

DETECÇÃO E DISCRIMINAÇÃO DE SOMBRAS, NUVENS E CORPOS D'ÁGUA EM IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Detection and Discrimination of Shades, Clouds and Waterbodies in Remote Sensing Images

Airton Marco Polidório¹
Nilton Nobuhiro Imai²
Antonio Maria Garcia Tommaselli²
Franklin César Flores¹

¹**Universidade Estadual de Maringá – UEM**
Departamento de Informática
Av. Colombo, 5790 - UEM - Bloco C56 - CEP: 87020-900
ampolido@din.uem.br
fcflores@din.uem.br

²**Universidade Estadual Paulista – UNESP**
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente, SP
nnimai@fct.unesp.br,
tomaseli@fct.unesp.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma técnica para segmentação de corpos d'água, nuvens e áreas afetadas por sombras presentes em imagens multiespectrais adquiridas pelos satélites CBERS e Landsat. Essa técnica é baseada somente nos dados espectrais e de cor das feições imageadas. Foram realizados vários experimentos usando imagens complexas contendo corpos d'água, nuvens, sombras, solo exposto e variados tipos de vegetação. Operações simples de imagens são aplicadas para realçar as feições de interesse. Esse realce é necessário para promover um nível de segurança maior nas operações de segmentação das feições e é feito usando tanto os padrões da resposta radiométrica como a natureza da cor dessas feições. Para auxiliar o processo de discriminação dessas feições, dois índices indicativos são usados: NDVI para indicar a presença de vegetação e WWI para indicar a presença de água. Para imagens CBERS é necessário fazer um ajuste radiométrico nas imagens para se alcançar resultados mais adequados. Para realizar esse ajuste radiométrico foi proposto e avaliado um procedimento automático que permite recuperar informações sobre os atributos de cor das feições que foram degenerados pela ação dos efeitos atmosféricos (absorção e espalhamento).

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Realce de Feições, Extração de Feições, Efeitos Atmosféricos.

ABSTRACT

This paper proposes an automatic technique for water bodies; shadow and cloud segmentation applied to imagery acquired by CBERS and Landsat satellites. The technique is based on spectral and color data. Experiments were accomplished using complex landscape images containing water bodies, clouds, shadows, exposed soil and varied vegetation. Straightforward operations are applied to enhance the features of interest, in order to improve the segmentation results with robustness. The radiometric response pattern of each feature in particular, as well its colors nature, are used to accomplish this enhance. To improve the discrimination process of those features, two features indexes was used: NDVI to indicate the vegetation presence and WWI to indicate the water presence. For CBERS images were necessary the application of an automatic radiometric adjustment process in order to achieve appropriate results. To accomplish that radiometric adjustment was proposed and evaluated a procedure that allows recovering color attributes information of the features that was degenerated by atmospheric effects action (absorption and scattering).

Keywords: Remote Sensing, Feature Enhancement, Feature Extraction, Atmospheric Effects.

1. INTRODUÇÃO

Sombras e nuvens causam sérias interferências em imagens da superfície do terreno degradando a resposta radiométrica ou provocando a completa oclusão de feições. Em geral, para imagens de satélite, as nuvens provocam muita redução na área útil da imagem, tanto pela oclusão como pela sombra projetada sobre o terreno. As regiões afetadas por sombras têm um comportamento espectral muito próximo daquele apresentado por corpos d'água, dificultando a discriminação entre esses dois elementos.

Este trabalho apresenta uma técnica baseada apenas em atributos radiométricos e de cor para detectar e discriminar nuvens, sombras e corpos d'água, em imagens das bandas 1, 2, 3 e 4 dos satélites CBERS e Landsat7 ETM. A detecção e a discriminação são feitas com o auxílio de índices indicadores de feições, mais precisamente o NDVI—*Normalized Difference Vegetation Index*, (JENSEN, 2000) e o WWI—*Weighted Water Index*, (POLIDORIO *et al.*, 2004), e informações de atributos de cor desses alvos (mais precisamente valores de intensidade e saturação de cor).

2. DETECÇÃO DE NUVENS, SOMBRAS E CORPOS D'ÁGUA

2.1 Nuvens e Sombras

(SONG e CIVCO, 2002) usaram imagens das bandas 1 e 4 do Landsat TM adquiridas em duas datas diferentes d_1 e d_2 para detectar e reduzir áreas cobertas por nuvens e sombras. Primeiro, fizeram um ajuste radiométrico entre as imagens temporais para equilibrar o brilho e o contraste dos valores DN (*Digital Number*) entre essas imagens com base na variação dos valores de brilho e no conhecimento prévio do Modelo Digital do Terreno, por considerarem que a variação de relevo tem influência significativa na resposta radiométrica observada. Aplicaram uma série de valores de limiar (constantes) diretamente sobre os valores de brilhos registrados nas bandas 1 e 4, objetivando a segmentação das regiões sombreadas e sobrepostas por nuvens. Os resultados dessa pré-segmentação são confirmados através de análises das diferenças altamente discrepantes entre as imagens temporais.

As principais desvantagens desse método são: 1) o excesso de valores constantes fixados (valores de limiar) aplicados diretamente sobre os valores de brilhos registrados nas bandas da imagem, supondo que o comportamento espectral dos alvos seja independente das condições atmosféricas ou época do ano de aquisição das imagens e; 2) a necessidade de um Modelo Digital do Terreno para realizar o ajuste radiométrico.

(POLIDORIO *et al.*, 2003) associaram regiões de sombra com os componentes S e I do sistema de cor HSI para imagens RGB (composição colorida 3-2-1 para imagens CBERS e Landsat). Sombras são regiões de baixa intensidade luminosa (I), causada pelo blo-

queio da incidência de luz direta e, com alta saturação (S) causada pelo espalhamento atmosférico de Rayleigh (HULST, 1957).

$$SDW = \begin{cases} 1, & \text{se } I - S \leq k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Na Equação 1, a diferença $I - S$ produz valores menores ou iguais a zero para aquelas regiões afetadas por sombras (ou candidatas). A detecção final das áreas sombreadas é feita mediante aplicação de valor de limiar (k) sobre as regiões candidatas. O valor de k depende da altitude do sensor, das condições atmosféricas e das características de imageamento do sensor (ex. uso de filtros, sensor baseado em filme fotogramétrico ou digital, etc.). Os valores possíveis para k pertencem ao intervalo $[-1, 1]$, quando forem usados valores de I e S pertencentes ao intervalo $[0, 1]$ na Equação 1.

A principal vantagem desse método é que ele está apoiado no comportamento radiométrico da sombra. A desvantagem está em estimar o valor paramétrico k , o qual depende da altitude da plataforma e das características de imageamento do sensor. Essa técnica frequentemente confunde corpos d'água e regiões sombreadas.

(DARE, 2005) propôs uma técnica para detectar e reduzir os efeitos negativos das áreas sombreadas usando imagens pancromáticas de alta resolução espacial ($\approx 1\text{m}$) e radiométrica (11 bits) dos satélites Ikonos e Quickbird de áreas urbanas de alta densidade. A proposta está baseada na expectativa do histograma da imagem de uma área urbana densa ser bi-modal, por considerar que para estas imagens, praticamente, só existem edificações e sombras e que dos 2048 tons de cinza possíveis nessas imagens, as sombras ocupam o intervalo $[0, 255]$ permitindo simplificar a imagem original eliminando todos os pixels com valor de brilho maior que 255.

Esse método confunde corpos d'água com regiões sombreadas. Entretanto, o autor propôs uma estratégia para amenizar essa confusão baseando-se na variação dos valores radiométricos dos pixels de uma região conexa. A variabilidade de uma região de sombra é maior que a variabilidade dos pixels que compõem um corpo d'água. Essa estratégia falha quando corpos d'água e regiões sombreadas estiverem conectados entre si, pois eles ficam fazendo parte de uma mesma região conexa. Uma questão que não é esclarecida pelo autor é como a decisão de haver ou não corpos d'água na imagem é feita, uma vez que sempre existirão áreas sombreadas em imagens de uma região urbana densa. A vantagem desse método está na proposta de discriminação entre sombras e água. As desvantagens são: 1) a aplicabilidade somente em imagens de regiões de alta densidade urbana e; 2) uso particular em imagens com alta resolução radiométrica e espacial.

2.2 Corpos D'água

O uso do Sensoriamento Remoto em apoio aos estudos hidrológicos já se tornou comum, como, por

exemplo, o uso de imagens para mapear, delinear e estimar profundidade de corpos d'água; verificar e controlar a qualidade da água; mensurar a turgidez e a concentração de sedimentos em suspensão, detectar e classificar plantas aquáticas, com base nos valores de reflectância da água extraídos dessas imagens.

(KUMAR *et al.*, 1997) utilizaram imagens da banda 4 (770–860nm) do sensor LISS-2, transportado pelo satélite indiano IRS-P2, para mensurar a profundidade de rios. (SCHNEIDER *et al.*, 1996) usaram imagens da banda termal do Landsat-5 TM (10400–12500nm) para mensurar, com elevada precisão, a temperatura da superfície de lagos. (WILDALLEN *et al.*, 1997) descreveram uma técnica experimental, realizada em laboratório, para classificar e mensurar a concentração de clorofila-A em águas turvas, baseando-se no cálculo da razão simples entre valores de reflectâncias observados especificamente em 440nm e 560nm.

O uso de imagens de plataformas orbitais como recurso de apoio ao estudo de corpos d'água faz com que novos problemas sejam adicionados ao problema original, por exemplo: (1) perda de informações devido à baixa resolução espacial da imagem (30 m para imagens Landsat) e, a limitação da resolução espectral do sensor usado no imageamento (4 bandas espectrais para o CBERS); (2) interferências radiométricas causadas pelos efeitos atmosféricos, os quais provocam alterações na resposta radiométrica das feições; (3) detecção e extração de corpos d'água presentes na imagem e; (4) extração das informações desejadas dos corpos d'água extraídos.

As vantagens do uso de imagens de sensores orbitais para realização de estudos de corpos d'água são: (1) diminuição dos custos envolvidos; (2) rapidez e constância de acesso aos dados; (3) possibilita uma cobertura espacial mais ampla permitindo analisar mais facilmente os relacionamentos de um corpo d'água com outros elementos presentes ou ausentes na região estudada.

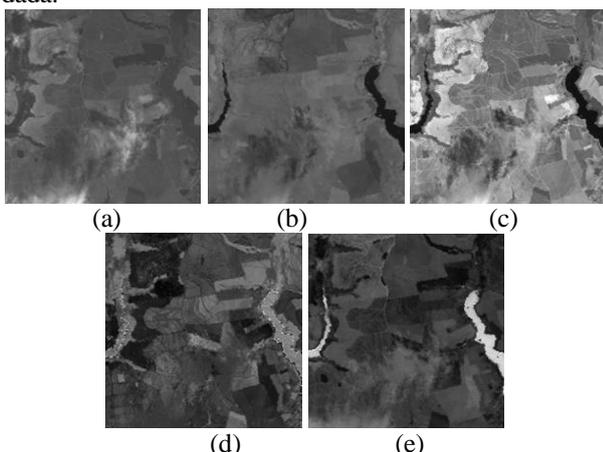


Fig. 1 - Imagens LandSat 7/ETM – Resultados obtidos pelos índices NDWI e WWI. (a) Composição colorida R3G2B1 (apresentada em tons de cinza). (b) Banda 4. (c) Banda 5. (d) Imagem NDWI. (e) Imagem WWI (proposto neste trabalho).

Note que o uso de imagens adquiridas com alta resolução espectral simplifica o trabalho de segmentação de corpos d'água. Pode-se, por exemplo, usar a razão simples entre valores de reflectância das bandas espectrais correspondentes a 900 e 970nm, chamada *Water Index* (WI) proposta por (PEÑUELAS, *et al.* 1997) para realçar corpos d'água ou, a diferença normalizada, *Normalized Difference Water Index* (NDWI), proposta por (GAO, 1996), o qual usa valores de reflectância das bandas espectrais correspondentes a 860 e 1240nm para computar um índice indicador de corpos d'água. As imagens das bandas 4 e 5 adquiridas pelo Landsat 7/ETM podem ser usadas no cálculo do NDWI (GAO, 1996). A Figura 1 mostra o resultado dessa aplicação (veja também Figura 4).

A Figura 1d mostra que o NDWI proposto por Gao promove um realce tanto nos corpos d'água como nas regiões de solo exposto úmido, dificultando a discriminação entre essas duas feições. As Figuras 1e e 4c mostram a qualidade do resultado produzido pelo WWI (*Weighted Water Index*) proposto como parte deste trabalho (Seção 3).

Regiões de solo exposto seco, em geral, têm altos valores de reflectâncias em toda a região do espectro eletromagnético visível, com uma gama de respostas dependente de sua constituição química e umidade. Na região do infravermelho-próximo (800-1200nm) a vegetação bem como o solo exposto seco e rochas apresentam valores altos de reflectância. Porém, para regiões do espectro eletromagnético maiores que 1400nm, infravermelho-médio (IVM), as distinções entre solo seco e vegetação são mais acentuadas. Enquanto a reflectância do solo seco aumenta, a da vegetação diminui e da água é praticamente zero (Figura 2).

A água tem a característica de refletir uma parcela muito pequena da radiação eletromagnética incidente, pois a maior parte dessa energia radiante incidente é transmitida, absorvida e dispersada pela água. O espectro da radiação refletida pela água ocupa, em geral, a faixa de comprimentos de onda entre 400-900nm. Corpos d'água limpa são mais evidentes por apresentarem baixa reflectância, principalmente nas faixas espectrais iguais ou superiores ao infravermelho-próximo (IVP) (Figura 2). A presença de sedimentos de solo na água provoca uma resposta espectral que se aproxima da resposta emitida pelo solo úmido.

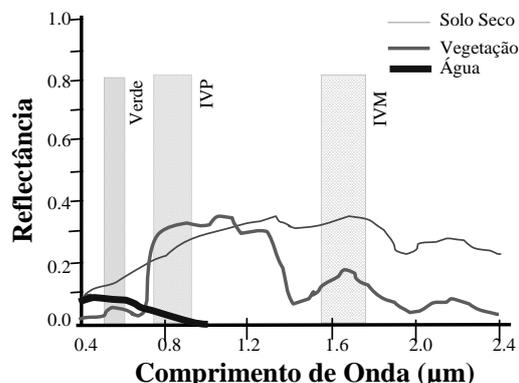


Fig. 2 - Comportamento espectral: solo seco, vegetação e corpos d'água limpos. (Adaptado de CENTENO (2004)).

Interações da energia luminosa incidente com a água são complexas e dependem de uma série de fatores como: a reflexão especular (rugosidade da superfície); tipo e concentração de materiais em suspensão (clorofila, argilas e nutrientes); tipo e constituição do fundo do corpo d'água; e variáveis climatológicas que alteram seu comportamento espectral (CHUVIECO, 1990) e (CENTENO, 2004).

2.3 Ajuste Radiométrico – Atenuação do Espalhamento e da Absorção Atmosférica

A remoção de interferências em imagens de satélites provocadas pelo espalhamento e pela absorção da radiação eletromagnética constitui um dos problemas relevantes 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 apenas redistribuídos em todas as direções sem haver mudança no comprimento da onda eletromagnética. Então, nesse caso, a energia que chega ao sensor é uma parcela da radiação que sofreu alteração de trajetória na atmosfera, adicionada à energia refletida pelos alvos da superfície do terreno. Esse efeito aditivo torna a imagem nebulosa (ver Figura 6a).

A absorção é outro mecanismo de interação da radiação eletromagnética com a atmosfera. Em contraste com o espalhamento, esse é um fenômeno causado, principalmente, por moléculas de gases que absorvem energia de vários comprimentos de onda. O ozônio absorve radiação ultravioleta. O dióxido de carbono absorve muita energia da porção do infravermelho-distante. O vapor d'água afeta ondas eletromagnéticas de 1µm até 22µm. A poluição e outros agentes químicos em suspensão na atmosfera também promovem a absorção (KAUFMAN *et al.*, 2001).

3. FUNDAMENTOS DO MÉTODO PROPOSTO

Os fundamentos do método proposto neste trabalho estão baseados na exploração das diferenças das respostas radiométricas e das diferenças dos atributos de cor das nuvens, corpos d'água e das sombras, quando comparadas entre elas próprias e com esses mesmos atributos de outras feições.

(POLIDORIO *et al.*, 2003) mostraram que re-

giões afetadas por sombras realçam o efeito do espalhamento atmosférico de *Rayleigh*, no qual as ondas eletromagnéticas de menor comprimento, em relação ao visível, (azul e violeta) são desviadas, mais intensamente, saturando a região sombreada com essas cores. Por outro lado, as nuvens são compostas de partículas maiores, as quais provocam o espalhamento atmosférico *não-seletivo* o qual é caracterizado por desviar indiscriminadamente todos os comprimentos de onda do espectro visível e, o efeito aditivo de todos os comprimentos de onda do espectro visível desviados produz luz branca determinando, desta maneira, a cor de aparência das nuvens (JENSEN, 2000).

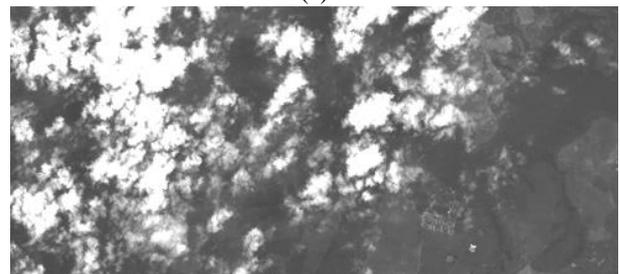
3.1 Sistema de Cor HSI

Os sistemas de cor (como RGB, HSI, HSV, etc) são modelos matemáticos concebidos para representação da cor (GOMES & VELHO, 1994).

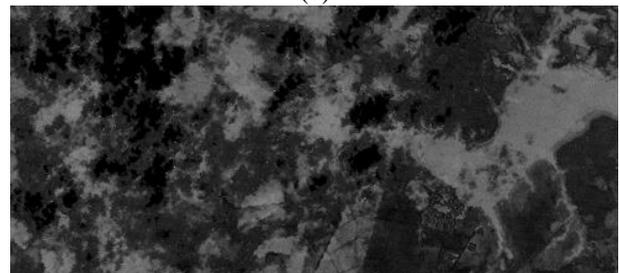
O sistema de cor HSI representa uma determinada cor através de três atributos: *H* (*hue* ou matiz), valor que representa uma cor específica. *S* (*saturation*), valor que representa quanto que uma determinada cor é saturada, ou pura, em relação ao branco (Figura 3c). Por fim, *I* (*intensity*), valor que representa o brilho de uma determinada cor. Quanto maior for a luminosidade de uma cor, maior a sua intensidade (Figura 3b). Neste trabalho, a transformação do sistema de cor RGB para HSI é feita sobre a composição colorida R3G2B1 – Figura 3a e 6a.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 - Atributos de cor do sistema HSI. (a) Imagem Original Landsat 7/ETM. Composição colorida

R3G2B1 (apresentada em tons de cinza. Veja imagem em cores na Figura 5a). (b) Intensidade (I). (c) Saturação (S).

Faz-se a seguinte inferência sobre os componentes do sistema de cor HSI e o problema de detecção de nuvens, sombras e corpos d'água. Nuvens promovem o espalhamento *não-seletivo*, ou seja, a luz proveniente dessa feição está próxima do branco, determinando os atributos de cor: 1) alta intensidade e; 2) baixa saturação. Por outro lado, regiões sombreadas são: 3) escuras, devido à oclusão da luz incidente e; 4) saturadas devido ao espalhamento atmosférico de *Rayleigh*.

Corpos d'água e sombras apresentam um comportamento muito parecido na análise dos atributos de intensidade e saturação devido ao processo interação da energia incidente com a água. Assim, como no caso das regiões sombreadas, o espalhamento atmosférico passa a ter grande influência no baixo valor de brilho observado sobre essas feições ao torná-las altamente saturadas, principalmente, com a cor azul. As Figuras 3b e 3c mostram o comportamento dos atributos de cor (intensidade e saturação) para nuvens, sombras e corpos d'água.

A presença de diferentes feições torna as imagens complexas e a tarefa de detecção e discriminação de nuvens, sombras e corpos d'água usando somente a saturação e a intensidade não pode ser realizada com fidelidade. São necessários outros atributos, os quais devem responder com padrões estáveis independentemente da variabilidade da resposta espectral, principalmente para discriminar sombras e corpos d'água. Esses novos atributos são extraídos dos índices indicadores de feições NDVI e WWI.

3.2 NDVI e WWI

O índice NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*, (JENSEN, 2002), é um índice discriminante para vegetação. Este índice é calculado usando dados espectrais observado nas imagens das bandas espectrais correspondentes ao vermelho (R) e infravermelho-próximo (NIR).

A aplicação da Equação 2 é feita diretamente sobre cada pixel, com os valores de resposta espectral na banda relacionada com a cor vermelha e com o infravermelho próximo e produz valores pertencentes ao intervalo $[-1, 1]$. Quanto mais próximo de 1, maior é a certeza de estar se tratando de um pixel de vegetação (Figura 4b).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

O índice WWI – *Weighted Water Index*, (POLIDORIO *et al.*, 2004), Equação 3, estabelece um índice discriminante para corpos d'água. O seu cálculo é similar ao do NDVI, mas utiliza valores de brilho das imagens das bandas relativas ao infravermelho-próximo (NIR) e verde (G).

Um corpo d'água contendo água limpa, ao ser imageado, supondo não haver interferência na resposta radiométrica provocada pelo seu fundo, tem valores de

brilho, registrados pelo sensor infravermelho, próximo de zero. Os sensores da banda G registram valores de brilho mais elevados (Figura 2) então, neste caso, supõe-se $G \pm NIR \cong G$. Entretanto, na prática, baixos valores de brilho são registrados na banda NIR devido à presença de materiais em suspensão na água, bem como pelas características do fundo dos corpos d'água.

Ao observar os valores de brilho registrados sobre corpos d'água, constatou-se que a banda G registra valores de brilho 4 vezes maiores que aqueles registrados na banda NIR . Assim, a expressão $G \cong 4NIR$ estabelece uma relação de equivalência empírica entre os valores de brilho observados nessas duas bandas para corpos d'água.

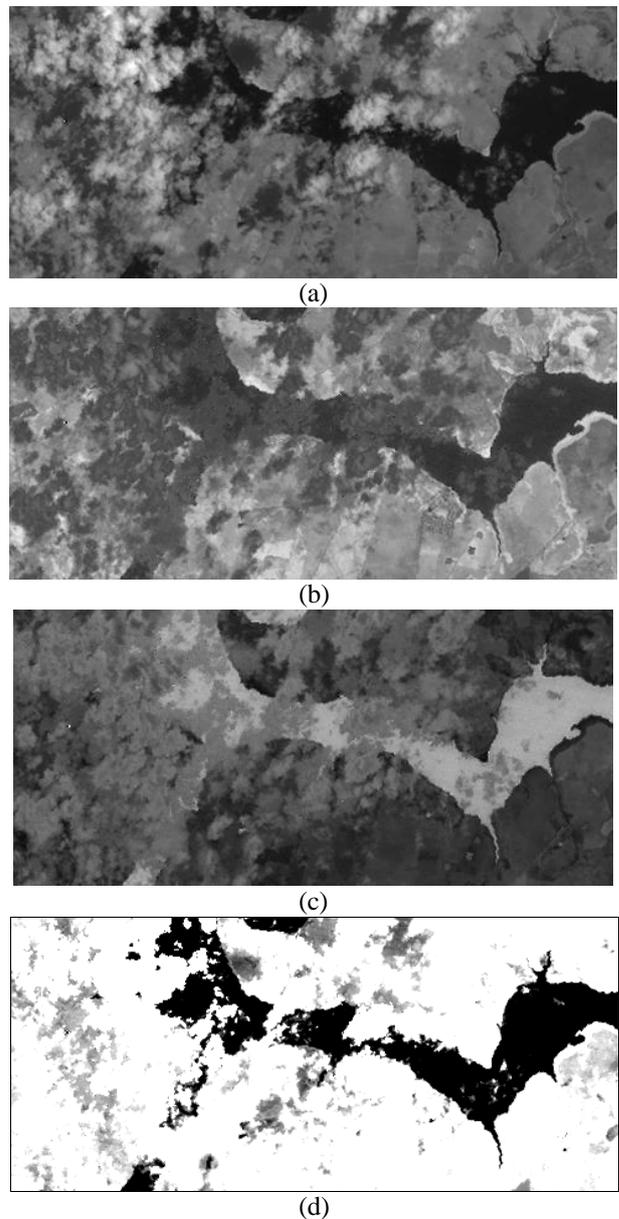


Fig. 4 - Índices de discriminação para vegetação e para corpos d'água. (a) Imagem original NIR Landsat 7/ETM (banda 4). (b) $255f(NDVI)$. (c) $255f(WWI)$. (d) Diferentes intensidades de realce para regiões sombreadas,

corpos d'água e outras feições.

Como se espera que a banda *NIR* registre valores de brilho superior para vegetação e solo exposto, comparados com os respectivos valores registrados na banda *G*, o peso 4 aplicado à banda *NIR*, o termo $G - 4NIR$ faz com que sejam produzidos valores em torno de zero para corpos d'água e valores negativos para feições que têm resposta espectral superior (como solo exposto e vegetação). Desta forma o *WWI* produz valores que oscilam em torno de zero para corpos d'água e -1 para outras feições (Figuras 1e e 4c).

$$WWI = \frac{G - 4NIR}{G + 4NIR} \quad (3)$$

3.3 Normalização dos Dados e Nomenclatura

Os índices *NDVI* e o *WWI* produzem valores no intervalo $[-1, 1]$. Neste trabalho é necessário normalizar esses valores para o intervalo $[0, 1]$, Equação 4, para que os mesmos possam ser tratados como imagens. As Figuras 4b e 4c mostram os resultados dessa normalização, em 256 níveis de cinza, nas quais pode-se observar a qualidade do realce de áreas cobertas por vegetação e corpos d'água produzidos pelo cômputo desses dois índices respectivamente.

$$f(X) = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (4)$$

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

Neste trabalho é utilizada a seguinte nomenclatura: as letras minúsculas b, g, r, nir, i e s são utilizadas para designar valores de brilho e atributos de cor contidos no intervalo $[0, 1]$ e, as letras maiúsculas B, G, R, NIR, I , e S para designá-los no intervalo $[0, 255]$.

Os valores de brilho das imagens R, G, B, NIR, I e S devem ser interpolados do intervalo $[0, 255]$ para o intervalo $[0, 1]$.

4. MÉTODO PROPOSTO

O método para detectar e discriminar as feições de interesse está dividido em duas partes. A primeira parte estabelece o método de detecção (Seção 4.1) que detecta e discrimina as feições de interesse. A segunda parte descreve a proposta de um método de ajuste radiométrico (Seção 4.2) que minimiza os efeitos causados pelo espalhamento e pela absorção atmosférica. O método de ajuste radiométrico deve ser aplicado sobre imagens que sofreram um alto grau de degradação devido à interferência dos efeitos atmosféricos, antes de submetê-las ao processo descrito pelo método geral.

Para imagens muito degradadas pelos efeitos atmosféricos (Figura 6a), a qualidade do resultado obtido pela aplicação do método geral não é satisfatória. Nestes casos é necessário estimar os valores dos atributos de cor das feições em um referencial no qual os

efeitos atmosféricos deixem de prejudicar a aplicação do método geral. Esta estimativa é feita com a aplicação do método de ajuste radiométrico proposto neste trabalho.

Imagens adquiridas sob melhores condições atmosféricas não precisam, necessariamente, passar pelo processo de ajuste radiométrico. Entretanto, testes mostraram que aplicar ou não este ajuste, para este caso, interfere muito pouco na qualidade do resultado final.

Os processos de detecção de feições e de ajuste radiométrico da imagem estão interligados. Primeiro aplica-se o método de detecção. Uma análise estatística simples sobre os resultados preliminares produzidos pela detecção permite coletar dados específicos capazes de subsidiar o processo de ajuste radiométrico de cada banda específica da imagem. Uma vez efetuado o ajuste radiométrico, a nova imagem resultante deste processo é submetida, novamente, ao método de detecção. Esta nova imagem, por apresentar padrões de cores mais bem definidos, permite que o método de detecção estabeleça resultados mais precisos.

4.1 Método de Detecção

O método para detectar e discriminar sombras, nuvens e corpos d'água, apresentado a seguir, deve ser aplicado diretamente sobre as bandas da imagem original. Os resultados preliminares desta aplicação permitirão estabelecer parâmetros para realizar o ajuste radiométrico individual de cada banda da imagem (Seção 4.2). Após a aplicação do ajuste radiométrico, as bandas da nova imagem gerada devem ser novamente processadas por este mesmo método de detecção. Testes mostraram que não é necessário recalcular os valores dos índices *NDVI* e *WWI* após este ajuste.

Lembrando que os valores de brilho associados com as bandas da imagem usados a seguir devem estar normalizados para o intervalo $[0, 1]$, como descrito na seção 3.3.

As equações usadas pelo método de detecção estão divididas em duas classes: a classe de realce e a classe de detecção. As equações de realce usam operações aritméticas simples para realçar especificamente uma das feições desejada. Este realce facilita a detecção de cada uma destas feições.

A Equação 5 realça a presença de nuvens e a Equação 7 realça as presenças de corpos d'água e sombras. Estes realces específicos permitem estabelecer, com muita segurança, valores de limiar (Equações 6, 8 e 9) capazes de realizar a discriminação das feições desejadas.

$$cl = 2i - s - \left(1 - nir + \frac{1-b}{2}\right) \quad (5)$$

$$Nuvens = \begin{cases} 1, & \text{se } cl > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

$$sw = (i + nir + Nuvens + 2f(NDVI)) - (s + 2f(WWI)) \quad (7)$$

$$Agua = \begin{cases} 1, & \text{se } sw < 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Sombras} = \text{SDW} - (\text{Água} + \text{Nuvens}) \quad (9)$$

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

A detecção de presença de nuvens, ou feições de alta radiância, é feita pela Equação 5. Essa equação explora a alta intensidade (i) e a baixa saturação (s) dos atributos de cor das nuvens, em contraste com outras feições que possuem baixa intensidade e alta saturação como: vegetação, corpos d'água e sombras. O termo $(2i - s)$ realça os pixels de alta intensidade (nuvens) em detrimento daqueles que têm saturação elevada (vegetação, corpos d'água, etc). A idéia básica desta equação consiste em associar pixels com valores de brilho elevados com valores positivos e aqueles com baixos valores de brilho com valores negativos. Nesta operação, devido à saturação elevada e baixa intensidade, pixels correspondentes a corpos d'água e sombras são associados com valores negativos e, aqueles correspondentes a solo exposto e vegetação têm seus respectivos pixels associados com valores próximos ao valor zero. O outro termo dessa equação, que envolve os complementos da banda infravermelha ($1 - nir$) e da banda azul ($1 - b$), tem maior influência sobre valores associados com corpos d'água, vegetação, sombras e solo exposto, completando a associação dos pixels dessas feições com valores negativos. A discriminação de nuvens é feita pela Equação 6, assumindo que todos os valores positivos produzidos pela Equação 5 estão associados com pixels de nuvens (Figura 5b).

Sombras e corpos d'água têm baixa intensidade e alta saturação. Entretanto, pode ser observado nas Figuras 4b e 4c que os índices NDVI e WWI conseguem estabelecer um contraste razoável entre corpos d'água e sombras – o NDVI produz valores de brilho maiores para sombras e o WWI produz valores maiores para corpos d'água. Assim, o uso desses dois índices permite realçar e discriminar entre corpos d'água e sombras.

A Equação 7 promove o realce necessário para distinguir entre corpos d'água e sombras, removendo também a interferência das feições que não interessam. De forma diferente da estratégia adotada para realçar as nuvens, a Equação 7 produz baixos valores positivos para sombras e negativos para corpos d'água. Para as demais feições são produzidos altos valores positivos.

A soma de valores elevados registrados na banda *nir* para vegetação e solo exposto com valores elevados produzidos pelo NDVI para vegetação, além dos valores registrados no componente intensidade (i), em contraposição aos baixos e moderados valores WWI e de saturação (s) associados com essas mesmas feições, garantem que a Equação 7 produzirá: valores positivos elevados para vegetação, solo exposto e outras feições de alta reflectância; baixos valores positivos para regiões sombreadas e; valores negativos para corpos d'água.

Ao serem desprezados os valores positivos elevados (>1) produzidos pela Equação 7, sobram somente os pixels relativos às feições escuras com alta saturação (corpos d'água e sombras). Observe, ainda,

que a Equação 7 promoveu realces diferentes para regiões sombreadas e corpos d'água. A Figura 4d mostra o resultado desse realce, apresentando corpos d'água numa tonalidade escura, regiões de sombras num cinza claro e, outras feições em branco. A discriminação de regiões de sombras e corpos d'água é feita com a aplicação das Equações 8 e 9. A Equação 8 discrimina corpos d'água e a 9 regiões sombreadas (Figura 5b). Observe na Figura 5b que pixels de transição entre água e vegetação ou entre água e nuvem são, eventualmente, confundidos como sendo sombras. Isto se deve à mistura da resposta espectral que há na região limítrofe entre essas feições provocada pela baixa resolução espacial dos sensores.

4.2 Ajuste Radiométrico

A aplicação direta do método de detecção em algumas imagens pode não produzir resultados satisfatórios. Nestes casos, para alcançar resultados mais adequados é necessário submeter cada banda da imagem ao processo de ajuste radiométrico. Somente após a realização desse ajuste é que o método de realce e detecção descrito na Seção 4.1 pode ser aplicado. Como exemplo, as Figuras 6a e 6b mostram composições coloridas de imagens multiespectrais adquiridas pelas câmaras CCD do satélite CBERS. O método de detecção foi aplicado diretamente sobre as bandas da imagem original, o qual produziu um resultado pobre (Figura 6c).

O ajuste radiométrico proposto neste trabalho procura atenuar os efeitos atmosféricos da absorção e do espalhamento atmosférico de *Rayleigh*. Este ajuste está baseado na exploração das respostas radiométricas e de atributos de cor das nuvens e das sombras. (POLIDORIO *et al.*, 2003) mostraram que regiões afetadas por sombras realçam o efeito do espalhamento atmosférico de *Rayleigh*. Por outro lado, nuvens são compostas de partículas que promovem o espalhamento atmosférico *não-seletivo* que, ao espalhar indistintamente todos os comprimentos de onda do espectro visível, determina a cor branca das nuvens. Os conceitos desses dois efeitos atmosféricos são utilizados nas operações de ajuste radiométrico.

O método para realizar o ajuste radiométrico das imagens, proposto por (POLIDORIO *et al.*, 2005), consiste em detectar as regiões mais claras (com alta intensidade e baixa saturação) em cada banda envolvida e, as mais escuras (com baixa intensidade e alta saturação). Essas regiões, normalmente, estão associadas com nuvens e sombras, respectivamente.

Observando mais cuidadosamente a Figura 6c, verifica-se, apesar do resultado ruim, que todas as regiões de nuvens, corpos d'água e sombras estão contemplados na discriminação que foi feita.

Essa discriminação prévia permite extrair uma pequena amostra de pixels de cada banda das regiões afetadas por sombras e por nuvens. Para este propósito, basta descobrir qual é o menor valor de brilho encontrado sobre as regiões previamente discriminadas como sombras (Equação 9) e, o maior valor de brilho encontrado nas regiões discriminadas como nuvens, (Equação

6), para cada banda considerada. As Equações 10 e 11 resumem essa operação.

$$mxb_i = 0.9 \max(b_i(\text{Nuvens})) \quad (10)$$

$$mnb_i = 1.1 \min(b_i(\text{Sombras})) \quad (11)$$

onde: b_i é uma banda espectral ($i = B, G, R$ e NIR); $b_i(\text{Nuvens})$ são todos os pixels da imagem na banda b_i que foram discriminados como nuvens; $b_i(\text{Sombras})$ são todos os pixels da imagem na banda b_i que foram discriminados como sombras; **min** e **max** obtêm o valor de brilho mínimo e máximo, respectivamente. Dado o maior valor de brilho possível na banda b_i , mxb_i será 90% desse valor e; dado o menor valor de brilho possível na banda b_i , mnb_i será 110% desse valor. Dessa forma, atribui-se $\pm 10\%$ como margem de corte para realizar as amostragens de pixels a serem usados no processo de ajuste radiométrico.

As amostragens de pixels associados com cada banda b_i , necessárias para aplicar o ajuste radiométrico, são extraídas pelas Equações 12 e 13 em função dos respectivos valores mxb_i e mnb_i .

As amostragens para a classe nuvem b_i^{\max} extraída de cada banda b_i é composta pelos pixels que têm valores de brilho superiores ao valor mxb_i . Para a classe sombra as amostragens b_i^{\min} são compostas pelos pixels com valores de brilho inferiores ao valor mnb_i . Como essa operação é feita banda a banda, nem sempre os pixels escolhidos são coincidentes nas diferentes bandas. Isto se deve ao fato do espalhamento e da absorção se manifestarem de forma diferente nas bandas consideradas, uma vez que a intensidade desses fenômenos depende do intervalo de comprimento de onda que está sendo considerado.

$$b_i^{\max} = b_i(b_i \geq mxb_i) \quad (12)$$

$$b_i^{\min} = b_i(b_i \leq mnb_i) \quad (13)$$

onde: $b_i(b_i \leq mnb_i)$ são todos os pixels da banda b_i que têm valores de brilho inferiores a mnb_i e; $b_i(b_i \geq mxb_i)$ são todos os pixels da banda b_i que têm valores de brilho superiores a mxb_i .

Por fim, a Equação 14 promove o ajuste radiométrico desejado. A aplicação da função f , Equação 4, aumenta a amplitude do histograma melhorando o contraste entre as feições.

$$B_i^{cor} = f\left(b_i + \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j^{\max} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_j^{\min}\right)\right) \quad (14)$$

O termo $1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j^{\max} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_j^{\min}$ é uma resposta quantitativa

à pergunta: se a cor das nuvens é o resultado do espalhamento *não-seletivo*, por que elas não são brancas na banda b_i ? Se 1 é o branco então, quanto está faltando na banda b_i para elas serem brancas? (em função da média do valor de brilho dos pontos mais claros). A resposta a esta pergunta é o valor de brilho que foi subtraído da banda b_i pelos processos de absorção atmosférica e, portanto, deve ser adicionado aos valores originais de

brilho dos pixels da banda b_i .

O termo $\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_j^{\min}$ considera o valor médio que

deve ser subtraído para tornar os pontos mais escuros da banda b_i negros (valor de brilho zero). Esse valor se refere, na média, ao valor de brilho que foi adicionado em cada banda b_i pelo efeito do espalhamento atmosférico seletivo.

As Figuras 6d e 6e mostram as composições coloridas dos resultados do ajuste radiométrico proposto.

Após a realização desse ajuste radiométrico nas bandas envolvidas é aplicado novamente o método geral para realçar e discriminar as feições de interesse proposto neste trabalho. A Figura 6f apresenta resultados melhores que a discriminação mostrada na figura 6c devido ao realce de cor promovido pelo ajuste radiométrico proposto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método proposto foi aplicado em imagens CBERS e Landsat7 ETM e apresentou constância nos padrões dos resultados. Este método foi mais amplamente empregado em imagens CBERS adquiridas de várias regiões do território brasileiro (Amazonas, São Paulo e Paraná). Foram experimentadas imagens adquiridas em regiões cobertas por gelo e neve – região dos Andes (obviamente, com comprometimento da discriminação de nuvens).

No momento, uma extensão deste trabalho está sendo desenvolvida, visando correlacionar as nuvens detectadas com as suas respectivas sombras projetadas. Essa extensão usa o conhecimento do ângulo da elevação solar no momento da aquisição das imagens e o resultado da correlação sombra-nuvem permite eliminar falsos resultados entre nuvens e alvos de alta reflectância (neve, alguns tipos de solo, regiões urbanas, etc) e entre sombras e alvos de baixa reflectância (corpos d'água, regiões de queimadas, bordas de transição entre feições, etc).

Na presente proposta, a segmentação de nuvens falha quando nuvens pouco densas estão sobre corpos d'água, as quais são frequentemente confundidas com sombra devido à mistura espectral nuvem-água. Nuvens também são confundidas com feições de altíssima reflectância (como alguns tipos de solo exposto, neve e gelo).

Na segmentação de sombras, as transições (bordas) entre corpos d'água e vegetação e entre corpos d'água e nuvens são facilmente confundidas com sombra. Esta confusão é provocada pela mistura na resposta espectral entre os pixels limítrofes que compõem essas feições.

O método proposto neste trabalho consegue discriminar entre regiões de sombras e corpos d'água, mesmo quando esses dois elementos estão conectados entre si (Figuras 5b e 6f).

Este trabalho, além de haver apresentado uma técnica para discriminar corpos d'água, nuvens e regiões

sombreadas, também propôs o cômputo de um índice eficiente para realçar corpos d'água (WWI), o qual foi testado em imagens orbitais adquiridas pelo Ikonos, Quickbird, Landsat e CBERS e em imagens aéreas adquiridas com alta resolução espacial (20 cm) pelas câmaras fotogramétricas digitais: HRSC-AX, Ultracam_D, DMC, ADS40 e IGN. A qualidade dos resultados obtidos é equivalente à que foi apresentada neste trabalho.

Uma outra contribuição deste trabalho está na proposta do método de ajuste radiométrico de imagens, o qual considera tanto os valores de brilho subtraídos pela absorção atmosférica, como os valores de brilho adicionados pelo espalhamento atmosférico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CENTENO, J. A. S., **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Ed. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Curitiba, ., 2004, 219 p.

DARE, PAUL. Shadow analysis in high resolution satellite imagery of urban areas. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol.71, No. 2, p. 169–178, 2005.

GAO, B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**. 58, p. 257–266, 1996.

GOMES, J. & VELHO, L. **Computação gráfica: imagem**. Ed. IMPA/SBM, Rio de Janeiro, 1994, 421 p.

HULST, VAN DE. **Light Scattering by Small Particles**. John Wiley and Sons, New York, 1957.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment – an Earth resource perspective**. New Jersey, Prentice Hall, 2000, 544p.

KAUFMAN, Y. J., DIDIER TAMRÉ, D., DUBOVIK, O., KARNIELI, A. & 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.

KUMAR, K. V.; PALIT, A. & BHAN S. K. Cover bathymetric mapping in Rupnarayan-Hooghly river confluence using Indian remote sensing satellite data. **International Journal of Remote Sensing**. p. 2269 – 2270. Vol. 18, Number 11, 1997.

PEÑUELAS, J., PINOL, R. O. OGAYA, R. & FILELLA. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970), **International Journal of Remote Sensing**, 18, p. 2869–2875, 1997.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N. & 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, 2004.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. & GALO, M. L. T. Correção radiométrica de imagens multiespectrais CBERS e Landsat ETM usando atributos de reflectância e de cor. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, **Anais**. p. 4241-4248, 2005.

POLIDORIO, A. M.; FLORES, F. C.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. & FRANCO, C. Automatic shadow segmentation in aerial color images. Proceedings of the IEEE XVI Brazilian Symposium on computer graphics and image processing, 12 – 15 October, São Carlos, Brazil, 2003. **Proceeding**. p. 270 – 277, 2003.

SCHNEIDER, K. & MAUSER, W. Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement. **International Journal of Remote Sensing**, vol.17, 11, p. 2027-204, 1996.

SONG, M. & CIVCO, D. L. A knowledge-based approach for reducing cloud and shadow. ASPRS-ACSM Annual Conference and FIG XXII Congress April 22-26, 2002. **Proceeding**. available in CR-ROM, 2002.

WILDALLEN K. TETT, P. & BOWERS D. Observations of diffuse upwelling irradiance and chlorophyll in case I waters near the Canary Islands (Spain). **Optic Laser Technology**. Vol. 29, No. 1, p. 3-8, 1997.

ZULLO, J.; X. GU, F.; LAMPARELLI, R.; GUYOT, G. & BEZERRA, P. 1996. Pré-processamentos das imagens de satélites. CIG – Caderno de Informações Georeferenciadas. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/revita/cigv1n1a7.html>>. Acesso 10 de setembro 2004.

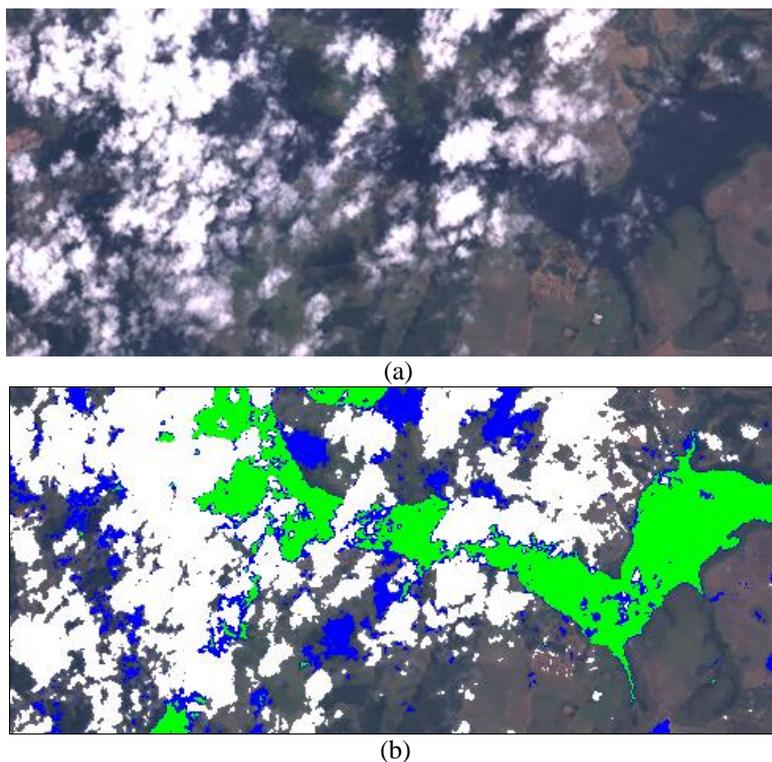


Fig. 5 - Discriminação das feições – Imagem Landsat 7/ETM. (a) Composição colorida R3G2B1. (b) Resultado da discriminação – Nuvens (branco). Sombras (azul). Água (verde).

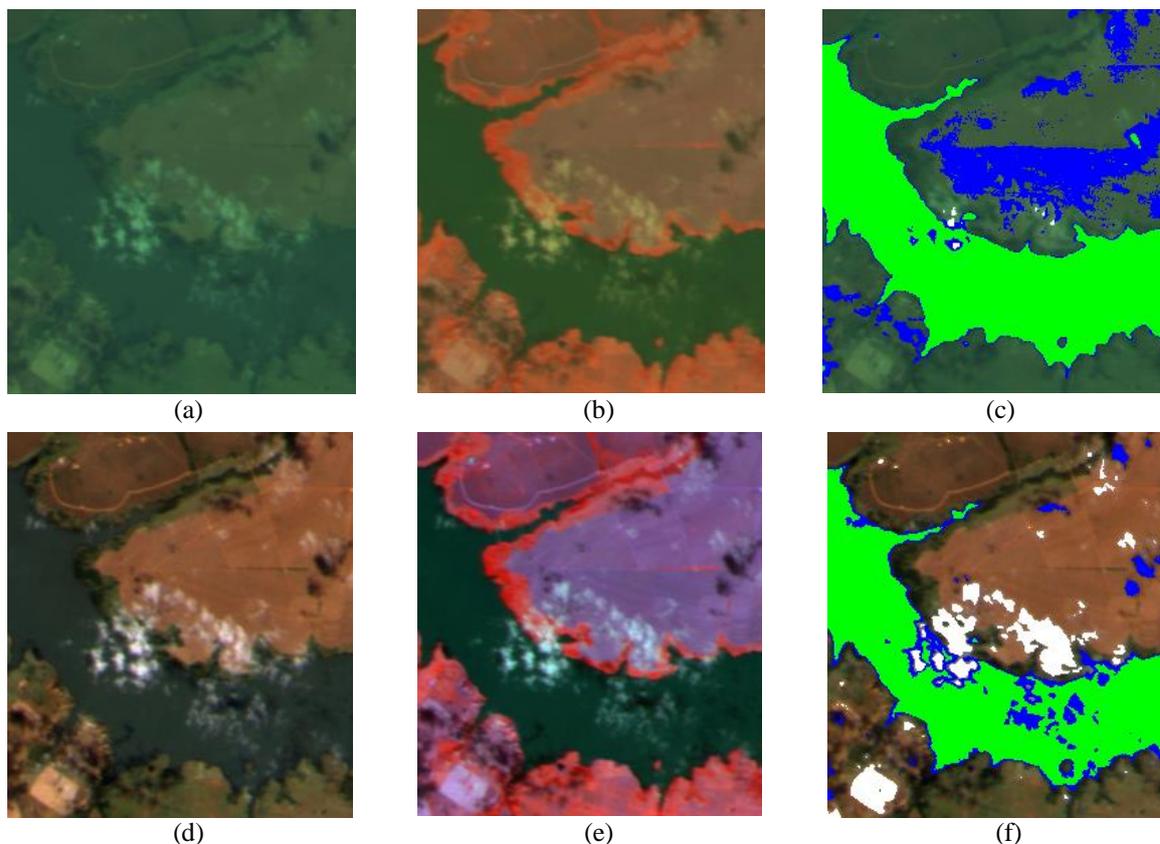


Fig. 6 - Imagens CBERS. (a) R3G2B1 original. (b) CIR original. (c) Resultado da segmentação de nuvens, sombras e água usando as imagens originais. (d) R3G2B1 após ajuste radiométrico. (e) CIR após ajuste radiométrico. (f) Resultado da segmentação de nuvens, sombras e água usando as imagens ajustadas.