

Rotação radiométrica para detecção de mudanças na paisagem de tensão ecológica em Roraima

João Arthur Pompeu Pavanelli¹
Francisco Dario Maldonado²
João Roberto dos Santos¹
Lênio Soares Galvão¹
Maristela Ramalho Xaud³
Haron Abraham Magalhães Xaud³

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
{jpompeu, jroberto, lenio}@dsr.inpe.br

² Centro Regional de Geomática (CEREGEO), Facultad de Ciencia y Tecnología (FCT),
Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER)
Matteri y España s/n, CP E3105BWA – Diamante Entre Ríos, Argentina
francisco.dario.maldonado@uader.edu.ar

³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Roraima
BR- 174, km 8, Distrito Industrial, 69301-970 - Boa Vista - RR, Brasil
{maristela.xaud, haron.xaud}@embrapa.br

Abstract. Change detection is the process of identifying differences in the state of an object by observing it at different times. There are many change detection techniques and the one used in this work, called Radiometric Rotation Controlled by No- change Axis (RCNA), was developed from Principal Components Analysis (PCA). The advantage of RCNA over PCA is the possibility of controlling the rotation angle, increasing the efficiency of detecting changes in the landscape. The objective of this work was to apply the radiometric rotation algorithm for change detection in the landscape of ecological tension in Roraima State, Brazil, characterized by the contact between forest and savannah. The dynamics was characterized by five classes: no change, high vegetation recovery, moderate recovery, high degradation and moderate degradation. The results showed 83.91% of no change class, 8.08% of vegetation recovery (6.07% moderate and 2.01% high) and 8.05% of the degradation class (4.93% moderate and 3.12% high). Most of the total degradation (68.8%) occurred in the contact between forest and agriculture areas. The recovery in this region is mainly related to the abandonment of agriculture areas and pastures. Recovery in the savannah region was observed in riparian forests and forestry. Savannah degradation occurs mainly in the zones under influence of the BR-174 highway. RCNA was efficient for change detection in this landscape of complex ecosystems.

Keywords: Remote sensing, savannah, forest, Sensoriamento remoto, savana, floresta

1. Introdução

Cerca de 70% do estado de Roraima apresenta cobertura vegetal florestal, enquanto o restante é ocupado por savanas ou campinaranas, formando zonas de tensão ecológica entre as diferentes fitofisionomias. Comparado a outros estados amazônicos, Roraima tem uma baixa taxa de desflorestamento (PRODES, 2014), no entanto há constante pressão antropogênica no domínio savânico, sobretudo com a expansão do agronegócio (BARBOSA; CAMPOS, 2011).

Nesse sentido, detecção de mudanças é um procedimento utilizado para identificar diferenças no estado de um objeto observando-o em tempos diferentes (SINGH, 1989). Assim,

estudos multitemporais envolvendo técnicas de detecção de mudanças a partir de dados de sensoriamento remoto podem auxiliar no planejamento territorial, monitoramento da expansão urbana e do agronegócio (HUSSAIN et al., 2013) e para escolha de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade. Podem-se destacar, pela utilização, técnicas de detecção de mudanças tais como diferenciação de imagens, razão entre bandas, análise de vetores de mudança (HUSSAIN et al., 2013), subtração de imagens-fração (XAUD; EIPHANIO; XAUD, 2013) comparação pós-classificação (PAVANELLI et al., 2014) e Análise das Componentes Principais – ACP (MALDONADO; SANTOS; CARVALHO, 2002). Neste estudo foi utilizada a abordagem proposta por Maldonado (2004), que desenvolveu a técnica de Rotação Radiométrica Controlada por Eixo de Não Mudança (RCEN) a partir da modificação da Análise das Componentes Principais. A inovação da RCEN em relação à ACP é que ela aumenta a eficiência da detecção de mudanças, pois possibilita o maior controle do ângulo de rotação derivado da análise bi-temporal de imagens.

A RCEN foi aplicada à estudos em regiões semi-áridas (MALDONADO; SANTOS; GRAÇA, 2007; SANTOS et al., 2009); na Floresta Atlântica, por Arasato et al. (2012); e na floresta Amazônica (SANTOS; MALDONADO; GRAÇA, 2005; GRAÇA et al., 2008). Assim, o objetivo desse estudo foi utilizar a técnica de rotação radiométrica para detectar mudanças de uso e cobertura da terra na zona de tensão ecológica entre floresta e savana no estado de Roraima.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo de 588 km² está localizada na região centro-norte do estado de Roraima, se estendendo por uma porção dos municípios de Mucajaí (388 km²), Boa Vista (199 km²) e Alto Alegre (1 km²), entre as coordenadas 60° 50' 14.60" a 61° 03' 05.96"W e 2° 24' 00.00" a 2° 41' 53.50"N. É uma região caracterizada pelo contato entre fisionomias de savana e floresta, cortada na direção sudeste-noroeste pelo Rio Mucajaí, que tem ao sul do rio, no município de Mucajaí, as áreas de floresta ombrófila aberta, floresta estacional semidecídua e pequenas manchas de capinarana e ao norte, em Boa Vista e Alto Alegre, a predominância das formações savânicas (parque e graminosa).

O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso com nítida estação seca (Aw), com amplitude térmica entre as médias do mês mais quente e do mês mais frio inferior a 5° C. Os latossolos vermelho amarelo, constituídos por solos apresentando a seqüência de horizontes A, B e C, profundos a muito profundos, são predominantes e nas áreas próximas ao Rio Mucajaí e Rio Branco, predomina o solo hidromórfico gleizado, caracterizado pelo pouco desenvolvimento e saturado com água. Em manchas isoladas ainda ocorrem os solos litólicos e hidromórfico cinzento.

2.2. Procedimento metodológico

Foram utilizadas imagens de órbita 232, ponto 58 dos sensores TM/Landsat-5, de 06/10/2010, nas bandas correspondentes ao vermelho - V (B3 - 0.63 a 0.69 μm) e infravermelho próximo - IVP (B4 - 0.76 a 0.90 μm) e ETM+/Landast-7, de 06/10/2013, nas bandas V (B3 - 0.63 a 0.69 μm) e IVP (B4 - 0.78 a 0.90 μm). Priorizaram-se imagens de mesmo período do ano a fim de minimizar o efeito da declinação solar zenital e também o efeito da sazonalidade da vegetação, sobretudo na região de savana.

Para remoção de nuvens, sombras de nuvens e corpos d'água foi utilizado o pacote Fmask (ZHU; WOODCOCK, 2012) que utiliza informações espectrais de todas as bandas ópticas e termal para estimar as áreas a serem mascaradas. As máscaras de 2010 e 2013 foram somadas para formarem uma única máscara que foi utilizada em todas as operações estatísticas.

A técnica de Rotação Radiométrica Controlada por Eixo de Não Mudança (RCEN) não necessita correções atmosféricas (MALDONADO, 2004; SANTOS; MALDONADO; GRAÇA, 2005; MALDONADO; SANTOS; GRAÇA, 2007).

A RCEN é baseada na regressão linear dos valores radiométricos de regiões representativas de não mudança entre duas bandas com resolução espectral semelhante, mas de datas distintas (MALDONADO; SANTOS; GRAÇA, 2007), sendo a primeira banda correspondente à primeira data e a segunda banda à segunda data. A seleção de regiões de não mudança na paisagem foi baseada em coleta de pontos observacionais registrados em campo em maio de 2014 e amostras a partir da Análise das Componentes Principais (ACP) em conjunto com a interpretação visual das imagens. A detecção de mudanças por ACP teve como entrada os pares de bandas V_TM_2010, V_ETM+_2013 e IVP_TM_2010, IVP_ETM+_2013. Foram calculadas duas Principais Componentes (PC) e a imagem contendo as possíveis mudanças na paisagem foi gerada pela soma das segundas PC (Equação 1) e fatiada em cinco classes (MALDONADO; SANTOS; CARVALHO, 2002), como demonstrado na Tabela 1, sendo de interesse nessa etapa a classe de Não Mudança.

$$CD_PCA = PC2_V - PC2_IVP \quad (1)$$

A partir da seleção de regiões de não mudança foi realizada a regressão linear, cuja equação é dada pela Equação 2. A transformação linear possibilita a obtenção do ângulo α que é usado para rotação, sendo extraído da arctangente do coeficiente de inclinação m (Equação 3). Para cada par de bandas espectrais é encontrado um ângulo de rotação.

$$Data2 = m * Data1 + O_i \quad (2)$$

Em que:

Data 2 = valor radiométrico correspondente à não mudança na segunda data (2013);

Data 1 = valor radiométrico correspondente à não mudança na primeira data (2010);

m = coeficiente de inclinação da reta da regressão;

O_i = ordenada da origem ou "interseção y".

$$\alpha = \arctg(m) \quad (3)$$

Em que:

α = ângulo de rotação;

m = coeficiente de inclinação da reta da regressão.

O processo de rotação gera uma imagem intermediária (rotacionada) para cada par de bandas espectrais de datas distintas, como mostrado na Equação 4:

$$I_{intermediaria} = \cos(\alpha) * I_{Data2} - \sin(\alpha) * I_{Data1} \quad (4)$$

Em que:

α = ângulo de rotação;

$I_{intermediaria}$ é a imagem rotacionada para cada par de bandas;

I_{Data1} é a imagem de valores radiométricos da primeira data (2010);

I_{Data2} é a imagem de valores radiométricos da segunda data (2013).

Da Equação 4 resulta a rotação dos eixos ortogonais do espaço bidimensional dos valores radiométricos dos pares de imagens de mesma banda espectral, nas datas distintas. Por conta da baixa resposta espectral da vegetação no espectro do Vermelho (B3), representada em pixels escuros, e da alta resposta no Infravermelho Próximo (B4), em que os pixels de vegetação são claros, as mudanças na cobertura da terra são relacionadas de forma inversa com B3, e de forma direta com B4. Assim, para integrar as imagens intermediárias dos dois pares de bandas espectrais e gerar a imagem de detecção de mudanças (I_{det}) foi realizada a soma das imagens intermediárias, invertendo o sinal da imagem intermediária oriunda do IVP (ARASATO et al., 2012), de acordo com a Equação 5:

$$I_{det} = I_{intermed.V} + (-I_{intermed.IVP}) \quad (5)$$

Por fim, foi subtraído o valor mínimo da imagem de detecção para eliminar os valores negativos e produzir a imagem de detecção de mudanças final – IDet (Equação 6).

$$IDet = I_{det} - (\min[I_{det}]) \quad (6)$$

Em que:

IDet é a imagem final de detecção de mudanças;

I_{det} é o resultado da integração das bandas espectrais;

\min é o valor mínimo do histograma de I_{det} .

O fatiamento da imagem final de detecção de mudanças foi realizado estatisticamente em cinco classes, como apresentado na Tabela 1 (GRAÇA et al., 2008).

Tabela 1: Classes e limiares utilizados na rotulação e fatiamento das imagens detecção

Classe	Limiar de fatiamento	Cor temática na imagem detecção
Recuperação forte	$ND < -2\sigma$	Verde claro
Recuperação moderada	$-1\sigma \leq ND \leq -2\sigma$	Verde escuro
Não mudança	$-1\sigma \leq ND \leq 1\sigma$	Cinza
Degradação moderada	$1\sigma < ND \leq 2\sigma$	Laranja
Degradação forte	$ND > 2\sigma$	Vermelho

Quando há supressão da vegetação, a influência do solo aumenta a reflectância na banda do Vermelho e diminui na banda do Infravermelho Próximo e, por conseguinte, o ganho de vegetação diminui a resposta espectral no V e aumenta no IVP. Portanto, processo de degradação está relacionado à supressão da cobertura vegetal, sendo degradação forte a retirada da vegetação com exposição do solo e degradação moderada a perda da cobertura vegetal de forma parcial, sem exposição total do solo. Recuperação moderada é definida pela regeneração da vegetação perturbada e recuperação forte é tida como a sucessão ecológica em áreas submetidas a alto grau de degradação, como queimadas e exploração (GRAÇA et al., 2008).

3. Resultados e discussões

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da aplicação dos modelos de regressão das regiões de não mudança, que serviram para extrair o ângulo de rotação de cada par de bandas e de prover o algoritmo de rotação radiométrica.

Ao utilizar a técnica RCEN com imagens de mesmo sensor e obtidas em condições parecidas de imageamento é esperado que o ângulo de rotação seja próximo de 45° (SANTOS; MALDONADO; GRAÇA, 2005) e o distanciamento desse ângulo é devido à influência atmosférica

Tabela 2: Parâmetros obtidos a partir do modelo de regressão para cada par de bandas

Par de bandas	R ²	Coefficiente de inclinação (<i>m</i>)	O _i	ângulo de rotação (α)
V_2010_2013	0.901	1.1035	6.338	47.8168931°
IVP_2010_2013	0.933	0.99089	0	44.7378253°

(MALDONADO; SANTOS; GRAÇA, 2007). Os ângulos de rotação para os dois pares de banda utilizadas nesse trabalho próximos de 45°, como observado na Tabela 2, são decorrentes das características radiométricas semelhantes dos sensores TM e ETM+, além de pouca influência atmosférica. Ângulos de rotação semelhantes utilizando os mesmos sensores foram encontrados com a aplicação da RCEN para detecção de corte seletivo em zona de contato entre floresta estacional semidecídua e cerrado no Mato Grosso (GRAÇA et al., 2008). O ângulo um pouco mais distante de 45° no par de bandas do Vermelho (47.8°) em relação ao par do infravermelho próximo (44.7°) pode estar relacionado ao fato de que os comprimentos de onda no espectro do visível serem mais influenciados pelos espalhamentos atmosféricos do que no IVP.

A imagem de detecção final (IDet), produto da soma das imagens intermediárias de detecção oriundas da rotação radiométrica, apresenta valores contínuos entre 0 e 130.726410, com média = 59.802579 e desvio padrão = 6.836259. Após o fatiamento da IDet de acordo com o método estatístico, foi gerado o mapa de mudanças na paisagem pela rotulação em cinco classes, duas de regeneração da vegetação (moderada e forte), duas de degradação (moderada e forte) e uma de não mudança, como mostrado na Figura 1.

No período analisado, 83.91% (444,73 km²) se apresentou na classe de não mudança, enquanto 6.07% (32,21 km²) se caracterizou pela regeneração moderada e 2.01% (10,69 km²) pela regeneração forte, totalizando 8,08% de regeneração da vegetação. Por outro lado, 8,05% da paisagem apresentou-se na categoria temática de degradação, sendo 4.93% (26,17 km²) moderada e 3.12% (16,57 km²) forte.

As pequenas proporções de mudanças com predomínio de não mudança e o equilíbrio entre degradação e regeneração, evidenciando certa dinâmica, está relacionada ao curto período de tempo analisado (3 anos) e podem ser decorrentes do modo com que políticas de interesses econômico e social para ocupação da terra foram firmadas. Projetos de colonização já consolidados não levam à degradação em novas áreas e lotes abandonados favorecem a sucessão ecológica, enquanto políticas fundiárias e investimentos financeiros para o agronegócio são paulatinamente executados em menor ritmo na questão de ocupação da terra na região estudada.

Pode-se observar que as mudanças mais significativas na paisagem ocorreram na sua porção florestal, ao sul do rio Mucajaí, com 18.6 km² de degradação moderada e 10.81 km² de degradação forte, resultando em 68.8% da degradação total da paisagem nessa região, decorrente da expansão agropecuária. Esse resultado é condizente com a situação registrada pelo PRODES (2014), que mostra Mucajaí como o município com maior incremento no desflorestamento do estado de Roraima: 88 km² no período de 2010 a 2013. Por outro lado, houve regeneração de 33.32 km² na região florestal, sendo 9.67 km² de regeneração forte e 23.65 km² de regeneração moderada, que pode estar relacionada ao abandono de áreas agrícolas e de pastagens, decorrente do processo de sucessão ecológica.

Na região composta por fitofisionomias de savana houve regeneração de 7.3 km², apenas 17% da regeneração total, no entanto, apenas 0.8 km² caracterizados pela regeneração forte. As classes de regeneração indicadas nessa porção da paisagem aconteceram principalmente em zonas de mata ripícola e silvicultura. As classes de degradação, que somam 12.03 km² equilibrados entre degradação moderada e forte, são distribuídas em zonas de influência da BR-174, que liga Boa Vista a Manaus, passando por Mucajaí. Barbosa e Campos (2011) concluíram

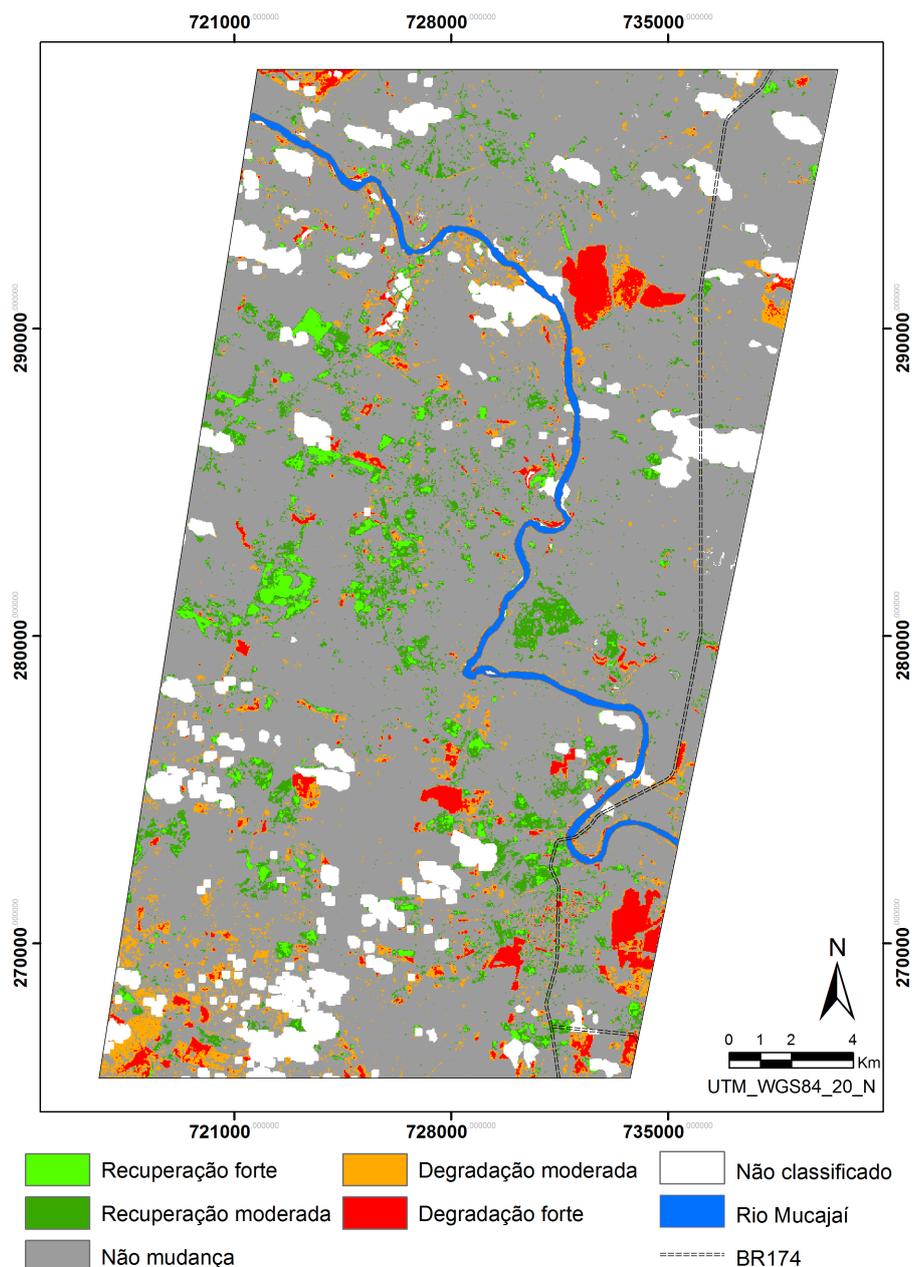


Figura 1: Mapa final de detecção de mudanças.

que o padrão de ações antropogênicas nas savanas de Roraima está associado à proximidade das rodovias que ligam à capital Boa Vista, o que também pode ser observado na região florestal, como detectado pela RCEN e mostrado na Figura 2.

Empregando a comparação pós-classificação supervisionada em uma área de estudo de maior abrangência, Pavanelli et al. (2014) detectaram regiões que foram mapeadas como floresta na primeira data (2010) e que na segunda data (2014) foram classificadas como capoeira (vegetação de sucessão ecológica em estágio inicial). Os autores apontaram para a possibilidade da degradação florestal ao invés de sucessão inicial, pois a resposta espectral dessas áreas pode causar confusão no classificador. A aplicação da RCEN contribuiu com o entendimento dessa situação, evidenciando a degradação moderada em áreas apontadas pela comparação pós-classificação como de mudança de floresta para capoeira (ex. Figura 3). Dessa forma, a RCEN mostra-se satisfatória em auxiliar a compreensão da dinâmica do uso e cobertura da terra nessa

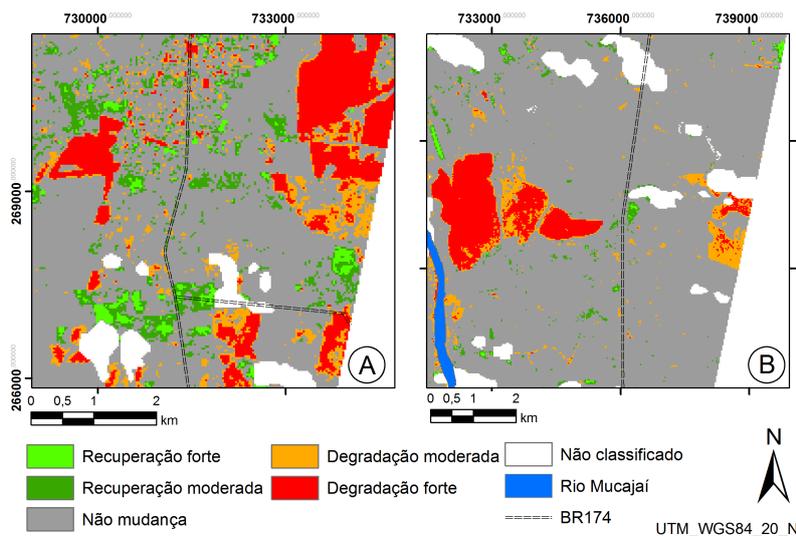


Figura 2: Áreas de degradação próximas à rodovia BR-174 e vicinais. A) Região florestal no município de Mucajaí; B) Região de savana no município de Boa Vista.

zona de tensão ecológica com fitofisionomias tão distintas ocupando a mesma paisagem.

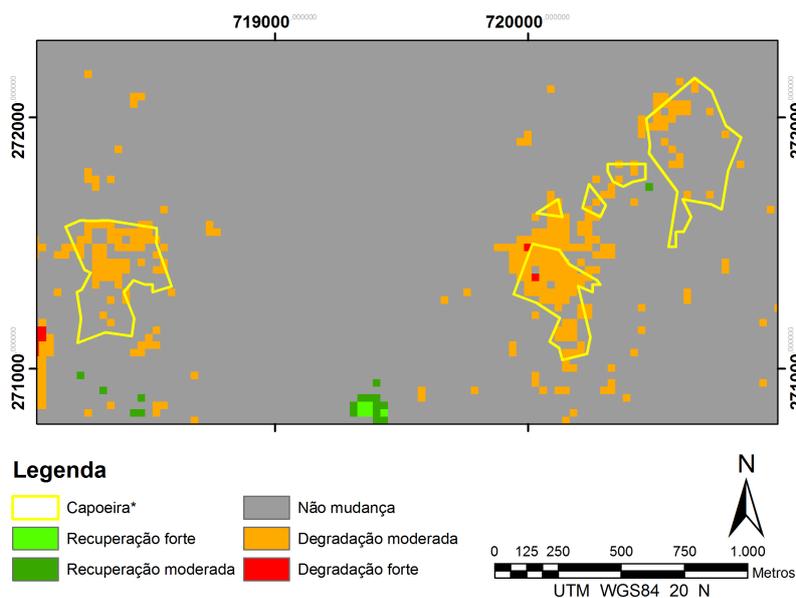


Figura 3: Degradação florestal detectada pela RCEN onde a comparação pós-classificação indicou para conversão de floresta para capoeira. *Polígonos amarelos representam áreas de conversão de "Floresta" para "Capoeira"(PAVANELLI et al., 2014).

4. Considerações finais

A técnica de rotação radiométrica controlada por eixo de não mudança (RCEN) se mostrou eficiente para detecção de mudanças na paisagem de tensão ecológica em Roraima, uma região que apresenta fitofisionomias bastante distintas, desde formações campestres até floresta ombrófila aberta, cuja confusão espectral para classificação a partir de imagens de sensores ópticos pode levar a dificuldades no estudo da dinâmica do uso e cobertura da terra nessa área.

Essa porção de Roraima apresenta cobertura de nuvens na maior parte do ano, dificultando o uso sistemático de imagens ópticas de mesmo sensor, o que poderia comprometer a detecção de mudanças na região. Assim a RCEN se mostra como uma técnica para detecção de mudanças de fácil aplicação e robusta que possibilita utilização de imagens de datas distintas provenientes de diferentes sensores, sem comprometer a qualidade do resultado final.

Por fim, enquanto degradação e regeneração se equilibram na porção florestal da paisagem, a degradação predomina nas savanas. Apesar de as intervenções antropogênicas acontecerem em ritmo menos acelerado em Roraima, se comparado com outros Estados da Amazônia brasileira, são necessárias medidas para a preservação desses diversos ecossistemas, como a criação de Unidades de Conservação, principalmente na região das savanas.

Referências

ARASATO, L. S. et al. Detecção de mudança na paisagem a partir de análise multisensor e multitemporal em associação com variáveis geomorfométricas no domínio da Floresta Atlântica. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 4, n. 64, p. 475–486, 2012.

BARBOSA, R. I.; CAMPOS, C. Detection and geographical distribution of clearing areas in the savannas ('lavrado') of Roraima using Google Earth web tool. *Journal of Geography and Regional Planning, Academic Journals*, 73023 Victoria Island Lagos Nigeria, v. 4, n. 3, p. 122–136, 2011.

GRAÇA, P. M. L. et al. Detecção de corte seletivo de madeira por técnica de rotação radiométrica na floresta Amazônica. *Ambiência*, v. 4, p. 97–106, 2008.

HUSSAIN, M. et al. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *{ISPRS} Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 80, n. 0, p. 91 – 106, 2013. ISSN 0924-2716.

MALDONADO, F. D. *Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do Semi-Arido*. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, Brasil, 2004.

MALDONADO, F. D.; SANTOS, J. R.; GRAÇA, P. M. L. Change detection technique based on the radiometric rotation controlled by no-change axis, applied on a semi-arid landscape. *Int. J. Remote Sens.*, Taylor & Francis, Inc., Bristol, PA, USA, v. 28, n. 8, p. 1789–1804, 2007. ISSN 0143-1161.

MALDONADO, F. D.; SANTOS, J. R. D.; CARVALHO, V. C. D. Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixaba, PE): Characterization by principal component analysis (PCA). *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 23, p. 5005–5013, 2002.

PAVANELLI, J. A. P. et al. Dinâmica do uso e cobertura da terra na região de transição entre floresta e savana no estado de Roraima. In: *Anais XI SENGEF*. [S.l.: s.n.], 2014.

PRODES. *Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite*. [S.l.], 2014. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>.

SANTOS, J. R.; MALDONADO, F. D.; GRAÇA, P. M. L. Integração de imagens Landsat/ETM+ e CBERS-2/CCD para detecção de mudanças em área da Amazônia sob domínio da floresta de transição. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 01, n. 57, p. 15 – 21, 2005.

SANTOS, J. R. et al. Change Detection in the Semi-Arid Landscape Using Radiometric Rotation Applied to Remote Sensing Data. In: *IGARSS*. [S.l.: s.n.], 2009.

SINGH, A. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 6, p. 989–1003, 1989.

XAUD, M. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; XAUD, H. A. M. Análise da dinâmica das mudanças de uso e cobertura da terra no sudeste de Roraima - Amazônia Setentrional, através da subtração de imagens-fração. In: *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. Foz do Iguaçu, PR, Brasil: [s.n.], 2013. p. 7523–7531.

ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E. Object-based cloud and cloud shadow detection in landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 118, p. 83 – 94, 2012. ISSN 0034-4257.