

Correção radiométrica de imagens multiespectrais CBERS e Landsat ETM usando atributos de reflectância e de cor

Airton Marco Polidório ¹
Clélia Franco¹
Nilton Nobuhiro Imai ²
Antonio Maria Garcia Tommaselli ²
Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo ²

¹ Universidade Estadual de Maringá - UEM
Avenida Colombo, 5790 – 87020-900 - Maringá - PR, Brasil
{ampolido, cfranco}@din.uem.br

² Universidade Estadual Paulista – UNESP
Caixa Postal 467 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
{nnimai, tomaseli, mlourdes}@prudente.unesp.br

Abstract. Atmospheric influence on electromagnetic radiation is a severe obstacle to remote sensing. Analysis and interpretation of aerial images are difficult due to the different effects caused by atmospheric scattering, absorption and weather conditions. The atmosphere has an influence on the measured signal and can drastically alter the spectral nature of the radiation at-sensor level. Those atmospheric effects must therefore be eliminated before any analysis. This work presents a new method for atmospheric scattering and absorption effects reduction, which is based on the radiometric and colors properties of dark and clear features. This method, besides reducing the atmospheric effects, promotes a significant enhance of contrast among the features in the image, making the analysis and interpretation process of spectral images easier.

Palavras-chave: Remote Sensing, image enhance, atmospheric effects, Sensoriamento Remoto, realce de imagens, efeitos atmosféricos.

1. Introdução

A remoção de interferências em imagens de satélites provocadas pelo espalhamento das ondas eletromagnéticas, principalmente do espectro visível, bem como pela absorção por gases, constitui um dos relevantes problemas de Sensoriamento Remoto. Enquanto a absorção tem um efeito subtrativo sobre os valores de reflectância das feições, o espalhamento tem um efeito aditivo. Para imagens adquiridas na faixa de 390 a 900nm do espectro eletromagnético, predominam as interferências provocadas pelo espalhamento atmosférico de Rayleigh, Mie e não-seletivo, dentre os quais o de Rayleigh é o mais severo.

O espalhamento atmosférico, (Zullo et al., 1996), corresponde à mudança aleatória na direção de propagação da irradiação solar devido a sua interação elástica com pequenas partículas, gases e aerossóis em suspensão. Nessa interação, os fótons não são perdidos, mas redistribuídos em todas as direções sem haver mudança no comprimento da onda eletromagnética. Então, neste caso, o que chega ao sensor é a própria onda eletromagnética e não o resultado da interação da irradiação solar com um alvo específico. Isto torna a imagem nebulosa, dificultando a sua visualização e interpretação. A absorção é outro mecanismo de interação da radiação eletromagnética com a atmosfera. Em contraste com o espalhamento, este fenômeno, causado principalmente por moléculas de gases, absorve energia de vários comprimentos de onda. Ozônio absorve radiação ultravioleta. Dióxido de carbono absorve muita energia da porção do infravermelho-distante (termal). Vapor d'água afeta ondas eletromagnéticas de 1µm até 22µm. Poluição e outros agentes químicos em suspensão na atmosfera também provocam a absorção (Kaufman et al., 2001).

Este trabalho apresenta uma técnica que reduz, significativamente, a influência negativa do espalhamento atmosférico e da absorção sobre imagens adquiridas por satélites, nas faixas espectrais relativas ao: azul (B), verde (G), vermelho (R) e infravermelho-próximo (NIR). A proposta está baseada no comportamento espectral e nos atributos de cor de feições claras (principalmente nuvens) e escuras (principalmente sombras), os quais são automaticamente detectados. O método, além de reduzir os efeitos negativos causados por fenômenos atmosféricos, melhora sensivelmente o contraste entre as feições através do aumento equilibrado da amplitude do histograma da imagem.

2. Revisão Bibliográfica e Fundamentos Básicos do Método

Liang et al. (2001), classifica os métodos usados para corrigir os efeitos atmosféricos presentes em imagens de satélites em quatro grupos: (1) objetos com reflectância constante; (2) matching de histograma; (3) reflectância de objetos escuros e; (4) redução de contraste.

Objetos com reflectância constante. Os métodos que usam objetos constantes para corrigir os efeitos do espalhamento atmosférico por aerossóis, assumem que existem pixels na cena que possuem reflectância estável. Uma relação linear para cada banda baseada na reflectância destes "objetos constantes" pode ser usada para normalizar imagens adquiridas em datas diferentes (Hall et al., 1991; Chavez, 1996; Moran et al., 1992). Este método é simples e direto, mas é essencialmente um método estatístico e realiza somente a correção relativa. Outra limitação é sua dificuldade de corrigir os efeitos espalhamento atmosférico provocados por aerossóis heterogêneos.

Matching de histograma. Nestes métodos é assumido que os histogramas de reflectância de superfície de regiões claras e brumosas são os mesmos. Depois de identificar setores claros, os histogramas de regiões nebulosas são deslocados para emparelhar com os histogramas dos setores de referência formada pelas regiões claras (Richter, 1996). Porém, a suposição principal não é válida quando as composições relativas de objetos diferentes e suas respectivas reflectâncias forem diferentes. Este método também não trabalha bem se a distribuição espacial de aerossóis densos variar dramaticamente. Se a cena é dividida em muitos segmentos pequenos, realizar o matching entre os histogramas se torna uma tarefa muito difícil, quase improvável.

Reflectância de objetos escuros. Os métodos desse grupo estão entre os mais populares usados na correção dos efeitos atmosféricos. Vegetação densa tem baixos valores de reflectância no espectro visível, e é referida como objetos escuros. Para vegetação densa existe forte correlação entre os valores de reflectância da banda 1 (B) e 3 (R) e através de uma relação empírica das bandas 1 e 3 com a banda 7, do Landsat7 ETM+, os efeitos atmosféricos são minimizados (Kaufman and Sendra, 1988). Este método tem a desvantagem da aparência da vegetação ser sazonal. Uma outra técnica é a subtração de objetos escuros para minimizar os efeitos atmosféricos (DOS – *Dark Object Subtraction*). Esta técnica considera que os objetos mais escuros da imagem deveriam ser negros mas, que, por efeito do espalhamento atmosférico valores de reflectância são adicionados para estas áreas. Esta técnica é bem simples, basta verificar no histograma da imagem qual é o valor mínimo de brilho existente e deslocar todo o histograma para o lado esquerdo, levando este valor mínimo de brilho para zero. Este método reduz os efeitos do espalhamento de Rayleigh (Kukko, 2004).

Métodos da redução de contraste. Para regiões cuja reflectância da superfície é estável, a variação nas imagens adquiridas em datas diferentes pode ser atribuída às variações das propriedades ópticas da atmosfera. O espalhamento das ondas eletromagnéticas do espectro visível provocado por aerossóis e pequenas partículas em suspensão na atmosfera reduzem a variância da reflectância dos alvos. Com a análise do histograma de duas ou mais imagens da

mesma cena, adquiridas em datas diferentes, imagens com menor variabilidade, histograma estreito, têm seus respectivos histogramas modificados objetivando igualar a variância apresentada pelas imagens com melhor definição. Tanre e Legrand, (1991) usaram este método para monitorar o comportamento de areias do deserto do Saara. Este método pode ser aplicado em uma única imagem, ao aumentar a amplitude do histograma, aumenta o contraste entre os valores de radiância das feições.

Estudos dos fundamentos da cor (Gomes e Velho, 1994) geram modelos matemáticos que permitem representá-la como sistemas de cor, por exemplo: RGB, HSI, CIELAB, CMY, etc. Entre essas possibilidades de representação da cor, o sistema HSI produz atributos apropriados para os propósitos desse trabalho. O sistema de cor HSI, representa uma determinada cor através de três atributos: H (*hue* ou matiz), valor que representa uma cor específica; S (*saturation*), valor que representa a saturação, ou pureza, de uma cor em relação ao branco. A cor vermelha é mais saturada que a cor cor-de-rosa e; I (*intensity*), valor que representa o brilho de uma determinada cor. Quanto mais radiante for uma cor, maior a sua intensidade. Neste trabalho, a transformação do sistema de cor RGB para HSI é feita sobre a composição colorida das bandas 3, 2, 1 (RGB true color). Polidorio et al. (2003) associaram regiões de sombra com as componentes S e I do sistema de cor HSI para imagens RGB 3, 2, 1. Sombras são regiões de baixa intensidade luminosa (*I*), causada pelo bloqueio da incidência de luz direta e, com alta saturação (*S*) causada pelo espalhamento atmosférico de Rayleigh.

Fazendo a analogia com o problema abordado neste trabalho, as nuvens são claras, quase brancas, devido ao espalhamento não-seletivo, determinando a sua alta intensidade e baixa saturação. Por outro lado, sombras são escuras e saturadas com o azul devido ao espalhamento atmosférico de Rayleigh, determinando sua baixa intensidade e alta saturação. As Figuras 1b e 1c mostram esses dois atributos, os quais seriam suficientes para discriminar, com exatidão, se a imagem contivesse apenas sombras e nuvens. Entretanto, pelas presenças de outras feições as imagens são mais complexas e, esses dois atributos não são suficientes para garantir a detecção. Outros atributos são necessários, os quais são extraídos dos índices indicadores de feições NDVI e NDWI.

O NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*, (Jensen, 2000), é um índice discriminante para vegetação. Este índice é calculado usando imagens das bandas espectrais R e NIR. A vegetação absorve uma elevada parcela da luz vermelha incidente, provocando uma baixa reflectância na faixa espectral correspondente ao vermelho. Em contrapartida, ela reflete uma grande parcela da energia relativa ao infravermelho. Baseado nesse grande salto de reflectância entre R e NIR foi proposto o NDVI, o qual é amplamente empregado como indicador de vegetação. A Equação 1 é usada no cômputo do NDVI e é aplicada diretamente sobre cada par de pixel (R, NIR), produzindo um valor pertencente ao intervalo [-1, 1]. Quanto mais próximo de 1, maior é a certeza de estar se tratando de um pixel de vegetação.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1) \qquad NDWI = \frac{G - 4NIR}{G + 4NIR} \quad (2)$$

O NDWI – *Normalized Difference Water Index*, (Polidorio et al., 2004), estabeleceram um índice discriminante para corpos d'água. O seu cálculo é similar ao do NDVI, mas utiliza imagens das bandas NIR e G. Devido a não existência de um salto elevado de valores de reflectância entre as bandas G e NIR para corpos d'água, uma estratégia diferente foi adotada no seu cálculo: o ganho da banda NIR. É esperado que para corpos d'água, os valores NIR sejam aproximadamente zero então, $G \pm 4NIR \cong G$, Equação 2. Assim, no melhor caso, o NDWI produz o valor 1 para corpos d'água e próximo de -1 para as demais feições. Na prática, devido aos baixos valores de brilho registrados na imagem NIR, o valor NDWI oscila em torno de zero para corpos d'água e -1 para outras feições.

3. A Base do Método Proposto

A base do método, proposto neste trabalho, está na exploração das diferenças na resposta radiométrica e atributos de cor das nuvens e das sombras quando comparadas com outras feições. Polidório et al. (2003) mostraram que regiões afetadas por sombras realçam o efeito do espalhamento atmosférico de Rayleigh, no qual pequenas partículas em suspensão na atmosfera desviam, mais intensamente, ondas eletromagnéticas de pequeno comprimento correspondente ao azul e violeta, saturando a região sombreada com essas cores. Este é o fenômeno que causa a aparência azul do céu. Por outro lado, nuvens são compostas de partículas maiores, as quais realçam o espalhamento atmosférico de Mie e não-seletivo, desviando indiscriminadamente todos os comprimentos de onda, do espectro visível. O efeito aditivo de todos os comprimentos de onda do espectro visível produz a luz branca determinando assim, a cor de aparência das nuvens.

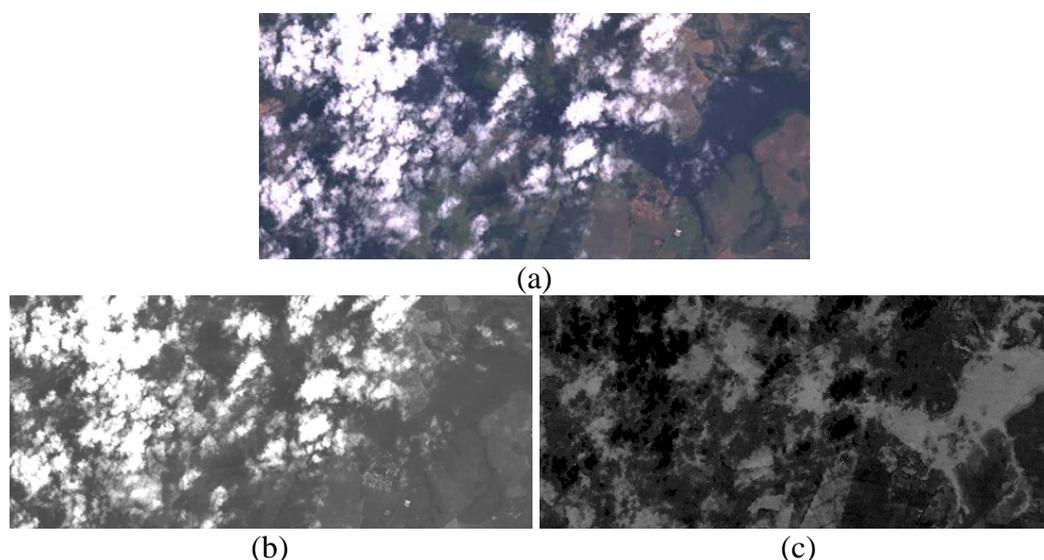


Figura 1. Atributos de cor do sistema HSI. (a) Imagem Original Landsat7 ETM RGB-321. (b) Intensidade (I). (c) Saturação (S).

O NDVI e o NDWI produzem valores no intervalo $[-1, 1]$. Dentro do contexto deste trabalho é necessário tratar esses índices no intervalo $[0, 1]$. A Equação 3 faz a interpolação desses valores de índices para o intervalo requerido. A Figura 2 mostra o resultado dessa operação, em 256 níveis de cinza, onde pode ser observada a qualidade da discriminação de áreas cobertas por vegetação e corpos d'água produzidos pelo cômputo desses dois índices. Para efeito de simplificação, a partir de agora, referências ao NDVI e ao NDWI devem ser entendidas como $f(NDVI)$ e $f(NDWI)$.

$$f(X) = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (3)$$

onde: X é uma matriz com valores entre $[-1, 1]$ e $f(X)$ é uma matriz com valores entre $[0, 1]$.

Os valores de brilho dos pixels de todas as imagens usadas nos cálculos propostos neste trabalho devem ser interpolados para o intervalo $[0, 1]$, usando $x = X/255$ onde: X são todos os valores de brilho da imagem original e x são todos os pixels da imagem X interpolados para o intervalo $[0, 1]$. A nomenclatura utilizada neste trabalho é: b , g , r e nir para designar pixels da banda do azul, verde, vermelho e infravermelho-próximo, respectivamente, representando valores de brilho no intervalo $[0, 1]$ e B , G , R e NIR representando os respectivos valores de brilho no intervalo $[0, 255]$. Essa nomenclatura deve ser estendida para as componentes do sistema de cor HSI (I e i ; S e s).

Polidorio et al. (2005) interessados em detectar regiões afetadas por sombras, nuvens e corpos d'água desenvolveram um conjunto de equações que explora os atributos radiométricos dessas feições (Equações 4, 5, 6, 7 e 8).

A Equação 4 é usada para detectar pontos claros na imagem (provavelmente nuvens), os quais têm: alta intensidade i e baixa saturação s . As subtrações das inversas da nir e b , fazem com que feições como vegetação, corpos d'água e solo exposto, que já apresentavam maior saturação que intensidade, tenham seus respectivos valores de brilho subtraídos por valores altos, enquanto que aquelas que tinham alta intensidade e baixa saturação são subtraídas por valores baixos. Esta operação faz com que elementos que possuem alta intensidade sejam positivos e os outros negativos. Assim, a Equação 5 detecta todos os valores maiores que zero, produzidos pela Equação 4, como sendo nuvens.

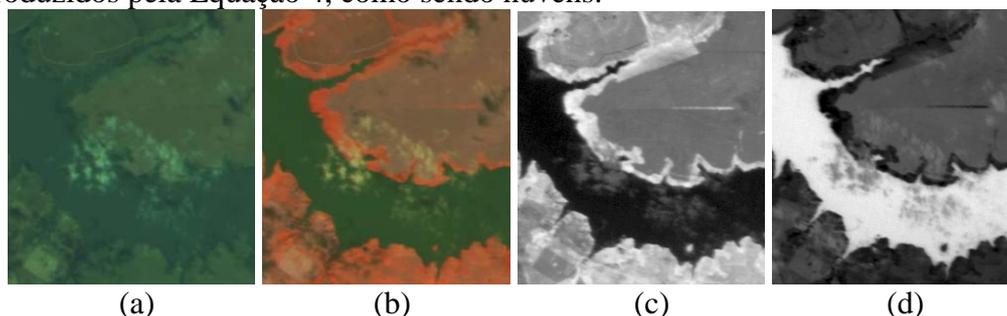


Figura 2. Índices de discriminação para vegetação e para corpos d'água. Imagens CBERS. (a) RGB–321. (b) CIR–423. (b) NDVI. (c) NDWI.

$$cl = 2i - s - (1 - nir) - \frac{1 - b}{2} \quad (4) \quad Agua = \begin{cases} 1, & \text{se } sw < 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

$$Nuvens = \begin{cases} 1, & \text{se } cl > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5) \quad Sombras = SW - (Agua \cup Nuvens) \quad (8)$$

$$\text{onde, } SW = \begin{cases} 1, & \text{se } sw < 0.7 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$sw = (i + nir + Nuvens + 2NDVI) - (s + 2NDWI) \quad (6)$$

Separar corpos d'água de regiões sombreadas, exige um pouco mais de trabalho. Sombra e água têm baixa intensidade e alta saturação. Entretanto, pode ser observado nas Figuras 2c e 2d que os índices NDVI e NDWI conseguem estabelecer um contraste razoável entre água e sombra – o NDVI produz um valor de brilho maior para sombra que para água e o NDWI produz valores maiores para água do que para sombras. Assim, usando esses dois índices, água e sombras podem ser discriminadas. Os valores da banda nir são usados para eliminar outras feições, principalmente vegetação e, retirando do processo o que foi segmentado como nuvens (elementos de alta intensidade), praticamente, sobram valores de água e sombra para serem separados. A Equação 6 realça as feições escuras com alta saturação (corpos d'água e sombras), em função das outras feições, diferenciando-as entre si. As Equações 7 e 8 completam a segmentação dos corpos d'água e sombra

3. O Método

O método para realizar a correção radiométrica das imagens consiste em detectar, em cada banda envolvida, as regiões mais claras (com alta intensidade e baixa saturação) e as mais escuras (com baixa intensidade e alta saturação). Essas regiões, normalmente, estão associadas com nuvens e sombras respectivamente (Equações 9 e 10).

$$mxb_i = 0.9 \max(b_i(Nuvens)) \quad (9) \quad mnb_i = 1.1 \min(b_i(Sombras)) \quad (10)$$

onde: b_i é uma banda espectral ($i = 1, 2, 3$ e 4); $b_i(Nuvens)$ são todos os pixels da banda b_i que foram detectados como nuvens; $b_i(Sombras)$ são todos os pixels da banda b_i que foram detectados como sombras; **min** e **max** obtêm o mínimo e o máximo valor de seu argumento, (brilho de pixel); dado o maior valor de brilho possível na banda b_i , $mx b_i$ será 90% desse valor e; dado o menor valor de brilho possível na banda b_i , mnb_i será 110% desse valor.

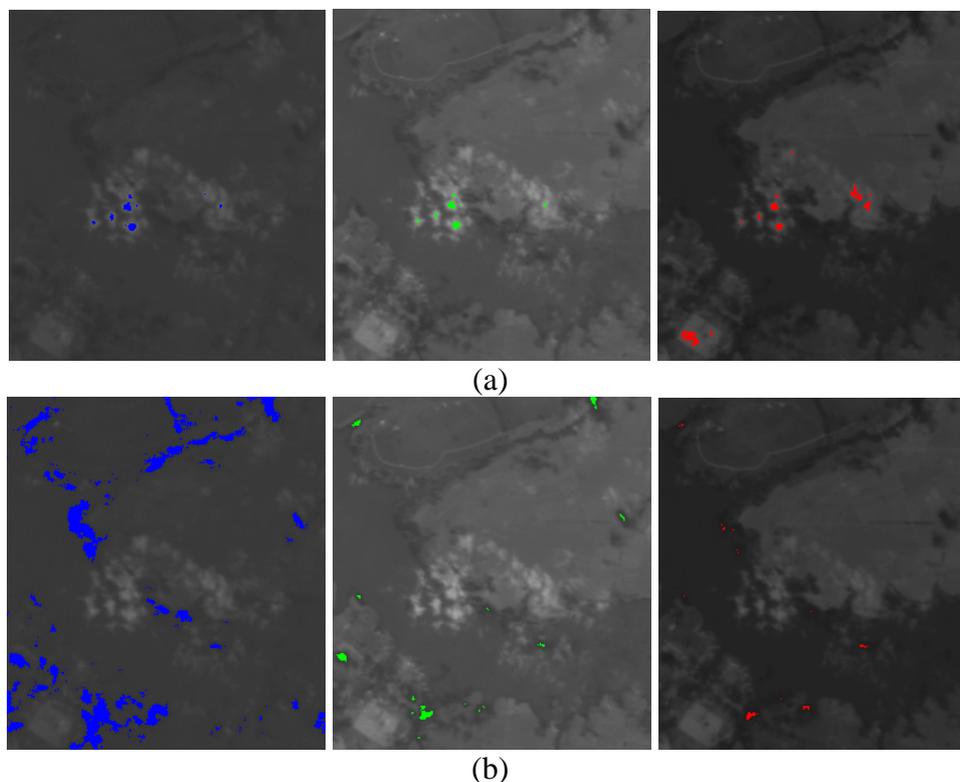


Figura 3. Imagens CBERS, bandas 1, 2 e 3. (a) Pontos de máxima intensidade e mínima saturação (Equação 11). (b) Pontos de máxima saturação e mínima intensidade (Equação 12).

As Equações 11 e 12, consideram que 10% do valor de brilho mais claro, ou mais escuro, como amostras suficientes para realizar a correção radiométrica. Esses 10% não significam que 10% das áreas mais claras e 10% das áreas mais escuras serão consideradas no processo. Essas equações consideram que entre todos os pixels candidatos das regiões mais claras, bem como das regiões mais escuras, somente os 10% mais claros, ou os 10% mais escuros, irão participar do processo. A Figura 3 mostra o resultado da aplicação das Equações 11 e 12. Nem sempre as mesmas áreas são escolhidas nas imagens de bandas diferentes. Isto se deve ao motivo do espalhamento atmosférico se manifestar de forma diferente nas imagens, pois a sua intensidade depende do comprimento de onda que está sendo considerado. Menores comprimentos de onda provocam maiores áreas escuras e, os maiores mais áreas claras.

$$b_i^{\max} = b_i(b_i \geq mx b_i) \quad (11) \quad b_i^{\min} = b_i(b_i \leq mnb_i) \quad (12)$$

onde: $b_i(b_i \leq mnb_i)$ são todos os pixels da banda b_i que têm valor de brilho inferior a mnb_i e; $b_i(b_i \geq mx b_i)$ são todos os pixels da banda b_i que têm valor de brilho superior a $mx b_i$.

Por fim, a Equação 13 promove a correção radiométrica desejada. A aplicação da função f , Equação 3, aumenta a amplitude do histograma melhorando o contraste entre as feições. O termo $1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j^{\max}$ é um resultado quantitativo da pergunta: se a cor das nuvens é o resultado do espalhamento não-seletivo, por que elas não são brancas? Se 1 é o branco total então, quanto

está faltando para elas serem brancas? (em função da média do valor de brilho dos pontos mais claros). Este valor é a radiância que foi perdida nos processos de absorção da interação das ondas eletromagnéticas refletidas dos alvos com as partículas em suspensão na atmosfera e, portanto devem ser adicionados em suas respectivas bandas. O termo $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_i^{\min}$ considera o quanto deve ser subtraído, na média, para os pontos mais escuros de uma banda serem absolutamente negros (valor de brilho zero). Este valor subtraído se refere, na média, quanto foi adicionado de brilho em cada banda pelo espalhamento atmosférico de Rayleigh.

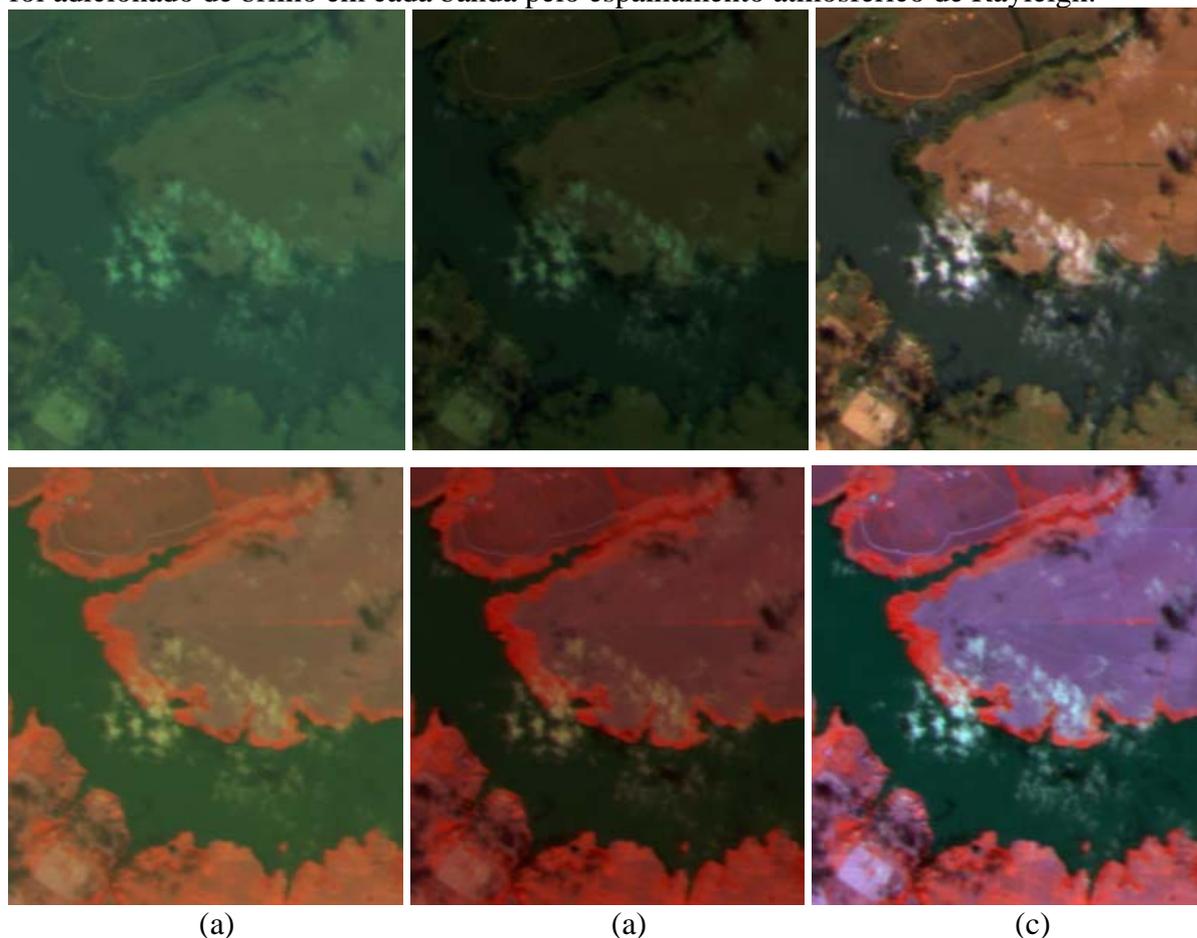


Figura 4. Correção radiométrica – Imagens CBERS. (a) Imagens originais RGB–321 e CIR–423. (b) Correção radiométrica DOS. (c) Correção radiométrica proposta.

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados da correção radiométrica proposta neste trabalho para imagens das bandas 1, 2, 3 e 4 dos satélites CBERS e Landsat7 ETM. Os resultados da Figura 4 podem ser comparados com o resultado obtido pela aplicação do método DOS – *Dark Objects Extraction*.

$$B_i^{cor} = 255 f \left(b_i + \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_i^{\max} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_i^{\min} \right) \right) \quad (13)$$

4. Considerações Finais

O método de correção radiométrico apresentado considera tanto o efeito aditivo do espalhamento atmosférico de Rayleigh como o efeito subtrativo da absorção. Este método, para funcionar corretamente necessita de pontos escuros (sombras de nuvens ou relevo) para minimizar o efeito aditivo e de pontos claros (nuvens ou solos de altíssima reflectância) para

minimizar o efeito subtrativo da absorção. Os resultados obtidos apresentam qualidade superior ao promovido pelo DOS. Foram usadas imagens CBERS e Landsat7 ETM nos testes, apresentando constância nos padrões dos resultados.

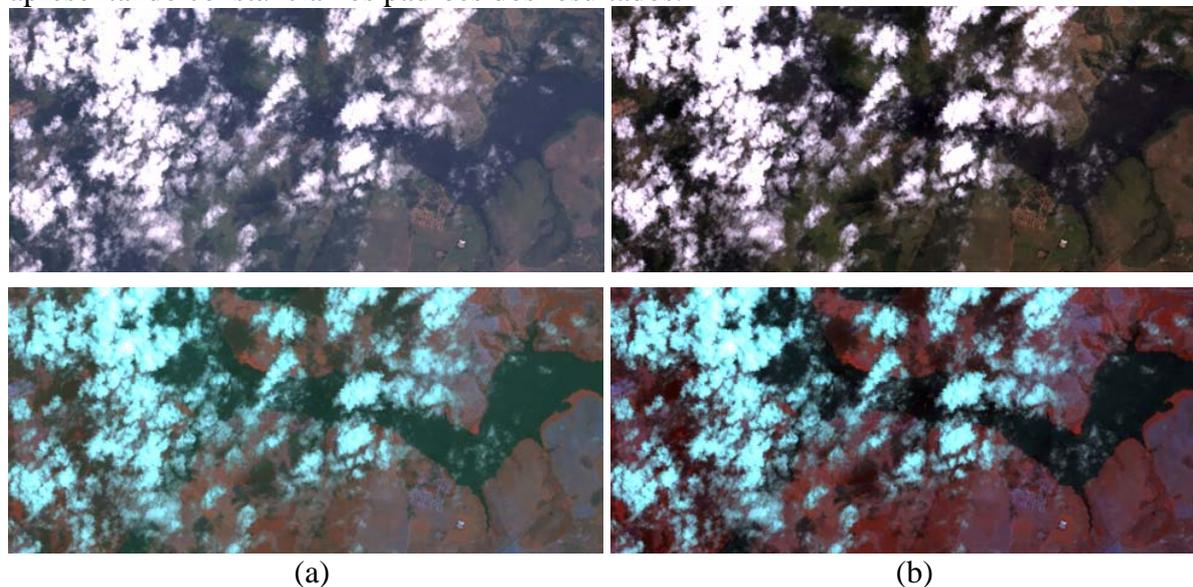


Figura 4. Correção radiométrica – Imagens Landsat7 ETM. (a) Imagens originais RGB–321 e CIR–423. (b) Correção radiométrica proposta.

Referências

- Chavez, P. Jr. Image-based atmospheric corrections — revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 62, p. 1025–1036, 1996.
- Gomes, J. e Velho, L. **Computação gráfica: imagem**. Ed. IMPA/SBM, Rio de Janeiro, 1994, 421 p.
- Jensen, J. R. **Remote sensing of the environment – an Earth resource perspective**. New Jersey, Prentice Hall, 2000. 544p.
- Kaufman, Y. J. and Sendra, C. Automatic atmospheric correction. *International Journal of Remote Sensing*, v. 9, p. 1357–1381, 1998.
- Kaufman, Y. J., Didier Tamré, D., Dubovik, O., Karnieli, A. and Remer, L. A. Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground-based remote sensing. *Geophysical Research Letters*, v. 28, n. 8, p.1479-1482, 2001.
- Kukko, A. Sampling of bidirectional reflectance from multiangular high resolution airborne imagery. In: XXth International Society Photogrammetric and Remote Sensing 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** p. 210 – 215.
- Liang, S., Fang, H. and Chen, M. Atmospheric correction of Landsat ETM+ Land surface imagery—part I: methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 11, p. 2490–2498, 2001.
- Polidorio, A. M., Flores, F. C., Franco, C., Imai, N. N. e Tommaselli, A. M. G. Detecção automática de sombras e nuvens em imagens CBERS e Landsat 7 ETM. 2005. Artigo submetido ao XII SBSR/2005.
- Polidorio, A. M., Imai, N. N. e Tommaselli, A. M. G. Índice indicador de corpos d’água para imagens multiespectrais. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 9, 2004. Recife. **Anais...** Disponível em CD-ROM não paginado.
- Polidorio, A. M., Flores, F. C., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G. and Franco, C. Automatic shadow segmentation in aerial color images. Proceedings of the IEEE XVIth Brazilian Symposium on computer graphics and image processing, 12 – 15 October, São Carlos, Brazil, 2003. **Proceedings...** p. 270 – 277.
- Richter, R. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 1201–1214, 1996.
- Tanre, D. and Legrand, M. On the satellite retrieval of Saharan dust optical thickness over land: two different approaches. *Journal of Geophysics Research*, v. 96, p. 5221–5227, 1991.
- Zullo, J.; X. F. Gu, R. Lamparelli, G. Guyot, P. Bezerra, 1996. Pré-processamentos das imagens de satélites. CIG – Caderno de Informações Georeferenciadas, 1(1), URL: <http://www.cpa.unicamp.br/revista/cigv1n1a7.html> (last day accessed 10 September 2004).