



CLASSIFICAÇÃO DE LAGOAS NO PANTANAL DA NHECOLÂNDIA UTILIZANDO UM SISTEMA LIVRE DE ANÁLISE DE IMAGENS ORIENTADA A OBJETO

CLASSIFICATION OF LAKES IN THE PANTANAL OF NHECOLÂNDIA (BRAZIL) USING OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS

Tessio Novack

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto
tessio@dsr.inpe.br

Ericson Hideki Hayakawa

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto
ericson@dsr.inpe.br

Thiago de Castilho Bertani

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto
thiagob@dsr.inpe.br

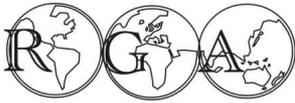
Hiran Zani

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto
hzani@dsr.inpe.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a aplicação da técnica de Análise de Imagens Orientada a Objeto (AIOO) utilizando o sistema livre InterIMAGE e imagens do sensor ASTER para a detecção de lagoas no Pantanal da Nhecolândia e sua classificação, diferenciando lagoas salinas e não-salinas. Um modelo de classificação das imagens foi elaborado na forma de uma rede semântica cujas classes foram descritas a partir de atributos espectrais, geométricos e contextuais. A análise dos resultados indica alta correlação entre o verificado visualmente nas imagens e o resultado da classificação. De forma geral, as lagoas presentes na área de estudo foram bem delineadas pelo algoritmo de segmentação utilizado, assim como grande parte dos cordões arenosos adjacentes a estas lagoas. Os valores do Índice *Kappa* e da Exatidão Global obtidos pela classificação gerada foram respectivamente de 0,64 e 0,73. Os erros de omissão e comissão entre as classes foram atribuídos principalmente a forma e condições sazonais das lagoas. Apesar do caráter experimental deste trabalho, foi apresentado o enorme potencial do sensoriamento remoto e, mais especificamente, da AIOO para a identificação e diferenciação automática de lagoas presentes no Pantanal da Nhecolândia.

Palavras-chave: Análise de Imagens Orientada a Objeto, Pantanal da Nhecolândia, Sistema InterIMAGE.

**ABSTRACT**

This paper aims to apply a new approach to map and differentiate lakes among saline and non-saline using solely remote sensing data and object-based image analysis, which have still been undertaken towards this end. In all experiments the visible and near-infrared bands of the ASTER sensor were used as well as the free of cost InterIMAGE object-based image analysis (OBIA) system. The proposed image classification model is structured as a semantic net whose classes are described by spectral, geometrical and contextual features. The class descriptions emulate the reasoning of human photo-interpreters familiar with the area under study. A qualitative analysis of the obtained classification verified that there is high visual correlation between the ASTER imagery and the automatically made classification. Most of the lakes in the area under study were precisely delineated using an image segmentation algorithm, as well as the sandy ridges adjacent to the lakes. Despite the occurrence of omission and commission errors, it was possible to differentiate saline lakes of non-saline lakes using a class context criterion. Part of the observed misclassification errors can be related to non-typical lakes. As for the quantitative analysis, a Kappa Index of 0.64 was obtained as well as a Global Accuracy of 73%. This study is still in experiment phase but already gives evidences of the potential of remote sensing techniques, and more specifically OBIA, for automatically detecting lakes and differentiating them between saline and non-saline in the Pantanal of Nhecolândia region.

Keywords: Object-Based Image Analysis, Pantanal of Nhecolândia, InterIMAGE System.

1. INTRODUÇÃO

A região conhecida como Pantanal consiste em uma ampla planície alagável com aproximadamente 138.183 km² de área hidrográfica do alto rio Paraguai (Silva e Abdon, 1998). Recentemente designado pela UNESCO como Reserva da Biosfera e Patrimônio da Humanidade, o Pantanal é reconhecido mundialmente por suas riquezas naturais, ampla biodiversidade e importância de seu ecossistema. Toda esta riqueza pode ser organizada em oito sub-regiões (cada uma com um tipo predominante de paisagem e todas nomeadas com o prefixo "Pantanal"): Barão de Melgaço, Cáceres, Nabileque, Nhecolândia, Paiaguás, Paraguai e Poconé (Junk et al., 2006). Apesar deste mosaico de paisagens e da importância deste ecossistema como um todo, informações científicas confiáveis e detalhadas sobre o Pantanal ainda são escassas. Vários assuntos relacionados com a evolução e a dinâmica das suas paisagens ainda estão sendo discutidos na literatura especializada.

Um exemplo refere-se à presença de inúmeras lagoas no Pantanal da Nhecolândia, cuja gênese e comportamento ainda não são bem conhecidos (Costa e Telmer, 2006). Tais lagoas apresentam características peculiares, variando de lagoas de água doce, também denominadas de baías, e lagoas salgadas, comumente denominadas de salinas (Abdon et al., 1998; Medina-Junio e Rietzeler, 2005). Há também lagoas de água dura (com altas concentrações de carbonato de cálcio) ou salobras (Pott e Pott, 2000). As lagoas salinas não apresentam vegetação aquática, já as lagoas doces frequentemente apresentam vegetação de aguapé. As lagoas salinas geralmente apresentam cordões arenosos em suas margens, denominadas cordilheiras, as quais se configuram por elevações de até 5 m com

vegetação arbustiva e/ou arbórea às margens das lagoas. Segundo Almeida e Lima (1959), as baías são corpos de água de baixa salinidade e com dinâmica sazonal que promove seu abastecimento nos períodos de cheia. Já as salinas são corpos d'água de alta salinidade e que possuem comportamento perene, em relação aos corpos de água doce.

Embora seja de conhecimento da comunidade científica a diferença de salinidade entre as lagoas, o mapeamento de todo o conjunto de lagoas que perfazem o Pantanal e sua diferenciação entre lagoas salinas e não-salinas é uma tarefa que denota certa complexidade. Atualmente, a disponibilidade crescente de dados de sensoriamento remoto, avanço das técnicas de geoprocessamento e processamento digital de imagens podem facilitar a identificação, mapeamento e distinção das referidas lagoas. As importantes contribuições de Almeida et al. (2003), Gomes et al. (2006) e Costa e Telmer (2006, 2007) corroboram esta afirmação.

No entanto, até o momento, a abordagem conhecida como Análise de Imagens Orientada a Objeto (AIOO) não foi aplicada para a finalidade de detecção e diferenciação de lagoas no Pantanal de Nhecolândia. A AIOO possui muitas potencialidades, dentre as principais destacam-se a segmentação das imagens em mais de uma escala e com mais de um conjunto de parâmetros, a possibilidade de exploração de atributos espectrais, de textura, geométricos e topológicos para a classificação de segmentos, a definição da relação semântica e hierárquica entre as classes através de diagramas de classes e análise do grau de pertinência dos objetos às classes (i.e., quando a descrição das

classes se utiliza de funções de pertinência *fuzzy*). Consequentemente, a AIOO permite a elaboração de forma flexível de regras e processos complexos de classificação e análise de imagens, permitindo inclusive a emulação do raciocínio humano de interpretação de imagens de sensoriamento remoto (Benz et al., 2004; Dragut, 2006; Blaschke, 2010).

Apesar das diversas potencialidades da AIOO acima descritas, as quais apresentam algumas vantagens em relação aos classificadores estatísticos convencionais para determinadas aplicações, o custo para a aquisição de licenças de uso dos sistemas comerciais de AIOO ainda é considerado alto para os padrões econômicos de países em desenvolvimento. Outra desvantagem é que estes sistemas são de código fechado, não permitindo que o usuário conheça a heurística e o funcionamento dos algoritmos que os compõem. Por estas razões, é de grande interesse a comunidade científica o desenvolvimento de sistemas computacionais não-proprietários e abertos que visem permitir que um número maior de usuários utilize técnicas de AIOO em estudos ambientais e urbanos.

A partir do exposto acima, o objetivo deste trabalho foi a aplicação de técnicas de AIOO para a detecção de lagoas no Pantanal da Nhecolândia e a verificação de seu potencial para a diferenciação de lagoas salinas das não-salinas. Para tanto, foram utilizadas imagens orbitais multiespectrais e o sistema brasileiro livre e de código aberto InterIMAGE (InterIMAGE, 2010).

1.1. O Sistema InterIMAGE

O InterIMAGE é um sistema de AIOO de livre acesso e de código aberto que pode ser instalável nos sistemas operacionais Linux e Windows (InterIMAGE, 2010). O conceito de

análise de imagens do InterIMAGE, ou seja, sua estratégia de interpretação, é baseado no sistema GeoAIDA (Bückner et al., 2001), desenvolvido pela Universidade de Leibniz em Hannover, Alemanha. Esta estratégia de análise de imagens é baseada em uma rede semântica e em regras de classificação definidas pelo usuário e que representam o seu conhecimento sobre a cena analisada. A estratégia de interpretação se aplica em duas etapas, chamadas *Top-Down* (TD) e *Bottom-Up* (BU).

Na etapa TD o sistema percorre a rede semântica de cima para baixo disparando os chamados operadores holísticos. Operadores holísticos são programas executáveis, externos ao núcleo do sistema, especializados na detecção de hipóteses de objetos de certa classe. Para tanto, operadores holísticos realizam uma rotina de processamento de imagens ou simplesmente importam objetos gerados em outros sistemas de processamento de dados ou banco de dados SIG. Todos os nós da rede semântica podem conter um operador holístico, do contrário o sistema apenas passa para os nós filhos da rede os objetos extraídos pelo operador holístico do nó-pai do nó em questão. Os operadores holísticos podem ser desenvolvidos em qualquer linguagem que o usuário tenha conhecimento de programação. Na teoria, portanto, estes operadores podem processar qualquer tipo de imagem, dando o InterIMAGE a capacidade de análises multi-sensor. TerraAIDA (2010) oferece um repositório online dos operadores desenvolvidos pela equipe de desenvolvimento do projeto InterIMAGE.

Para a detecção de hipóteses de certa classe, operadores holísticos normalmente realizam três procedimentos controlados pelo usuário: (1) segmentação das imagens (i.e., importação de dados vetoriais ou máscaras) (2) cálculo de atributos e (3) classificação de objetos. As

áreas geográficas delimitadas por um operador holístico são transmitidas como máscaras para os nós-filhos do nó em questão da rede semântica. Sobre estas máscaras os operadores holísticos inseridos nestes nós-filhos operarão. Presentemente, o usuário pode elaborar um operador holístico utilizando (1) um de dois algoritmos de segmentação de imagens, a saber, o algoritmo de Baatz e Schäpe (2000) e o de Bins et al. (1996), (2) atributos espectrais, texturais e geométricos e (3) regras de classificação envolvendo, se necessário, estruturas hierárquicas de operadores de seleção (i.e., mínimo e máximo).

Na etapa BU, o sistema ascende a rede semântica solucionando os conflitos espaciais. Estes são resultantes do fato de uma mesma área geográfica poder ter sido identificada como hipótese de mais de uma classe durante a etapa TD. Esta solução dos conflitos espaciais é feita baseada em regras definidas pelo usuário e que são inseridas em todo nó da rede semântica que não é um nó-folha. A solução dos conflitos espaciais envolve o descarte parcial ou total de hipóteses ou a validação destas em instâncias. As regras BU, ou regras de solução de conflito especial, podem envolver seleções adicionais de hipóteses. Se mesmo depois deste descarte de hipóteses, conflitos espaciais ainda permanecerem estes são resolvidos ou pela definição supervisionada de uma ordem de prioridade entre as classes ou através da competição de valores de pertinência às classes dados por funções *fuzzy* de pertinência desenhadas pelo usuário. As regras BU são customizadas em uma interface gráfica amigável que permite a elaboração de regras complexas que podem inclusive simular o raciocínio humano de interpretação de imagens.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre as coordenadas 19° 20' 07" e 19° 32' 08" de latitude Sul e 55° 47' 53" e 55° 47' 53" de longitude Oeste de *Greenwich*, no Pantanal da baixa Nhecolândia, inserida entre os rios Taquari e Negro (Figura 1). Trata-se de uma área que apresenta um grande número de lagoas e que tem sido alvo de diversas pesquisas (Figura 2) (Soares et al., 2003; Almeida et al., 2003; Gomes et al., 2006; Costa e Telmer, 2006, 2007).

A área está inserida em uma feição geomorfológica, conhecida como Megaleque do rio Taquari (Braun, 1977). Estudos recentes sugerem que as formas do relevo da Nhecolândia estão relacionadas com a dinâmica de sedimentação do Megaleque do Taquari (Zani et al., 2009a; Zani et al., 2009b). Sendo circundada por planaltos, a região constitui-se em uma ampla planície alagável com altitudes que variam entre 80 a 190 m acima do nível do mar. No verão o clima é quente e úmido e no inverno há uma redução na temperatura e queda da pluviosidade, que anualmente soma de 1000 a 1500 mm (Garcia de Emiliani, 1993). A sazonalidade das águas promove dois períodos distintos: os meses de seca que englobam os meses de maio a outubro, e os meses de novembro a abril, quando se inicia as chuvas nas cabeceiras dos rios da Bacia do Rio Paraguai. Esta variação de períodos secos e chuvosos promove mudanças significativas na paisagem (Tarifa, 1986).

O alto rio Paraguai é o principal sistema fluvial da região. Tem suas nascentes no Planalto do Parecis, Mato Grosso, e flui em terras brasileiras apenas em seu alto curso. Seu fluxo escoo principalmente nos países vizinhos ao Brasil, atravessando todo o Paraguai até a divisa com a Argentina, onde deságua no

rio Paraná, do qual é o principal afluente (Assine e Soares, 2004). Os principais tributários que perfazem o alto rio Paraguai e a área do estudo são: rio São Lourenço, rio Piqueri, rio Taquari e rio Negro.

Segundo Almeida e Lima (1959), os principais elementos da paisagem do Pantanal são as baías, salinas, cordilheiras, vazantes e corixos. As baías ou lagoas de água doce possuem como fonte os períodos de cheia pela água de chuva e pelo lençol freático e apresentam constantemente a presença de vegetação aquática. Já as salinas ou lagoas de alta salinidade possuem caráter perene em relação aos demais corpos d'água, devido à presença de depósitos salinos impermeáveis ao nível freático, além de contar com a presença das cordilheiras de até 5 m de altura em suas margens. Já as vazantes são morfologias relacionadas a amplas drenagens, pouco definidas e possuem alguns quilômetros de largura. São segmentadas pelas cordilheiras, sendo que nos períodos de pico de cheia formam lagoas coalescentes. Segundo Carvalho (1986), as morfologias de vazantes quando desenvolvem seções transversais bem definidas devido ao escoamento em depressões do terreno passam a ser definidas como corixos ou corixões (canais que ligam as baías, lagoas, alagados etc., com os rios adjacentes). Almeida et al. (2003) observaram que a dinâmica de inundações sazonais é controlada cronologicamente pela secagem das lagoas e implica, na coexistência de diferentes estágios na evolução sazonal dos corpos d'água. Após as cheias, as lagoas mais rasas secam, enquanto as mais profundas, em geral as alcalinas e salinas, permanecem, exibindo cordões de areia alva ao longo das bordas.

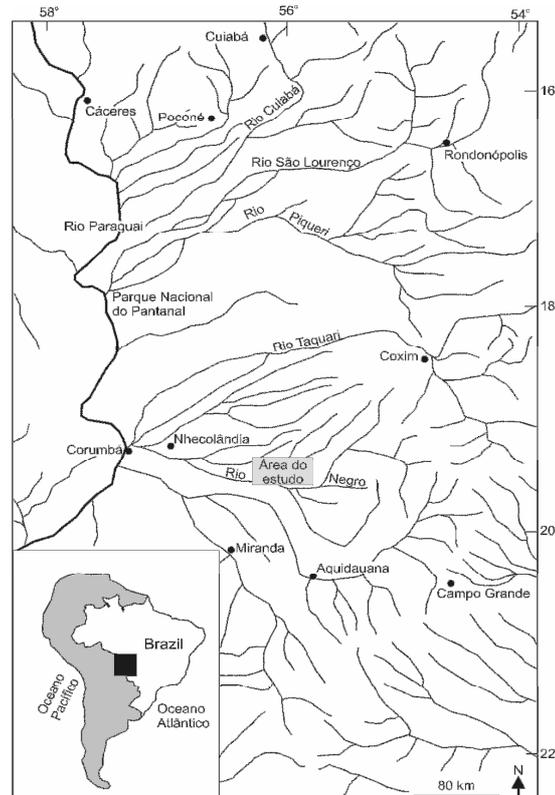


Figura 1 - Área do estudo e suas principais drenagens e cidades.

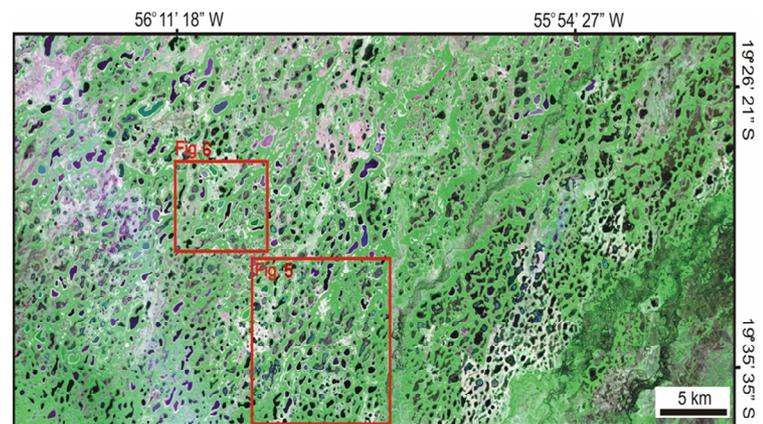


Figura 2 - Detalhe da área do estudo e morfologias das lagoas descritas por Almeida e Lima (1959) como circulares, elípticas, em crescente, periformes ou irregulares. Os quadros em vermelho indicam a área de abrangência das figuras 5 e 6.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para a elaboração deste trabalho foram utilizadas imagens do sensor ASTER datadas de 03/08/2001 (período de estiagem na área de estudo) e obtidas diretamente do *Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC)*. O sensor ASTER, a bordo do satélite EOS – Terra, é composto por detectores que operam nas faixas do VNIR (visível e infravermelho próximo; 0,52 a 0,86 μ m), SWIR (infravermelho de ondas curtas; 1,60 a 2,43 μ m) e TIR (infravermelho termal; 8,12 a 11,65 μ m) (Abrams, 2000). No presente estudo foram utilizadas somente as três bandas do VNIR (banda 1 - 0,52 a 0,60 μ m; banda 2 - 0,63 a 0,69 μ m e banda 3 - 0,76-0,86) que possuem resolução espacial de 15 m. As imagens utilizadas tem 8 bits de resolução radiométrica.

As configurações das imagens ASTER utilizadas são as do padrão AST07, que contém as bandas do VNIR corrigidas para o efeito da atmosfera e valores convertidos para reflectância de superfície. O método utilizado pelo LP-DAAC para a geração do produto AST07 consiste na aplicação de um modelo de transferência radiativa (Thome et al., 1998) em conjunto com parâmetros atmosféricos obtidos pelo *National Center for Environmental Prediction (NCEP)*. Posteriormente, um modelo digital de elevação fornece a declividade e elevação do terreno para a obtenção da reflectância de superfície (Abrams e Hook, 2002). Em áreas com relevo de baixa amplitude altimétrica, como a região estudada neste trabalho, a exatidão absoluta do produto AST07 é de $\pm 0,01$ % para terrenos com reflectância inferior a 15 % e ± 7 % para

terrenos com reflectância superior a 15 %. Para detalhes ver Abrams e Hook (2002).

3.2. Modelo de classificação e sua formatação no sistema InterIMAGE

O modelo de classificação foi elaborado conforme a estratégia de análise de imagens do sistema InterIMAGE, ou seja, estruturado em uma rede semântica em cujos nós foram inseridos operadores holísticos e regras de decisão BU. A figura 3 mostra a rede semântica elaborada.

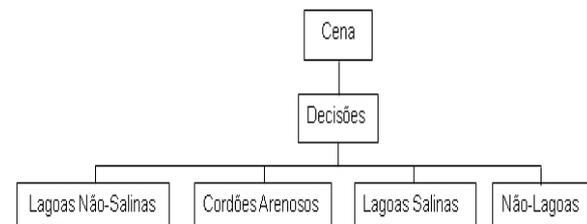


Figura 3 - Rede semântica do modelo de classificação.

Na etapa TD, os nós Cena e Decisões recebem o operador holístico *Dummy Top-Down*. Este operador apenas passa para os seus nós-filho as máscaras, ou seja, as regiões geográficas, recebidas de seu nó-pai. Como no nó Cena a região geográfica é a imagem inteira, e como o nó Decisões recebeu o operador *Dummy Top-Down*, os operadores holísticos inseridos nos nós Lagoas Não-Salinas, Lagoas Salinas, Cordões Arenosos e Não-Lagoas processam a imagem inteira. O operador TD inserido no nó Lagoas Não-Salinas é o *TerraAIDA Baatz Segmenter*. Este operador pode somente segmentar a imagem utilizando o algoritmo de segmentação proposto por Baatz e Schäpe (2000) e parâmetros definidos pelo usuário, como também segmentar a imagem e em seguida selecionar segmentos correspondentes à classe a qual o operador foi inserido. No caso do nó Lagoas Não-Salinas o *TerraAIDA Baatz*

Segmenter apenas segmenta a imagem utilizando os parâmetros de segmentação exibidos na coluna P1 da Tabela 1. Este mesmo operador, com os mesmos parâmetros, foi inserido nos nós Lagoas Salinas e Não-Lagoa. Portanto, inicialmente, todos os segmentos gerados sobre a imagem inteira são hipóteses de objetos destas três classes. Ainda na etapa TD, o nó Cordões Arenosos segmenta a imagem utilizando os parâmetros exibidos na coluna P2 da Tabela 1 e seleciona os segmentos com o valor do atributo 'brilho', que é, para cada segmento, a soma da média dos pixels das três bandas do visível e infravermelho-próximo do ASTER dividido por 3, acima do limiar 170. O operador usado para isto foi também o *TerraAIDA Baatz Segmenter*.

Os valores expressos na Tabela 1 foram obtidos através de tentativa e erro. Diversos conjuntos de parâmetros foram testados. Ao final, decidiu-se aplicar um peso baixo ao parâmetro Forma, o que implica em um peso alto para o parâmetro Cor (0.9, neste caso), nos dois conjuntos de parâmetros (P1 e P2). Como a intenção era segmentar precisamente as lagoas, que têm formato arredondado, priorizou-se o parâmetro de forma Suavidade em P1. Já os cordões arenosos, por serem de menor tamanho em relação às lagoas, foram mais bem segmentados aplicando-se um parâmetro baixo de escala e mantendo-se os valores padrões do operador *TerraAIDA Baatz Segmenter*.

Tabela 1- Parâmetros de segmentação aplicados ao longo do processo de classificação automática.

Parâmetros	P1	P2
Parâmetro de escala	100	40
Forma	0.1	0.1
Cor	0.9	0.9
Compacidade	0.35	0.5
Suavidade	0.65	0.5

Neste modelo de classificação elaborado, fica a cargo da regra BU

inserida no nó Decisões a solução dos conflitos espaciais ocorrentes entre as classes na imagem. Isto é feito da forma seguinte. Todas as hipóteses de Cordões Arenosos são validadas, ganhando pertinência máxima (i.e., igual a 1.0), ou seja, ganham todos os conflitos espaciais com todas as outras classes. Em seguida, são calculados os atributos 'média dos pixels na banda do infravermelho próximo' e 'circularidade' para todas as hipóteses de Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas. Igualmente para as duas classes, o primeiro atributo foi associado com a função de pertinência 'a' da figura 4, tendo como limiar esquerdo e direito os valores 0 e 300 respectivamente, e o segundo atributo foi associado à função 'b' da figura 4, tendo como limiar esquerdo e direito os valores 0 e 1 respectivamente. Os atributos calculados para as hipóteses de Não-Lagoa são os mesmos que as classes Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas. Porém, ao atributo 'média dos pixels na banda do infravermelho próximo' foi associada à função de pertinência 'b' da figura 4, tendo como limiar esquerdo e direito os valores 0 e 300 respectivamente, ao passo que o atributo 'circularidade' foi associado à função de pertinência 'a' da figura 4, tendo como limiar esquerdo e direito os valores 0 e 1 respectivamente. Para todas as três classes, o operador de agregação dos valores de pertinência 'mínimo' foi usado. Nota-se então que as classes Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas tem a mesma regra de cálculo de pertinência dos segmentos a estas classes, enquanto a classe Não-Lagoa tem como regra o oposto das classes Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas.

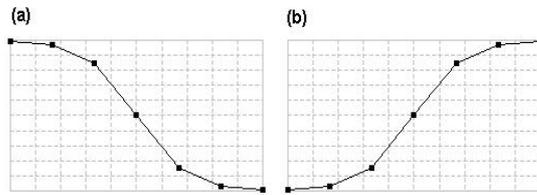


Figura 4 - Funções de pertinência associadas aos atributos utilizados na descrição das classes. Os limiares do eixo Y são sempre 0 e 1 e os limiares do eixo X dependem do caso.

Assim é feito a solução dos conflitos espaciais: a classe Cordões Arenosos ganha todos os conflitos espaciais em todas as ocasiões e as classes Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas competem em valor de pertinência com a classe Não-Lagoa. Naturalmente ainda existirão conflitos espaciais entre todas as hipóteses de Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas, já que elas têm os mesmos parâmetros de segmentação, os mesmos atributos calculados e associados às mesmas funções de pertinência. A estratégia adotada foi a de ignorar este fato e deixar o sistema atribuir randomicamente os segmentos às classes Lagoas Salinas ou Lagoas Não-Salinas e em seguida inserir uma regra de reclassificação.

Esta regra de reclassificação é inserida na regra BU do nó Decisões após ser feita a resolução dos conflitos espaciais (o que só se efetua quando se insere o comando *Spatial Resolve* na regra) na forma acima demonstrada. Primeiramente, ao se inserir o comando *Merge Neighbours* para todas as classes, segmentos adjacentes entre si e de mesma classe são agregados em uma só instância. Esta eliminação da fronteira entre instâncias vizinhas e de mesma classe faz com que as instâncias passem a representar a forma dos objetos do mundo real, e não mais partes destes como antes em que as instâncias tinham a forma dos segmentos gerados na segmentação (etapa TD). Em seguida, são selecionadas as instâncias de Lagoas Não-

Salinas com borda relativa (porcentagem do perímetro da instância) acima de 60% com a classe Cordões Arenosos e atribuem-se estas instâncias à classe Lagoas Salinas. Da mesma forma, são selecionadas as instâncias de Lagoas Salinas com borda relativa (porcentagem do perímetro da instância) abaixo de 60% com a classe Cordões Arenosos e atribuem-se estas instâncias à classe Lagoas Não-Salinas. Na prática, portanto, não importa qual classe tenha randomicamente ganhado o conflito espacial entre Lagoas Salinas e Lagoas Não-Salinas, pois qualquer lagoa com borda relativa acima de 60% com cordões arenosos foram classificadas como Lagoas Salinas, enquanto lagoas com borda relativa abaixo de 60% com cordões arenosos foram classificadas como Lagoas Não-Salinas.

3.3 Avaliação da classificação automática

A avaliação quantitativa da classificação foi feita baseada em uma matriz de confusão gerada a partir de 115 amostras pontuais coletadas visualmente de forma aleatória. Segundo Congalton e Green (1999), a matriz de confusão, se elaborada corretamente, tem eficiência comprovada e expressa de forma explícita a confiabilidade do mapa para os planejadores que o utilizarão na tomada de decisões. Nessa matriz, as colunas usualmente representam os dados de referência (verdade assumida), e as linhas, a classificação automática obtida. Os erros de omissão (amostras de uma classe atribuídas erroneamente a outras) e de comissão (amostras atribuídas erroneamente a uma classe) são expressos na matriz de erros para cada par de classes. Assim, várias medidas de exatidão podem

ser calculadas a partir de uma matriz de confusão.

Foram calculados os índices Exatidão Global e Kappa (Congalton e Green, 1999), assim como os erros de omissão e comissão de cada classe. Dada a ausência de dados de campo, as amostras de referência foram coletadas considerando o conhecimento da área e de interpretação de imagens por parte dos autores deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de Exatidão Global e do índice *Kappa* são respectivamente de 0,73 e 0,64 e indicam que a classificação é de muito boa qualidade. Demais parâmetros como erros de inclusão e de omissão podem ser observados na Tabela 2 e auxiliam a identificação dos principais erros.

Tabela 2 - Matriz de confusão da classificação por AIOO das lagoas do Pantanal da Nhecolândia.

Classificação	Referência				Total amostras	Erros de inclusão	Erros de omissão
	Areia	Lagoa Não-Salina	Lagoa Salina	Não-Lagoa			
Areia	15	1	0	4	20	0,25	0,17
Lagoa Não-Salina	3	26	9	0	38	0,32	0,35
Lagoa Salina	0	0	23	0	23	0	0,41
Não-Lagoa	0	13	1	20	34	0,41	0,17
Total amostras	18	40	33	24	115		

Analisando os dados da matriz de confusão e as cenas ASTER, observa-se que comumente as áreas de Lagoas Não-Salinas foram classificadas como áreas de Não-Lagoas. Ao verificar os pontos selecionados, observa-se que a inclusão foi induzida pela configuração das lagoas, as quais em sua grande parte estavam secas, e dessa forma dificultaram a identificação de suas bordas pelo segmentador, o que fez

com que toda a área fosse classificada como Não-Lagoa. Quanto às áreas de Lagoa Salina classificadas incorretamente como Lagoa Não-Salina, o erro deu-se devido à segmentação incorreta dos cordões arenosos, pois a classe Lagoa Salina foi descrita como possuindo ao menos 60% de seu perímetro fazendo fronteira com polígonos da classe Cordões Arenosos. Por outro lado, salienta-se que o resultado da classificação neste grau de detalhe depende muito da resolução espacial das imagens utilizadas.

Tratando-se de um ambiente altamente complexo dado as distintas morfologias presentes na paisagem, em especial as lagoas as quais apresentam formas, dimensões e composição geoquímicas distintas, a partir da análise visual dos mapas temáticos oriundos da classificação por AIOO da cena ASTER observa-se uma boa relação entre o verificado na cena e o resultado da classificação (Figura 5). Notam-se na figura 5A duas configurações distintas de lagoas: as que possuem cordões arenosos em suas margens (localizadas principalmente no setor norte da figura), e as lagoas que não apresentam cordões arenosos (concentradas principalmente na porção sul da figura). Entretanto, observam-se também na figura 5A (retângulos em vermelho) que algumas lagoas não estão presentes no mapa temático final (Figura 5C). Isto pode ser atribuído principalmente aos parâmetros estabelecidos para a segmentação da imagem (em especial o parâmetro de escala), os quais podem ser redimensionados a fim de que lagoas de menor dimensão sejam identificadas.

Nota-se que as lagoas que não foram identificadas na maioria dos casos apresentam déficit de água, cuja causa deve estar ligada ao período de estiagem, período este em que a imagem ASTER foi adquirida. Tal fato promove a redução do

corpo d'água da lagoa, o que, conseqüentemente, aumenta a dificuldade em segmentá-la, já que o segmentador tem dificuldade em encontrar os limites entre áreas secas com outras áreas úmidas que não são lagoas. Considerando que as lagoas de alta salinidade possuem comportamento perene em relação aos corpos de água doce, os quais são abastecidos somente nos períodos de cheia (Almeida e Lima, 1959), interpretam-se as lagoas secas não mapeadas como prováveis lagoas de água doce que estão com déficit de água devido ao período de estiagem, que por sua vez também reduz o nível do lençol freático.

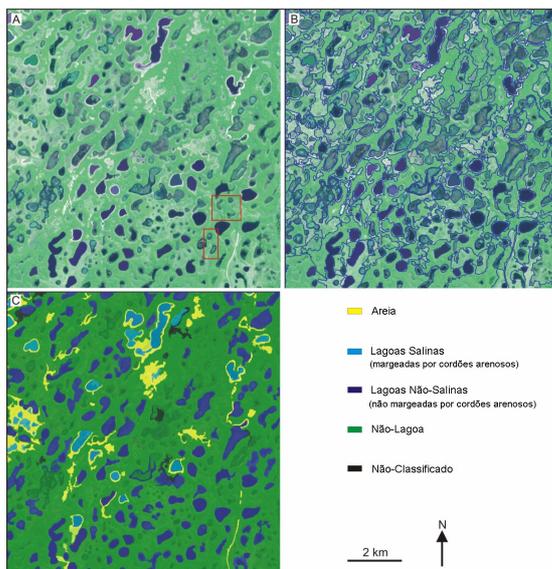


Figura 5 - A) Seção da área do estudo apresentada em composição colorida (R2G3B1) da imagem ASTER. Retângulos em vermelho indicam lagoas não verificadas no mapa temático; B) Segmentação da imagem ASTER e, C) Mapa temático da imagem ASTER classificada.

A análise em maior detalhe da imagem ASTER classificada denota claramente a boa qualidade da classificação, principalmente no delineamento dos cordões arenosos que margeiam as lagoas (Figura 6). Entretanto, há alguns erros, como os verificados na figura 6C, onde os círculos vermelhos

pontilhados indicam lagoas sem a presença de cordões arenosos, ou seja, ao contrário do que é observado na realidade (Figura 6A). Tal confusão do classificador indica que é necessário rever os limiares da segmentação, para que as feições de interesse sejam destacadas em suas respectivas classes.

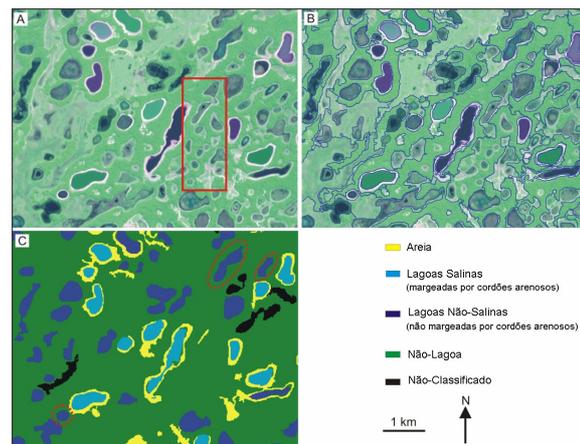


Figura 6 - A) Seção da área do estudo apresentada em composição colorida (R2G3B1) da imagem ASTER. O retângulo em vermelho indica lagoas não verificadas no mapa temático. B e C) Segmentação e mapa temático da imagem ASTER classificada. Nota-se em C o bom delineamento dos cordões arenosos que margeiam as lagoas. Os círculos referem-se a alguns erros de classificação, ocorridos devido à ausência de cordões arenosos em suas margens.

Neste trabalho a identificação precisa dos cordões de areia margeando as lagoas foi fundamental para tentar diferenciar as lagoas salinas das não salinas. Isto é devido ao fato das lagoas salinas comumente apresentarem cordões arenosos em suas margens, já que a alta salinidade da lagoa impede o avanço da vegetação da cordilheira em direção a lagoa. Já as lagoas sem cordões de areia apresentam baixa salinidade (Almeida et al., 2003). Por se tratar de uma cena obtida no período de estiagem, ou seja, em um período onde as lagoas apresentam redução de seu corpo d'água, a identificação de cordões arenosos é facilitada pelo fato de

estarem expostos. Com isso, a partir das classificações obtidas (Figuras 5C e 6C), podem-se interpretar como sendo corpos d'água com alta salinidade as lagoas que apresentam cordões arenosos em suas margens, e as de baixa salinidade as lagoas ausentes de cinturões de areia em suas margens.

Neste estudo foram utilizadas imagens de 15 metros de resolução espacial provenientes do sensor ASTER. Observa-se que as mesmas foram suficientes para extrair as informações desejadas, principalmente as feições de maior dimensão. Entretanto, observa-se que os erros existentes na classificação comumente foram verificados para as feições de menor dimensão. Dessa forma a edição dos parâmetros de segmentação e dos limiares de classificação pode melhorar os resultados. Estas edições podem ser feitas para se adequarem a áreas e datas específicas de estudo na região de Nhecolândia sem que a estrutura do modelo seja alterada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem da AIOO demonstrou ser uma alternativa eficaz para identificar e delinear as lagoas do Pantanal da Nhecolândia e diferenciá-las em salinas e não-salinas. Os pontos positivos da abordagem proposta foram o delineamento preciso das áreas de lagoas e a identificação precisa de lagoas margeadas por cordões de areia, as quais auxiliam na diferenciação entre lagoas de água salina e água doce. Os pontos negativos remetem a alguns erros de omissão e inclusão entre estas mesmas classes. Parte dos erros pode ser atribuída à ineficácia dos parâmetros de segmentação utilizados para o delineamento preciso das lagoas e à configuração de algumas destas, as quais

se diferenciam de sua forma típica no período de vazante, especialmente as de menor tamanho. Embora havendo erros de inclusão e omissão, os valores de Exatidão Global e Índice *Kappa* e a avaliação visual da classificação asseguram que a abordagem da AIOO é de grande potencial para a finalidade que este trabalho trata.

Em trabalhos futuros, sugere-se também que a classificação gerada seja validada também com dados obtidos em campo e que imagens de mais de uma data sejam utilizadas, preferencialmente de época de seca e de chuva, de modo a identificar o padrão sazonal das lagoas, o que possibilitaria sua classificação quanto salina ou não-salina de forma mais segura. Com relação a isto, em breve estará disponível no sistema InterIMAGE um operador de análises multi-temporais desenvolvido por Costa (2009) e que tem grande potencial de aplicação para a diferenciação de lagoas nesta região.

Ademais, observa-se que a utilização de imagens de maior resolução espacial facilitaria a segmentação e a classificação de lagoas e de cordões arenosos de menor tamanho. Com a crescente disponibilidade de sistemas sensores desta categoria (IKONOS II, QuickBird, Orb-View-3, Cartosat-1/2, WorldView II, Geoeye-1, EROS C, CBERS-2B/HRC, Rapid Eye, HR-1, Aisat-2, e o lançamento previsto do HR-2 para o ano de 2010), o que tende a diminuir o custo destes dados, e a possibilidade de aplicar a abordagem de classificação por AIOO em um sistema computacional genuinamente brasileiro de custo zero e de código aberto, o mapeamento automático de lagoas e outras feições presentes no Pantanal da Nhecolândia pode atingir índices de exatidão ainda mais altos do que os obtidos neste trabalho.

Apesar do caráter experimental deste trabalho, foi apresentado o enorme potencial da classificação de imagens de

sensoriamento remoto e, mais especificamente, da AIOO para a identificação e diferenciação automática de lagoas presentes no Pantanal da Nhecolândia. O modelo de classificação apresentado pode ser operacionalizado, pois foi elaborado com o sistema livre InterIMAGE. A edição do modelo em termos de parâmetros de segmentação e limiares de classificação pode ser feita para adequar-se a datas e áreas específicas, exigindo do usuário apenas o conhecimento do sistema utilizado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a solicitude e os esforços empreendidos por todos os competentes membros do Projeto InterIMAGE tanto da PUC-Rio (Dr. Raul Queiroz Feitosa, Dr. Gilson Costa, MSc. Dário Oliveira e Rodrigo Ferreira) quanto do INPE (Dr. Hermann Kux, Dra. Cláudia Almeida, MSc. Emiliano Castejon e MSc. Thales Korting).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdon, M.M.; Pott, V.J.; Silva, J. dos S.V. 1998. Avaliação da cobertura por plantas aquáticas em lagoas da sub-região da Nhecolândia no Pantanal por meio de dados Landsat e SPOT. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33 número especial, p.1675-1683.

Abrams, M.J. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high resolution imager on NASA's Terra Platform. International Journal of Remote Sensing, v. 21 n. 5, p. 847-859.

Abrams, M.; Hook, S. 2002. ASTER user handbook. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory.

Almeida, F.F.M.; Lima, M.A. 1959. Planalto Centro-Ocidental e Pantanal Mato-grossense.

Anais. XXVIII Congresso Internacional de Geografia, Rio de Janeiro, p. 169.

Almeida, T.I.R.; Sígolo, J.B.; Fernandes, E.; Queiroz-Neto, J.P.; Barbiero, L.; Sakamoto, A.Y. 2003. Proposta de classificação e gênese das lagoas da baixa Nhecolândia-MS com base em sensoriamento remoto e dados de campo. Revista Brasileira de Geociências, v. 33 n.2, p. 83-90.

Assine, M.L.; Soares, P.C. 2004. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. Quaternary International, v. 114 n. 1, p.23-34.

Baatz, M.; Schäpe, A. 2000. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. <agit.at/papers/2000/baatz_FP_12.pdf>. Acessado em: 12/07/2009.

Benz, U. C.; Hofmann, P.; Willhaucke, G.; Lingenfelder, I.; Heynen, M. 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 58, n. 3-4, p. 239-258.

Bins, S.A., Fonseca, L.M.G., Erthal, G.J. 1996. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. Anais. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Salvador, Brazil, p. 677-680.

Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 65, p. 2-16

Braun, E.H.G. 1977. Cone aluvial do Taquari, unidade geomórfica marcante na planície quaternária do Pantanal. Revista Brasileira de Geografia, v. 39 n. 4, p. 164-180.

Bückner, J.; Stahlhut, O.; Pahl, M.; Liedtke, C.E. 2001. GEOAIDA - A knowledge based automatic image data analyzer for remote sensing data.

<citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.20.5785&rep=rep1&type=pdf>. Acessado em 12/07/2009.

Carvalho, N.O. 1986. Hidrologia do Alto Paraguai. Anais. I Simpósio de Recursos Naturais e Sócio-econômicos do Pantanal, Corumbá, p. 63-76.

Congalton, R.G., Green, K. 1999. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, Lewis Publishers, New York. 160p.

- Costa, M.P.F.; Telmer, K.H. 2006. Utilizing SAR imagery and aquatic vegetation to map fresh and brackish lakes in the Brazilian Pantanal wetland. *Remote sensing of Environment*, v. 105 n. 3, p. 204-213.
- Costa, M.P.F.; Telmer, K.H. 2007. Mapping and monitoring lakes in the Brazilian Pantanal wetland using synthetic aperture radar imagery. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 17 n. 3, p. 277-288.
- Costa, G.A. 2009. A knowledge-based approach for automatic interpretation of multirate remote sensing data. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 146p.
- Dragut, L.; Blaschke, T. 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, v. 81, n. 3-4, p. 330-344.
- Garcia de Emiliani, M. O. 1993. Seasonal succession of phytoplankton in a lake of the Paraná River flood plain, Argentina. *Hydrobiologia*, n. 264, p. 101-114.
- Gomes, A.R.; Soler, L.S.; Affonso, A.G.; Assine, M.L. 2006. Classificação digital de imagem JERS-1 para identificação de lagoas na baixa Nhecolândia – MS. Anais. I Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Campo Grande: EMBRAPA, p. 192-199.
- InterIMAGE. 2010. Interpreting Images Freely. <vc.ele.puc-rio.br/projects/interimage>. Acessado em 12/07/2009.
- Junk, W.J.; Cunha, C.N.; Wantzen, K.M.; Pertemann, P.; Strussmann, C.; Marques, M.I.; Adis, J. 2006. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Aquatic Sciences*, v. 68 n.3, p. 278-309.
- Medina-Júnio, P.B.; Rietzeler, A.C. 2005. Limnological study of a Pantanal saline lake. *Brazilian Journal of Biology*, v. 65 n. 4, p. 651-659.
- Pott, V.J.; Pott, A. 2000. Plantas aquáticas do pantanal. EMBRAPA, Brasília. 404p.
- Silva, J. dos S.V.; Abdon, M.M. 1998. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33 número especial, p. 1703-1711.
- Soares, A.P.; Soares, P.C.; Assine, M.L. 2003. Areais e lagoas do Pantanal, Brasil: herança paleoclimática? *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33 n. 2, p. 211-224.
- Tarifa, J. R. 1986. O sistema climático no Pantanal: Da compreensão do sistema a definição de prioridade de pesquisa climatológica. In: *Anais do Simpósio sobre Recursos Naturais e Socio-econômicos do Pantanal*, 9-27. Brazilian Corporation for Agricultural Research (EMBRAPA), Brasília.
- TerraAIDA. 2010. IntelIMAGE Operators. <dpi.inpe.br/terraaida/?lingua=portugues>. Acessado em 12/07/2009.
- Thome, K.; Palluconi, F.; Takashima, T.; Masuda, K. 1998. Atmospheric correction of ASTER. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36 n. 4, p. 1199-1211.
- Zani, H.; Assine, M.L.; Silva, A.; Coradini, F.A. 2009a. Redes de drenagem distributária e formas deposicionais no Megaleque do Taquari, Pantanal: uma análise baseada no MDE-SRTM. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10 n. 1, p. 21-28.
- Zani, H.; Assine, M.L.; Silva, A.; Coradini, F.; Kuerten, S.; Gradella, F.S. 2009b. Geoformas deposicionais e feições erosivas no Pantanal Mato-Grossense identificadas por sensoriamento remoto. *Geografia*, v. 34 número especial, p. 643-654.