
- CUNHA, J. C. **O uso do modelo digital de elevação como alternativa para correção dos efeitos da iluminação diferenciada em imagens de satélite**. Monografia de curso de especialização em geoprocessamento. 45 p. Universidade Federal de Minas Gerais. 2001.
- FELICÍSIMO, A. M.; GARCÍA-MANTECA; P. Corrección del efecto topográfico de las imágenes *Landsat* mediante el uso de un modelo digital de elevaciones. **Anais... III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección - Asociación Española de Teledetección**. C. Antón-Pacheco and J. L. Labrandero. Madrid - España: 209-216. 1990.
- FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing** 25(10): 1837-1860. 2004.
- GIULIETTI, A. M., PIRANI, J. R.; HARLEY, R. M. Espinhaço Range Region. Eastern Brazil. In: DAVIS, S. D., HEYWOOD, V. H., HERRERA-MACBRYDE, O., VILLALOBOS J.; HAMILTON A. C. (eds). **Centres of Plant Diversity**. A guide and strategies for the conservation, vol. 3. The Americas. pp. 397-404. WWF/IUCN, Cambridge. 1997.
- GONZÁLES, E. G. Aplicación de la corrección del sombreado topográfico para la Identificación y delimitación de cuerpos de agua en la región Andina del Perú dentro de un sig raster. **Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**: 17. 2008.
- HARLEY R. M. Flora of the Pico das Almas, Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. **Royal Botanic Gardens, Kew**. Introduction. p. 43-78. *En*: STANNARD B. (editor). 1995.
- HAY, A. M. Sampling designs to test land-use map accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.45, n.4, p.529-533, 1979.
- HENKE-OLIVEIRA, C.; SAITO, C. H. A imagem da paisagem e a paisagem da imagem: o Sistema de Aquisição, Processamento, Hospedagem e Integração de Informações sobre Recursos Ambientais (SAPHIRA). **Espaço & Geografia**, v.15, n. 2, p. 385-405. 2012.
- IPPOTILI-RAMILO, G. A. **Imagens TM/ Landsat-5 da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão**. 183 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.
- JACKSON, R. D.; SLATER, P. N.; PINTER JR., P. J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. **Remote Sensing of the Environment**, v.13, n.3, p.187-208, 1983.
- JACKSON, R. D.; TEILLET, P. M.; SLATER, P. N.; FEDOSEJEVS, G.; JASINSKI, M. F.; AASE, J. K.; MORAN, M. S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view corrections of oblique imagery. **Remote Sensing of the Environment**, v.32, n.2-3, p.189-202, 1990.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33,n.1,p.159-174, 1977.
- LEVIA, J. D. F.; Page, D. R. The Use of Cluster Analysis in Distinguishing Farmland Prone to Residential Development: A Case Study of Sterling, Massachusetts. **Environmental Management** 25(5): 541-548. 2000.
- LIESENBERG, V.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Variations in Reflectance with Seasonality and Viewing Geometry: Implications for Classification of Brazilian Savanna Physiognomies with MISR/Terra Data, **Remote Sensing of Environment**, 107(1-2):276-286. 2007.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote**

- Sensing and Image Interpretation**, John Wiley & Sons, inc., p. 804, 2000.
- LIMA, C. A. **Cerrado Rupestre no Estado de Goiás com base em imagens LANDSAT ETM**. Departamento de Engenharia Florestal. Brasília - DF, Universidade de Brasília. Mestrado em Ciências Florestais, 116 f. 2008.
- MASCARO, S. A.; FERREIRA, M. C. Análise comparativa entre algoritmos de classificação digital de imagem com base na exatidão do mapeamento do uso e cobertura do solo: um exemplo na área de influência do reservatório de Jurumirim - SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR). Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1365 - 1372. CD-ROM. ISBN 85-17-00017-X. 2003.
- 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** 48(4): 17-28. 1993.
- NASCIMENTO, E. R. P.; SANO, E. E. Identificação de Cerrado Rupestre por meio de imagens multitemporais do Landsat: proposta metodológica. **Sociedade & Natureza**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia. vol. 22 (1):p. 93 - 106. 2010.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FLUMINHAN-FILHO, M. Ecologia da vegetação do Parque Florestal Quedas do Rio Bonito. **Cerne**. v. 5:p. 51-64. 1999.
- PEREIRA M. C. A. **Estrutura das comunidades vegetais de afloramentos rochosos dos campos rupestres do Parque Nacional da Serra do Cipó**, MG. Dissertação (Mestrado em Ecologia)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1994.
- POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. Correção radiométrica das imagens multiespectrais CBERS e LANDSAT ETM usando atributos de reflectância e de cor. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12º, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p. 4241-4248. 2005.
- PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S.; EPIPHANIO, J. C. N. Influência da resolução espacial sobre a quantificação de áreas não florestadas em ambiente amazônico. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001.
- QI, J.; HUETE, A. R.; MORAN, M. S.; CHEHBOUNI, A.; JACKSON, R. D. Interpretation of vegetation indexes derived from multitemporal SPOT images. **Remote Sensing of the Environment**, v.44, n.1, p.89-101, 1993.
- RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. G. Analysis of Cerrado: physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. **Earth Interactions**, v.9, n.3, p.1-22, 2005.
- REATTO, A.; MARTINS, E. S. Classes de solo em relação aos controles da paisagem do bioma Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. MMA. Brasília, DF. 2005.
- RIBEIRO J. F.; WALTER B. M. T. Fitofisionomias do bioma cerrado. En: Sano, S. M.; Almeida, S. P. **Cerrado: ambiente e flora**: p. 89-166. Embrapa-CPAC, Planaltina. 1998.
- SAFFORD H. D. Brazilian Páramos I: Na introduction to the physical environment and vegetation of the campos de altitude. **Journal of Biogeography** (Amsterdam). 26: p. 693 – 712. 1999.
- SANO, E. E.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** vol.43 no.1: p. 153-156. 2008.
- SANO, E. E., FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Synthetic Aperture Radar (L band) and Optical Vegetation Indices for Discriminating the Brazilian Savanna Physiognomies: A Comparative Analysis. **Earth Interactions** 9(1): p. 1-15. 2005.
- SILVA, G. B. S.; BETIOL G. M., SANO, E. E. Análise comparativa de quatro métodos de classificação supervisionada para a discriminação de fitofisionomias de cerrado. **Geografia Ensino & Pesquisa** 12 nº 1: p. 3935-3947. 2008.

- SOUZA, A. A. **Estudo de fitofisionomias de Cerrado com dados do sensor Hyperion/EO-1**. 2009. p. 120 Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assessment of different topographic corrections in *Landsat*-TM data for mapping vegetation types. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.4, n.5, p.1056-1061, 2003.
- RICHTER, R.; Corrections of atmospheric and topographic effects for high spatial resolutions satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.5, p.1099-1111, 1997.
- TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODEONUGH, D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data, **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 8, p. 84–106, 1982.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; PÉREZ-CABELLO, F.; LASANTA, T. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of *Landsat* images. **Remote Sensing of Environment** 112, p. 3916–3934. 2008.
- VIEIRA, G. T. Cálculo do efeito de sombra com o Sistema de Informação Geográfica ILWIS 2.1, **Apontamentos de Geografia**, Série Investigação, 3, CEG, Lisboa, 10p. 2000.