

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/4, Edição Especial Geoinformação e Análise Espacial: 717-731
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MINERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS DE MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA EM ESTUDOS DE DEGRADAÇÃO FLORESTAL

Land-Cover Change Trajectory Mining in Forest Degradation Studies

**Marcio Azeredo¹, Antônio Miguel Vieira Monteiro², Maria Isabel Sobral Escada²,
Karine Reis Ferreira², Lúbia Vinhas² & Taise Farias Pinheiro³**

¹Diretoria de Serviço Geográfico do Exército – DSG
Quartel General do Exército - Bloco “F” - 2º Piso - SMU, Brasília – DF, 70630-901, Brasil
azeredo.marcio@eb.mil.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Processamento de Imagens – DPI
Av. dos Astronautas, 1.758, Jd. da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010, Brasil
{miguel,isabel,karine,lubia}@dpi.inpe.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST
Av. dos Astronautas, 1.758, Jd. da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010, Brasil
taisefarias@hotmail.com

Recebido em 9 de Fevereiro, 2015/ Aceito em 7 de Agosto, 2015
Received on February 9, 2015/ Accepted on August 7, 2015

RESUMO

A cobertura da terra encontra-se em constante transformação devido aos diferentes fatores que influenciam a sua utilização e destinação. Essas alterações observadas ao longo do tempo definem o que chamamos de Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra. Tais trajetórias, uma vez caracterizadas, podem fornecer informações valiosas acerca de diferentes processos ambientais, como por exemplo, a degradação florestal. No entanto, existem poucas ferramentas disponíveis para a caracterização de trajetórias de mudança de cobertura da terra, pois a maior parte da literatura sobre trajetórias considera o conceito no contexto de estudo dos objetos móveis, com outra semântica associada. Com o objetivo de extrair e caracterizar trajetórias no contexto da mudança de cobertura da terra, este trabalho aproveita os conceitos já existentes sobre trajetórias e apresenta uma redefinição para alguns dos padrões de comportamento usualmente utilizados no contexto das trajetórias de objetos móveis. Para demonstrar suas possibilidades de utilização, foram conduzidos dois experimentos em uma base de dados de degradação florestal da região amazônica, onde os resultados permitiram identificar e caracterizar algumas das trajetórias presentes.

Palavras chaves: Trajetórias, Mudança de Cobertura, Padrões de Comportamento.

ABSTRACT

Land cover is changing as a consequence of different factors which influence its use and purpose. These observed changes over time and space define what we call Land-Cover Change Trajectories. Once characterized, such trajectories could provide valuable information on environmental issues as tropical forest degradation processes. However, there are few studies in the literature available tackling Land-Cover Change Trajectories Patterns detection and characterization.

Most of the literature on trajectories considers this concept in the moving objects domain, dealing mainly with punctual geocoded localizations. The purpose of this paper is to detect, extract and characterize patterns of trajectories related to forest degradation in the Land-Cover Change domain. To do this, we have taken from the moving objects literature some trajectory concepts of interest and we propose a redefinition of these moving patterns with their reframing in the Land-Cover Change domain. As a proof of concept, two experiments have been conducted using a forest degradation database collected over twenty-eight years (1984-2011) concerning Novo Progresso city in the Amazon region. The first results have allowed us to identify and characterize existing trajectories patterns and have shown to be a quite promising approach.

Keywords: Trajectories, Land-Cover Change, Behavior Patterns.

1. INTRODUÇÃO

O estado biofísico da superfície terrestre (cobertura da terra) encontra-se em constante processo de transformação ao longo do tempo, como consequência de diferentes fatores. No entanto, são as atividades promovidas pelo homem as principais responsáveis por influenciar tais mudanças (TURNER & MEYER, 1994). O aumento da demanda por recursos naturais, os movimentos migratórios e de expansão urbana, as pressões políticas, econômicas e históricas, por exemplo, não só induzem à ocorrência de transformações na cobertura da terra (LAMBIN & GEIST, 2007), mas também influenciam mudanças na sua utilização e destinação.

Ao longo das últimas décadas, os impactos ambientais têm alcançado níveis de magnitude e extensão sem precedentes (LAMBIN *et al.*, 2001). Degradação do solo, modificações na composição atmosférica, mudanças climáticas, alterações na biodiversidade, são algumas das principais consequências observadas. Desse modo, cresce a importância dos estudos sobre a dinâmica de mudança de cobertura da terra, na tentativa de estabelecer a relação entre as causas e os efeitos envolvidos em diferentes processos ambientais.

Impulsionado pelo avanço tecnológico na área de imageamento da superfície terrestre ocorrido ao longo dos últimos 30 anos (GIRI *et al.*, 2013; JIANYA *et al.*, 2008), o sensoriamento remoto tornou-se a maior fonte de dados para o mapeamento e monitoramento da dinâmica de mudança de cobertura da terra (LU *et al.*, 2014; COMBER *et al.*, 2008; VELDKAMP & LAMBIN, 2001). Como consequência, as imagens de satélite têm sido amplamente utilizadas na observação temporal e coleta de tais informações.

Considerando os diferentes tipos de

cobertura e seus contextos específicos de transformações, é possível observar a existência de alterações recorrentes, que capturadas ao longo do tempo sob diferentes dimensões da escala (GIBSON *et al.*, 2000), definem o que chamamos de Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra. Tais trajetórias, no contexto do estudo das coberturas florestais, podem fornecer informações sobre diferentes processos de transformação, como por exemplo, a degradação florestal.

Na degradação florestal, a cobertura é modificada de forma lenta e progressiva ao longo da superfície, afetando as características da vegetação (LAMBIN *et al.*, 2003). Com o objetivo de quantificar a porção de floresta degradada e qualificar a cobertura florestal correspondente, é possível particionar a região de estudo com o auxílio de uma grade regular. Desse modo, as propriedades das células são determinadas pela forma e pelo arranjo espacial das regiões desmatadas e de outras feições localizadas no seu interior que, por sua vez, caracterizam a degradação florestal (p. ex. cicatrizes de fogo, vegetação secundária e a própria cobertura florestal). Posteriormente, as mudanças observadas nas referidas propriedades são identificadas utilizando séries temporais de imagens de satélite, originando as trajetórias de mudança de cobertura da terra.

Trajetórias possuem propriedades que podem auxiliar no estudo dos atores e processos associados ao surgimento das mesmas. No entanto, ferramentas disponíveis para análise de trajetórias no contexto das mudanças de cobertura da terra são escassas, visto que a maior parte da literatura sobre trajetórias é aplicada aos objetos móveis. Neste caso, o foco principal é o estudo das propriedades geométricas das trajetórias de objetos pontuais representadas

por uma sequência de observações (LAUBE *et al.*, 2005).

Para auxiliar no estudo de trajetórias de objetos móveis, foi definido por Laube e Imfeld (2002) um conceito de análise denominado de REMO (*RElative MOtion*). O referido conceito permite, por intermédio da comparação dos atributos dos objetos pontuais ao longo do espaço e do tempo, a construção de uma variedade de padrões de comportamento. Tais padrões podem se repetir dentro da mesma trajetória ou entre trajetórias distintas, e visam caracterizá-las com base nas similaridades observadas em propriedades como velocidade, variação de velocidade e azimute (BOGORNÝ & BRAZ, 2012).

No contexto das trajetórias de mudança de cobertura da terra, não há sentido em utilizar, como no contexto dos objetos móveis, propriedades como velocidade, variação de velocidade e azimute. Neste domínio, os objetos pontuais são substituídos por uma unidade de análise poligonal com geometria e localização fixas (p. ex. célula, grade, *pixel*). Existe ainda uma dimensão temporal e uma dimensão descritiva da trajetória que são fundamentais neste contexto. A primeira está relacionada aos *instantes inicial e final*, assim como ao *passo de tempo* no qual as propriedades das unidades de análise são mensuradas. A segunda, pode ser representada por um vetor de propriedades das referidas unidades (p. ex. células) que variam ao longo do tempo, como por exemplo, a proporção de desmatamento no seu interior, ou ainda, por propriedades das próprias trajetórias, como intensidade e consistência.

É fato que na literatura sobre trajetórias, no contexto das mudanças de cobertura da terra, não são encontradas ferramentas que auxiliem na busca por padrões de similaridade entre as mesmas. Assim como também não é possível aplicar diretamente, neste domínio, aportes conceituais e metodológicos que vieram dos estudos de trajetórias para objetos móveis. A interpretação, ou seja, os significados para os padrões de comportamento apresentados na literatura referencial para objetos móveis, não se aplicam quando observamos o contexto dos fenômenos associados às mudanças de cobertura da terra. Nesse cenário, este artigo apresenta uma proposta de releitura conceitual que dá

origem a adaptações nos conceitos existentes na literatura que trata de objetos móveis. A partir desta “*ressignificação conceitual*”, o conjunto de padrões de comportamento para as trajetórias de cobertura é estabelecido, sendo utilizado na determinação das propriedades das trajetórias em contextos de estudos de mudança de cobertura da terra.

Este estudo apresenta uma nova possibilidade para a extração e caracterização de padrões de trajetórias de mudança de cobertura, no domínio do problema da degradação florestal. A ideia central é a redefinição dos *Padrões Comportamentais de Convergência, Encontro, Flock, Liderança e Detecção de Anomalias*, construídos na literatura de objetos móveis (LAUBE *et al.*, 2005), porém ressignificados à luz dos problemas no domínio das mudanças de cobertura da terra, acrescidos do *Padrão de Detecção de Inconsistências*.

Como prova de conceito para as propostas apresentadas neste artigo, foram conduzidos dois experimentos sobre dados de degradação florestal referentes ao município de Novo Progresso – PA, produzidos por Pinheiro *et al.* (2016). O primeiro experimento utilizou o *Padrão de Detecção de Inconsistências* para investigar a presença de inconsistências nas trajetórias como consequência de problemas no processo de classificação das coberturas. No segundo, foi aplicado o *Padrão de Convergência* na investigação das trajetórias que convergiram para a ausência de cobertura florestal, caracterizando as mesmas em função da intensidade com a qual ocorreram.

Com os resultados obtidos nos experimentos, pretende-se demonstrar que é possível utilizar conceitos de trajetórias de objetos móveis para mineração de trajetórias de mudança de cobertura da terra. Em trabalhos futuros, uma vez identificadas e caracterizadas tais trajetórias, será possível confrontá-las com atores e processos já conhecidos na região de estudo. Desse modo, buscar-se-á estabelecer uma relação de causa (processo conhecido) *versus* efeito (trajetória caracterizada).

2. TRABALHOS RELACIONADOS

No contexto dos objetos móveis, as trajetórias são constituídas de sequências finitas de posições referenciadas no tempo. Desse

modo, são representadas por uma poligonal que interliga um conjunto de n pontos, cujas localizações são conhecidas por t instantes consecutivos (GUDMUNDSSON *et al.*, 2004). Como consequência, são utilizadas para modelar diferentes fenômenos em diversos domínios de aplicação, como em Wu *et al.* (2009) e Vu *et al.* (2013), no estudo de migração de espécies animais; em Kratz e Nishino (2009), na detecção de movimentos em multidões; e Guo *et al.* (2010) e Mirge *et al.* (2014) no estudo de padrões de deslocamento de veículos.

Segundo Bogorny e Braz (2012), para que os dados de trajetórias sejam interpretados corretamente, são necessárias novas técnicas, métodos e algoritmos, que possibilitem a extração de um conhecimento útil e aplicável no contexto de estudo desejado. Com esse propósito, o REMO foi definido por Laube e Imfeld (2002). Posteriormente, o referido trabalho foi estendido para comportar o conceito de restrição espacial, tomando como base a premissa de que o movimento dos objetos é influenciado pelo movimento de outros objetos na mesma região (LAUBE *et al.*, 2005). Naquela oportunidade, também foram definidos alguns padrões de comportamento com o objetivo de relacionar os diferentes movimentos observados, como os Padrões de Convergência, Encontro, *Flock* e Liderança.

Outros padrões surgiram com o propósito semelhante de extrair conhecimentos implícitos em bases de dados de trajetórias, como por exemplo, o *Padrão de Detecção de Anomalias*. Nesse caso, o valor da propriedade referente ao movimento de um objeto, também chamado de *outlier*, difere de forma significativa das respectivas propriedades dos demais objetos (AQUINO *et al.*, 2013). Tal cenário criou uma literatura robusta e atual sobre trajetórias no domínio dos objetos móveis, mas que no entanto, não pode ser aplicada diretamente em outros contextos nos quais a semântica da trajetória seja diferente.

Nos estudos sobre a mudança de cobertura da terra, a base para a constituição das trajetórias é a identificação de diferenças na resposta espectral do *pixel*, observada em dois ou mais instantes distintos. Segundo Coppin *et al.* (2004) e Zhou *et al.* (2008a), são duas as abordagens principais nesse sentido: a Detecção por

Mudança Direta, que é baseada na comparação entre medições realizadas em duas imagens obtidas em diferentes instantes (SINGH, 1989; LU *et al.*, 2004; COPPIN *et al.*, 2004; ZHOU *et al.*, 2008b; THÉAU, 2012); e a Detecção por Trajetórias de Mudança, que utiliza séries temporais de índices de vegetação (p. ex. NDVI e EVI) obtidas por intermédio de sensores orbitais (LUNETTA *et al.*, 2006; BORIAH *et al.*, 2008).

Na Detecção por Trajetórias de Mudança, as imagens são segmentadas de forma a agrupar os *pixels* adjacentes com comportamento espectral semelhante (KORTING *et al.*, 2013). Esta estratégia, no caso do estudo da degradação florestal, permite criar bases de dados temporais de polígonos de degradação. Posteriormente, algoritmos de mineração de dados são utilizados sobre tais bases para extrair os padrões espaciais de desmatamento existentes.

Com o objetivo de extrair padrões de desmatamento, Silva *et al.* (2005) propuseram uma metodologia composta pelas seguintes etapas: definição de uma tipologia de padrões de acordo com o domínio de estudo; construção de conjunto de amostras a ser utilizado como referência; utilização de métricas da ecologia da paisagem para quantificar as propriedades de forma e arranjo espacial dos polígonos de desmatamento; e mineração de todo o conjunto de dados utilizando um algoritmo de classificação.

Na etapa de definição da tipologia, uma grade celular sobre os polígonos de degradação foi utilizada em Ruiz e Domon (2009), Kayhko *et al.* (2011) e Gavlak *et al.* (2011), com diferentes resoluções espaciais. Nesse caso, a escolha da resolução espacial da célula é um parâmetro essencial para a criação da tipologia dos padrões que serão minerados. No entanto, depende diretamente do contexto de estudo e do auxílio de um especialista.

Para quantificar as propriedades de forma e o arranjo espacial dos polígonos de desmatamento no interior das células, métricas da Ecologia da Paisagem foram utilizadas por Filho e Metzger (2006), Silva *et al.* (2008) e Gavlak *et al.* (2011). Em Saito *et al.* (2011), algumas dessas métricas foram analisadas para verificar a sua sensibilidade em relação à variação do tamanho das células associadas aos padrões de desmatamento. Uma vez quantificadas as propriedades de degradação

das células, um algoritmo de classificação foi utilizado para rotular toda a base de dados. Cabe ressaltar que na maior parte dos trabalhos foi utilizado o algoritmo baseado em Árvore de Decisão C4.5 (QUINLAN, 1993).

Uma vez classificados os padrões de cobertura, os resultados correspondentes podem ser quantificados e apresentados sob a forma de área total (SILVA *et al.*, 2008) e porcentagem correspondentes aos padrões de cobertura definidos (KAYHKO *et al.*, 2011). Para relacionar as trajetórias com as suas possíveis causas, dados socioeconômicos podem ser utilizados, como em Mena (2008), Zhou *et al.*, 2008a e Zhou *et al.*, 2008b. Para cada sequência de padrões de tipologia utilizada para classificar as unidades de análise, uma trajetória de mudança de cobertura da terra é associada.

A tarefa de caracterização e descrição das propriedades das trajetórias de cobertura da terra pode ser definida em duas etapas: i) agrupamento das trajetórias utilizando o contexto de estudo para a definição de uma tipologia de trajetórias; e ii) mineração das tipologias de trajetórias utilizando técnicas, métodos e algoritmos para a extração de algumas de suas propriedades.

Observou-se que em todos os trabalhos que buscaram avançar no estudo das trajetórias, como em Mena (2008), Zhou *et al.* (2008a), Ruiz e Domon (2009) e Gavlak *et al.* (2011), o agrupamento das trajetórias foi realizado utilizando como critério o domínio de classificações de cobertura existentes nas trajetórias. Foram ainda observadas classificações do tipo “trajetórias dominantes”, tomando como base a quantidade de ocorrências; “contínuas”, considerando uma cobertura constante ao longo de toda a trajetória (RUIZ e DOMON, 2009); e outras baseadas nos possíveis agentes motivadores (ZHOU *et al.*, 2008a). Como consequência, cresce a necessidade de técnicas, métodos e algoritmos que ofereçam novas possibilidades de análise sobre trajetórias de mudança de cobertura da terra, ainda que adaptadas de outros contextos de estudo.

3. PADRÕES DE COMPORTAMENTO DE TRAJETÓRIAS NO CONTEXTO DOS OBJETOS MÓVEIS

Ao longo do tempo, diferentes padrões de comportamento foram definidos e aplicados

no estudo de objetos móveis (AQUINO *et al.*, 2013). Dentre os padrões existentes, encontram-se os Padrões de Convergência, Encontro, *Flock*, Liderança e Detecção de Anomalias, cujas definições são resumidas a seguir (LAUBE *et al.*, 2005; JEUNG *et al.*, 2011):

- *Convergência* (n, r): caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n objetos que chegarão, não necessariamente no mesmo instante, à região do espaço delimitada por uma circunferência de raio r , caso mantenham seus respectivos azimutes.
- *Encontro* (n, r): definido por um conjunto de, no mínimo, n objetos que chegarão simultaneamente à região do espaço delimitada por uma circunferência de raio r , caso mantenham as suas respectivas velocidades e azimutes.
- *Flock* (n, k, r): determinado por um conjunto de, no mínimo, n objetos que se movem juntos por pelo menos k instantes de tempo consecutivos, enquanto permanecem no interior da região do espaço delimitada por uma circunferência de raio r .
- *Liderança* (n, k, r): caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n objetos que se movem juntos por pelo menos k instantes de tempo consecutivos, enquanto permanecem no interior da região do espaço delimitada por uma circunferência de raio r . O objeto que antecipa os azimutes dos demais é denominado *objeto líder*.
- *Detecção de Anomalias* (n, q, r): definido por um conjunto de n objetos, no qual as trajetórias de até q elementos diferem suas propriedades de movimento de forma significativa, se comparada com os demais objetos, considerando a região do espaço delimitada por uma circunferência de raio r .

Desse modo, considerando uma região R delimitada por uma circunferência de raio igual a 50m, são exemplificados na Figura 1 os seguintes padrões: *Convergência* ($2, 50$), caracterizado por pelo menos dois objetos (O_1, O_2 e O_3) que chegarão à região R , não necessariamente ao mesmo tempo, caso mantenham seus respectivos azimutes; e *Encontro* ($2, 50$), definido por pelo menos dois objetos (O_2 e O_3), que chegarão à região R no mesmo instante (t_2).

Na Figura 2, são apresentados exemplos

dos padrões *Flock* (2, 2, 50), determinado por pelo menos dois objetos (O_4 e O_6) que se movem juntos dentro da região R , por pelo menos dois instantes de tempo consecutivos (t_2 e t_3); *Liderança* (2, 3, 50), caracterizado por pelo menos dois objetos (O_4 e O_5), que se movem dentro da região R , por pelo menos três instantes de tempo consecutivos, onde o objeto líder O_4 antecipa os movimentos de O_5 ; e ainda o da *Deteccção de Anomalias* (3, 1, 50), determinado por um conjunto de três objetos (O_4 , O_5 e O_6), no qual o movimento de até um objeto (O_6), no interior da região R , difere o azimute de forma significativa, se comparado com os movimentos dos demais.

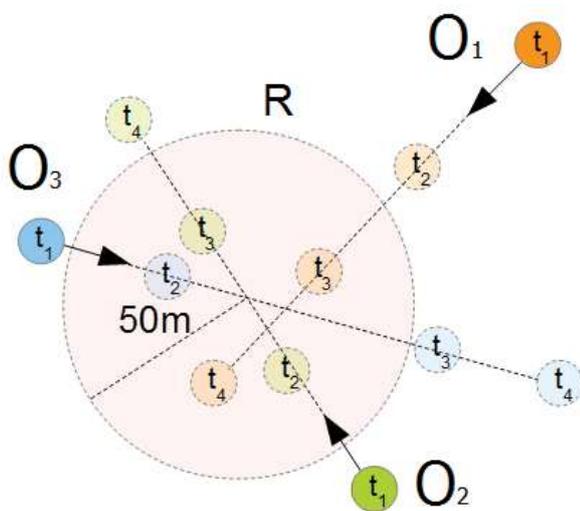


Fig. 1 – Padrões de Convergência e Encontro no contexto dos objetos móveis.

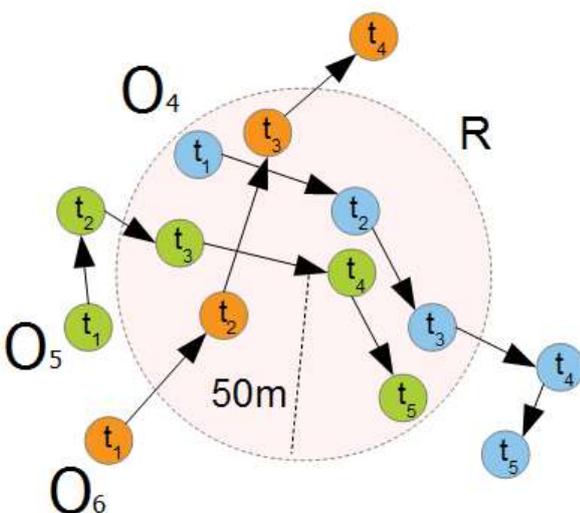


Fig. 2 – Padrões Flock, Liderança e Deteccção de Anomalias no contexto dos objetos móveis.

4. PADRÕES DE COMPORTAMENTO DE TRAJETÓRIAS NO CONTEXTO DA MUDANÇA DE COBERTURA

No contexto da mudança de cobertura da terra, as trajetórias são definidas como uma sequência de classificações de padrões de cobertura da terra (estados), que variam ao longo do tempo (ZHOU *et al.*, 2008b). No caso específico deste trabalho, cada trajetória está associada a uma célula, com geometria e localização fixas.

Nesta seção, são redefinidos os padrões comportamentais de trajetórias de objetos móveis para trajetórias de mudança de cobertura da terra. Além dos padrões apresentados na seção anterior, foi definido um novo chamado de *Padrão de Deteccção de Inconsistências*.

Antes da redefinição propriamente dita dos padrões de comportamento, algumas considerações devem ser feitas *a priori*. Uma *Janela Temporal* j é representada pela tupla (t_i, t_f, p) , em que t_i é o instante inicial, t_f o instante final e p é o passo de tempo considerado no interior da janela; uma *Vizinhança* V é definida por qualquer relação de proximidade entre o conjunto de dados; a *Intensidade* i mede a rapidez de ocorrência do padrão dentro da janela temporal, sendo definida por um intervalo de tempo no qual o padrão ocorre (t_i, t_f) ; e a *Sequência de Estados* s corresponde a um vetor sequencial de estados que constituem uma trajetória ou subtrajetória.

No caso dos padrões de trajetórias de mudança de cobertura da terra, a região não é mais utilizada como um critério que define a existência do padrão. Neste caso, a região define uma restrição espacial na qual o padrão será pesquisado. As redefinições desses padrões são descritas a seguir:

- *Convergência* (n, V, e, i, j) : caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias em uma determinada vizinhança V , que modificam suas classificações de cobertura para um estado e , com intensidade de convergência i , não necessariamente ao mesmo tempo, a partir do qual não há mais qualquer alteração no interior da janela temporal j . Para caracterizar a convergência em j , existem duas condições que devem ser satisfeitas: a) os dois últimos estados de

cada célula devem ser iguais ao estado de convergência; e b) deve existir na trajetória da célula ao menos um estado diferente do estado e . O objetivo deste Padrão é caracterizar a existência de convergência para um determinado estado, assim como a intensidade da mesma, que pode estar associada a algum fator motivador.

- *Encontro* (n, V, e, t): determinado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias em uma determinada vizinhança V , que possuem o estado e no instante t . Este padrão tem o propósito de identificar as trajetórias que possuem uma transição simultânea para um estado final específico. Desse modo, é possível identificar quais trajetórias sofreram influência de um determinado fator motivador da mudança de estado.
- *Flock* (n, V, s, t): caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias de uma determinada vizinhança V , que possuem a mesma sequência de estados s iniciada no instante t . Neste caso, procura-se identificar as trajetórias que possuam transições de estado simultâneas ao longo do tempo, iniciadas no mesmo instante. Tal evolução pode estar relacionada com algum processo específico.
- *Liderança* (n, V, s, j): caracterizado por um conjunto de, no mínimo, n trajetórias em uma determinada vizinhança V , que possuem a mesma sequência de estados s no interior da janela temporal j . Neste caso, a sequência s que ocorrer primeiro, determina as trajetórias líderes. Tem o propósito de identificar as trajetórias que podem ter influenciado a ocorrência de outras similares, ou identificar processos ainda no seu estágio inicial.
- *Detecção de Anomalias* (q, V, A, j): caracterizado por um conjunto de até q trajetórias que possuem alguma transição de estado pertencente ao conjunto A . Tal conjunto contém as transições definidas como anômalas no contexto de estudo, ou seja, as transições são factíveis, mas não deveriam ter ocorrido no interior da janela temporal j e/ou na vizinhança V . O conjunto A deve ser definido com o auxílio de um especialista, sendo as transições representadas pela tupla (e_i, e_f, p) , em que e_i é o estado inicial da transição, e_f o estado final

da transição e p o passo de tempo no qual a transição ocorre. Desse modo, o padrão pode auxiliar na investigação de novos atores e processos até então desconhecidos na região e que possam influenciar as transições.

- *Detecção de Inconsistências* (I, V): determinado por um conjunto de trajetórias em uma vizinhança V , que possuem em suas respectivas trajetórias alguma transição de estado pertencente ao conjunto I . Tal conjunto contém as transições definidas como inconsistentes no contexto de estudo, que não são factíveis em tempo algum. O conjunto I deve ser definido com o auxílio de um especialista, sendo as transições representadas pela tupla (e_i, e_f, p) , em que e_i é o estado inicial da transição, e_f o estado final da transição e p o passo de tempo no qual a transição ocorre. O objetivo é identificar a presença de inconsistências no processo de classificação das coberturas. Em função dos problemas encontrados, é possível isolar tais trajetórias para que as mesmas não influenciem outras análises.

Seja a vizinhança $V = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6\}$, a janela temporal $j = (t_1, t_5, I)$; o conjunto de transições anômalas entre estados $A = \{(Y, Y, I)\}$; o conjunto de transições inconsistentes entre estados $I = \{(X, Y, I)\}$; as sequências de transições entre estados $s = (Z \rightarrow Y \rightarrow X)$; e a intensidade $i = (t_2, t_3)$. São apresentados na Figura 3 os seguintes exemplos de aplicações dos padrões redefinidos: *Convergência* ($2, V, X, i, j$), caracterizado por no mínimo duas trajetórias (C_1 e C_3) pertencentes à vizinhança V , que modificam suas classificações de cobertura para o estado X , entre os instantes t_2 e t_3 , não havendo alteração posterior; *Encontro* ($3, V, Z, t_2$), determinado por ao menos três trajetórias (C_1, C_2 e C_3) pertencentes à vizinhança V , que possuem o estado Z no instante t_2 ; e *Detecção de Inconsistências* (I, V), determinado pela trajetória C_2 , que possui a transição $X \rightarrow Y$, ocorrida em um passo de tempo, definida como inconsistente em qualquer momento.

Na Figura 4, é possível observar os seguintes padrões redefinidos: *Flock* ($2, V, s, t_3$), caracterizado por ao menos duas trajetórias (C_4 e C_5) pertencentes à vizinhança V , que modificam seus estados simultaneamente na mesma sequência s ($Z \rightarrow Y \rightarrow X$), iniciada em t_3 ; *Liderança* ($3, V, s, j$), determinado por ao

menos três trajetórias (C_4 , C_5 e C_6) pertencentes à vizinhança V , que modificam seus estados na mesma sequência s ($Z \rightarrow Y \rightarrow X$) iniciada no interior da janela j , sendo a trajetória C_6 considerada a líder; e *Detecção de Anomalias* ($2, V, A, j$), caracterizado por até duas trajetórias (C_6), que possuam no interior da janela j a transição $Y \rightarrow Y$, ocorrida em um passo de tempo, definida como anômala.

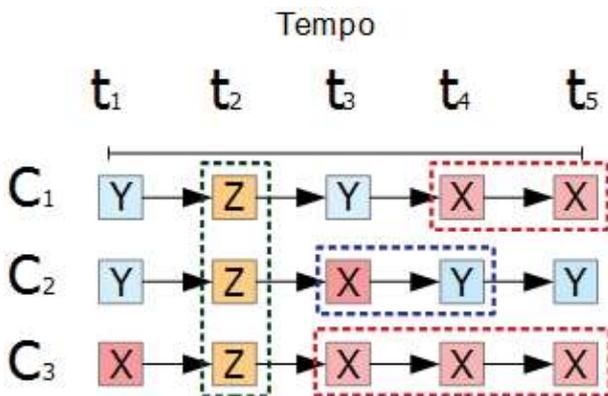


Fig. 3 – Padrões de Convergência, Encontro e Detecção de Inconsistências no contexto da mudança de cobertura da terra.

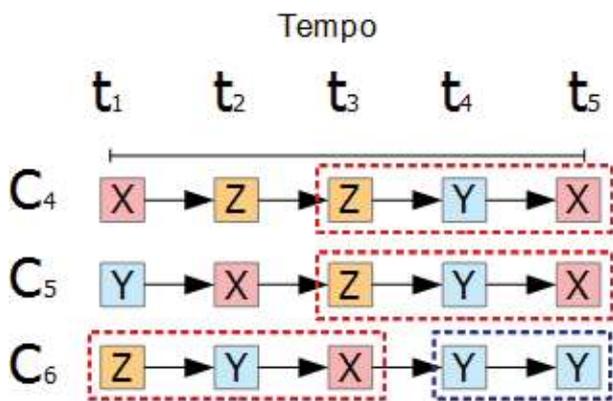


Fig. 4 – Padrões de *Flock*, Liderança e Detecção de Anomalias no contexto da mudança de cobertura da terra.

5. MINERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS DE MUDANÇA DE COBERTURA DA TERRA

Com o propósito de extrair conhecimentos implícitos em bases de dados de cobertura da terra, os padrões de comportamento redefinidos foram utilizados em dois experimentos.

5.1 Área de Estudo

A área selecionada para o presente estudo corresponde à cena 225/65 do satélite Landsat 5

TM que abrange o município de Novo Progresso, localizado na porção sudoeste do estado do Pará (PA). Trata-se de uma região inserida no Bioma Amazônia, com população estimada de 25.169 habitantes, área de 38.162,134 km² (IBGE, 2014), onde a exploração madeireira é realizada quase sempre de forma ilícita, sem manejo, trazendo consequências diretas para o ecossistema florestal (PINHEIRO *et al.*, 2016), iniciando processos de degradação dessa cobertura.

5.2 Metodologia

As etapas principais envolvidas na metodologia de caracterização das trajetórias de mudança de cobertura são apresentadas na Figura 5. No caso deste trabalho, o foco é a quarta etapa, uma vez que se partiu de uma base de dados de degradação florestal já classificada. No entanto, todas as etapas são descritas a seguir:

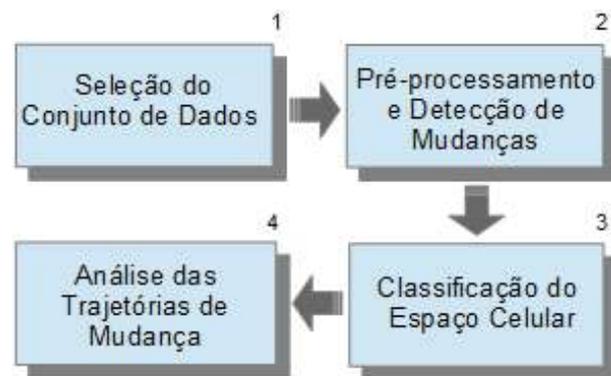


Fig. 5 – Resumo da metodologia de caracterização das trajetórias de mudança de cobertura da terra.

5.2.1 Seleção do Conjunto de Dados

Para a execução dos experimentos apresentados no final desta seção, foi utilizada a base de dados de degradação florestal produzida por Pinheiro *et al.* (2016). Trata-se de uma base com 27.446 trajetórias de mudança de cobertura classificadas ao longo de 28 anos (1984 - 2011).

5.2.2 Pré-processamento e Detecção de Mudanças

As imagens Landsat 5 TM foram obtidas em um período no qual a influência das nuvens é minimizada (junho a setembro), além do fato de que já haviam sido corrigidas geometricamente. Para a detecção de mudanças, foi utilizado um

método semiautomático para gerar os polígonos de degradação florestal. Tal método, exclui, a partir da máscara de desmatamento do Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES) (CÂMARA *et al.*, 2006), as áreas desmatadas por corte raso e outras feições que não eram de interesse, como a rede de drenagem e as áreas que não apresentavam originalmente fisionomia florestal.

5.2.3 Classificação do Espaço Celular

Para capturar de forma apropriada a variação da degradação florestal tomando como base os polígonos de desmatamento, particionou-se a região de estudo com o auxílio de uma grade regular utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) *TerraView* (CÂMARA *et al.*, 2008). Ao todo, foram geradas 27.446 células com 1km x 1km de resolução espacial, cobrindo toda a área de estudo. Segundo Pinheiro *et al.* (2016), a escolha da resolução considerou o tamanho médio dos polígonos de degradação gerados na fase anterior. No entanto, poderia ter sido utilizado outro critério, desde que condizente com o objetivo do estudo.

Uma vez definido o espaço celular, os diferentes estágios de degradação foram associados a uma semântica e a um padrão espacial. Posteriormente, foram utilizadas métricas da paisagem para quantificar as propriedades de forma e o arranjo espacial dos polígonos de desmatamento dentro de cada uma das 27.446 células. De posse dos valores calculados sobre 48 amostras representativas do conjunto de dados, o algoritmo de classificação C4.5 (QUINLAN, 1993) foi treinado e utilizado para classificar 768.488 coberturas em função dos níveis de degradação definidos na Tabela 1, ou seja, todas as células ao longo dos 28 anos de observação.

5.2.4 Análise das Trajetórias de Mudança

Após a classificação das células em função da tipologia de padrão de desmatamento definida na Tabela 1, as sequências correspondentes às trajetórias foram agrupadas por Pinheiro *et al.* (2016) em quatro classes principais: i) *Forest Persistence*, na qual não houve mudanças na cobertura de floresta desde o ano de 1984, ou seja, apresenta somente a classe de degradação floresta (16.079 trajetórias); ii) *Cleared*, na qual houve a

substituição completa da cobertura de floresta por solo exposto no período de um ano, não sendo detectados eventos associados à degradação florestal. Desse modo, são encontradas somente as classes de degradação floresta e solo exposto (5.211 trajetórias); iii) *Degradation Cleared*, na qual foram detectados estados associados à degradação florestal, culminando com a substituição total da floresta por solo exposto, ou seja, são encontrados estados de degradação, floresta e solo exposto (2.381 trajetórias); e iv) *Degradation Persistence*, na qual, apesar de identificados eventos associados à degradação florestal, a floresta não foi totalmente substituída por solo exposto, ou seja, são encontrados somente a classe de degradação floresta e algum estado de degradação (3.775 trajetórias).

Tabela 1: Tipologia de degradação florestal

Classe de Degradação	Nível de Degradação
Floresta	0
Processo inicial de degradação florestal	0,1 – 0,3
Processo moderado de degradação florestal	0,4 – 0,6
Processo avançado de degradação florestal	0,7 – 0,9
Solo exposto	1

Fonte: Pinheiro *et al.* (2016).

Considerando os critérios utilizados de agrupamento das trajetórias, observou-se a predominância de trajetórias onde não foram identificados quaisquer níveis de degradação na cobertura florestal (59,58%). No entanto, existe um montante significativo de 41,42% das trajetórias com algum nível de degradação (entre 0,1 e 0,9) ou que culminam com a remoção completa da cobertura florestal (1).

5.3 Primeiros Testes: Resultados

Com o objetivo de demonstrar esta nova possibilidade de análise e a caracterização das trajetórias de mudança de cobertura, foram realizados dois experimentos utilizando os Padrões Comportamentais de Convergência e Detecção de Inconsistências. Ambos os padrões foram implementados na linguagem C++ utilizando a biblioteca geográfica *TerraLib* (CÂMARA *et al.*, 2008) na sua versão 4.2.2. Trata-se de uma biblioteca computacional com o código-fonte aberto, distribuição livre, concebida

para servir como base para o desenvolvimento colaborativo na comunidade de usuários ou desenvolvedores de SIGs (CASANOVA *et al.*, 2005).

5.3.1 Experimento 1: Padrão de Detecção de Inconsistências

Neste experimento, o padrão é utilizado para procurar inconsistências em transições de estado na base de dados. Para tal, algumas transições foram definidas como não factíveis, como por exemplo, o retorno à floresta madura no ano subsequente à remoção completa da cobertura florestal, ou à identificação de um nível elevado de degradação.

Sendo assim, seja a vizinhança $V = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_{27446}\}$; a janela temporal $j = (t_1, t_{28}, I)$; e o conjunto de transições inconsistentes $I = \{(1; 0; 1), (0,9; 0; 1), (0,8; 0; 1), (0,7; 0; 1)\}$, parâmetros definidos por um especialista como não factíveis no contexto de estudo (Tabela 2).

Uma vez definidos os parâmetros, o objetivo do presente experimento é minerar, na base de dados, as trajetórias que possuem inconsistências em suas transições de estado, utilizando o padrão de *Detecção de Inconsistências (I, V)*.

Tabela 2: Domínio de transições inconsistentes

Transição Inconsistente (e_i, e_f, p)	Descrição
(1; 0; 1)	O solo exposto (1) é substituído pela floresta (0) no período de um passo de tempo (1).
(0,9; 0; 1)	Um nível avançado de degradação (0,7 – 0,9) que volta a ser floresta (0) no período de um passo de tempo (1).
(0,8; 0; 1)	
(0,7; 0; 1)	

Desse modo, são mineradas todas as classes de trajetórias existentes na base de dados, anualmente classificadas ao longo de 28 anos (1984 – 2011) (Figura 6).

Como resultado, foi possível identificar e classificar como inconsistentes as trajetórias que possuíam alguma transição pertencente ao conjunto I . Após a aplicação do padrão de detecção de inconsistências, 38 trajetórias (células) apresentaram algum tipo de transição inconsistente, o que corresponde a 0,13% do conjunto total de dados (Tabela 3).

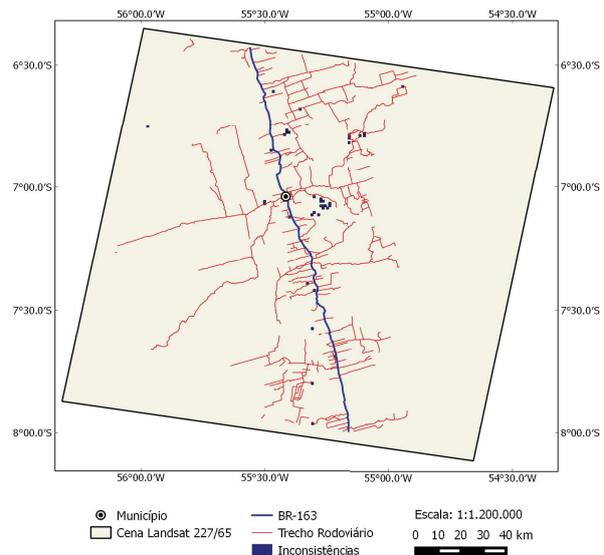


Fig. 6 – Resultado do Experimento 1: Padrão de Detecção de Inconsistências.

Tabela 3: Quantificação das transições inconsistentes

Transição Anual	Inconsistências Encontradas
1984 → 1985	03
1985 → 1986	05
1998 → 1999	02
1999 → 2000	05
2001 → 2002	17
2003 → 2004	01
2009 → 2010	05
Total:	38

A quantidade de células inconsistentes encontradas é um valor insignificante se comparado com o total de trajetórias na base de dados. No entanto, pode fornecer informações interessantes se observada separadamente. Foi possível verificar, por exemplo, que 44,73% (17 trajetórias) das inconsistências encontradas ocorreram na transição entre os anos de 2001 e 2002, o que sugere a ocorrência de algum problema no processo de classificação das coberturas nesse período.

Também é possível identificar visualmente pequenos agrupamentos de células com trajetórias inconsistentes. Tal fato pode estar relacionado com a presença de nuvens na fase de Pré-processamento e Detecção de Mudanças. Diante dos resultados obtidos, é possível refazer o processo de classificação ou isolar as trajetórias para que não comprometam outras análises.

5.3.2 Experimento 2: Padrão de Convergência

Seja V o conjunto de todas as células pertencentes às classes de trajetória *Cleared* e *Degradation Cleared*; duas janelas temporais $j_1 = (t_1, t_{14}, I)$ e $j_2 = (t_{15}, t_{28}, I)$; e quatro valores de intensidade (Tabela 4).

Tabela 4: Parâmetros de intensidade da convergência

Intensidade	Descrição
Alta Convergência (1 – 5)	Converge em até 5 anos (inclusive).
Média Convergência (6 – 11)	Converge entre 6 e 11 anos (inclusive).
Baixa Convergência (12 – 14)	Converge a partir de 12 anos (inclusive).

Os parâmetros de intensidade de convergência foram definidos com a ajuda de um especialista, sendo aplicados a cada uma das janelas temporais definidas (j_1 e j_2). Neste experimento, a definição das janelas temporais considerou o intenso processo de ocupação na região (ESCADA *et al.*, 2009), em função da expectativa causada pela notícia do início da pavimentação, por volta de 1998, da rodovia BR-163. Tal rodovia corta toda a região de estudo e influenciou os processos de desmatamento e degradação florestal. Em 2000, de acordo com o PRODES, o município de Novo Progresso tinha cerca de 4,5% de sua área desmatada; em 2011, a área praticamente triplicou, passando para mais de 14%.

A seguir, são apresentados os resultados das pesquisas realizadas.

- *Convergência (1, V, Solo Exposto, (1,5), j_1)* e *Convergência (1, V, Solo Exposto, (1,5), j_2)*, que buscaram identificar ao menos uma trajetória que, na vizinhança V , tenha convergido para solo exposto em até 5 anos (entre os instantes t_1 e t_5), no interior das janelas temporais j_1 e j_2 (Figura 7).
- *Convergência (1, V, Solo Exposto, (6,11), j_1)* e *Convergência (1, V, Solo Exposto, (6,11), j_2)*, que buscaram identificar ao menos uma trajetória que, na vizinhança V , tenha convergido para solo exposto, entre 6 e 11 anos (entre os instantes t_6 e t_{11}), no interior das janelas temporais j_1 e j_2 (Figura 8).

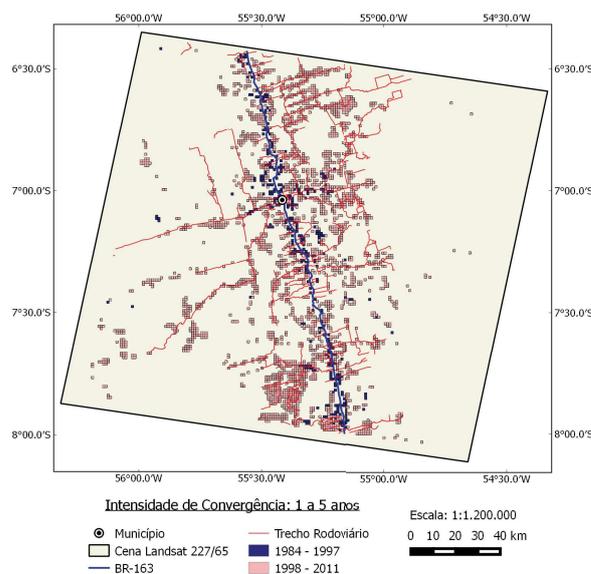


Fig. 7 – Resultado do experimento 2: Trajetórias de Alta Convergência.

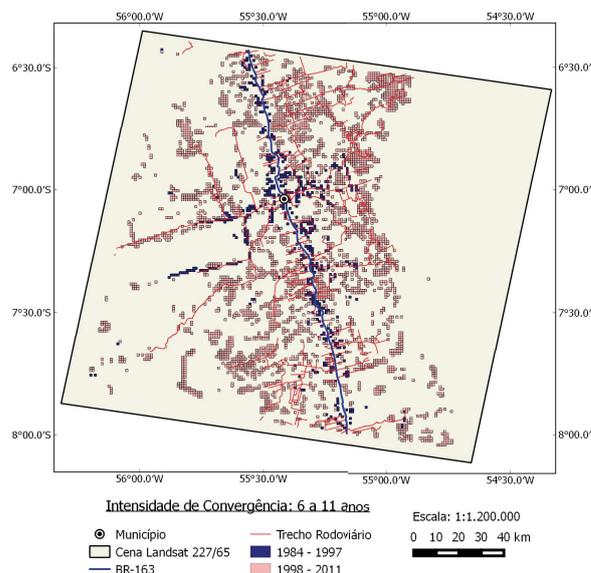


Fig. 8 – Resultado do Experimento 2: Trajetórias de Média Convergência.

- *Convergência (1, V, Solo Exposto, (12,14), j_1)* e *Convergência (1, V, Solo Exposto, (12,14), j_2)*, que buscaram identificar ao menos uma trajetória que, na vizinhança V , tenha convergido para solo exposto, entre os instantes t_{12} e t_{14} , no interior das janelas temporais j_1 e j_2 (Figura 9).

Como resultado, observou-se que a maior parte da substituição completa da cobertura florestal por solo exposto ocorreu às margens dos trechos rodoviários, principalmente ao longo da

BR-163. Tal fato indica que a referida rodovia exerceu um papel fundamental no aumento da intensidade de degradação da região. Na Tabela 5, é apresentada a quantificação e a variação das trajetórias nos dois períodos analisados.

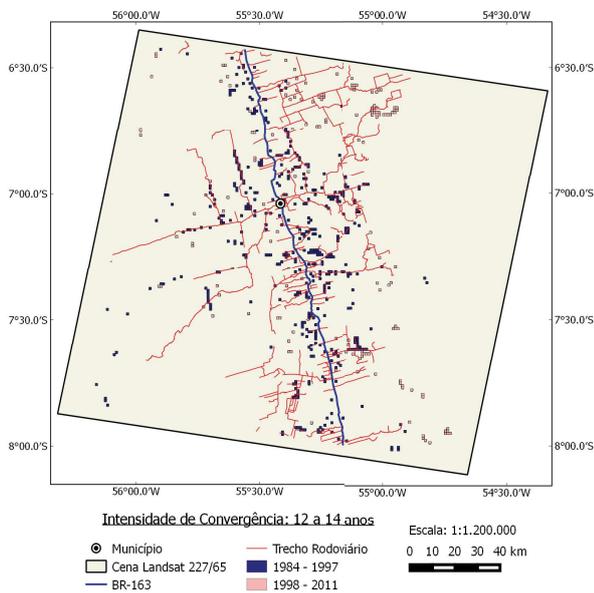


Fig. 9 – Resultado do experimento 2: Trajetórias de Baixa Convergência.

Tabela 5: Quantidade de trajetórias convergentes

Intensidade	Período 1984-1997	Período 1998-2011	Varição
Alta Convergência	336	1812	+439%
Média Convergência	461	3.205	+595%
Baixa Convergência	604	841	+39%
Não-Convergentes	6191	333	-94%

Após a quantificação das trajetórias verificou-se que todas as intensidades de convergência foram ampliadas, aumentando em média 357%. A maior variação foi observada nas Trajetórias de Média Convergência (595%) e Alta convergência (439%). Houve ainda uma redução expressiva nas trajetórias Não-Convergentes (94%), como consequência da própria intensificação do processo de degradação na região.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização das Trajetórias de Mudança de Cobertura da Terra é importante para estabelecer a relação entre os diferentes fatores

ambientais e sociais que influenciam tais mudanças. No entanto, são poucas as ferramentas disponíveis para esse propósito, pois a maior parte da literatura considera o conceito de trajetória no contexto dos objetos móveis.

Com o objetivo de oferecer uma nova possibilidade de estudar trajetórias de mudança de cobertura, na busca por propriedades que possam ajudar na sua caracterização, foram redefinidos os seguintes padrões comportamentais da literatura de objetos móveis: Convergência, Encontro, *Flock*, Liderança, Detecção de Anomalias, acrescido da Detecção de Inconsistências.

A metodologia proposta foi aplicada a um conjunto de dados de degradação florestal produzido por Pinheiro *et al.* (2016), com a realização de dois experimentos. Para tal, foram escolhidos os Padrões Comportamentais de Inconsistência e Convergência, sendo os resultados obtidos considerados satisfatórios, uma vez que agregam valor à discussão sobre a caracterização das trajetórias de mudança de cobertura da terra. Além do quê, possibilitam ampliar e aprofundar as análises das referidas trajetórias, pois fornecem ferramentas para melhor explorar o grande volume de dados proveniente do processamento das imagens de satélite. No caso da degradação florestal, um processo dinâmico e de longo prazo, são necessários dados com intervalos de tempo anuais (no mínimo), sobre os quais a abordagem proposta revelou-se promissora na detecção e caracterização das trajetórias observadas.

Em trabalhos futuros, outros padrões podem ser identificados e redefinidos, assim como os resultados obtidos confrontados com atores e processos já conhecidos na região de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, A. R.; ALVARES, L. O.; RENSO, C.; BORGONY, V. Towards Semantic Trajectory Outlier Detection. In: **Proceedings of XIV Brazilian Symposium on GeoInformatics (GEOINFO)**, Campos do Jordão, p. 115–126, 2013.

BOGORNÝ, V. e BRAZ, F. J. **Introdução a Trajetórias de Objetos Móveis: conceitos, armazenamento e análise de dados**. Vania Bogorny e Fernando José Braz (Ed.). Univille. 2012. 116p.

- BORIAH, S.; KUMAR, V.; STEINBACH, M.; POTTER, C.; KLOOSTER, S. Land Cover Change Detection: A Case Study. In: **Proceedings of The 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining**, 2008.
- CÂMARA, G.; VALERIANO, D. de M.; SOARES, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: INPE, 2006. 24p.
- CÂMARA, G.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G.; FERREIRA, K. R.; MONTEIRO, A. M. V.; CARVALHO, M. T. M.; CARTAXO, R.; CASANOVA, M. A.; FREITAS, U. M. Terralib: An Open-source GIS Library for Large Scale Environmental and Socio-economic Applications. In: HALL, G. B.; LEAHY, M. (Ed.). **Open Source Approaches to Spatial Data Handling**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- CASANOVA, M. A.; CÂMARA, G.; DAVIS, C. A. Jr; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. **Bancos de Dados Geográficos**. Curitiba: MundoGeo, 2005. 490p.
- COMBER, A. J.; WADSWORTH, R. A.; FISHER, P. F. Using Semantics to Clarify the Conceptual Confusion Between Land Cover and Land Use: the example of 'forest'. **Journal of Land Use Science**, v. 3, n. 2-3, p. 185-198, 2008.
- COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1565-1596, 2004.
- ESCADA, M. I. S.; KAMPEL, S. A.; RENNÓ, C. D.; PINHEIRO, T. F. **Levantamento do Uso e Cobertura da Terra e da Rede de Infraestrutura no Distrito Florestal da BR-163**. São José dos Campos: INPE, 2009. 43p.
- FILHO, J. B. de O.; METZGER, J. P. Thresholds in Landscape Structure for Three Common Deforestation Patterns in The Brazilian Amazon. **Landscape Ecology**, v. 21, n. 7, p. 1061-1073, 2006.
- GAVLAK, A. A.; ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. M. V. Dinâmica de Padrões de Mudança de Uso e Cobertura da Terra na Região do Distrito Florestal Sustentável da BR-163. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, Curitiba, p. 6152-6160, 2011.
- GIBSON, C. C.; OSTROM, E.; AHN, T. K. The Concept of Scale and The Human Dimensions of Global Change: a survey. **Ecological Economics**, v. 32, n. 2, p. 217-239, 2000.
- GIRI, C.; PENGRA, B.; LONG, J.; LOVELAND, T. R. Next Generation of Global Land Cover Characterization, Mapping and Monitoring. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 30-37, 2013.
- GUDMUNDSSON, J.; KREVELD, M. V.; SPECKMANN, B. Efficient Detection of Motion Patterns in Spatio-temporal Data Sets. In: **Proceedings of the 12th annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems**, p. 250-257, 2004.
- GUO, D.; LIU, S.; JIN, H. A Graph-based Approach to Vehicle Trajectory Analysis. **Journal of Location Based Services**, v. 4, n. 3-4, p. 183-199, 2010.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informações sobre os municípios brasileiros: Novo Progresso – PA**. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/234RI>>. Acesso em: 10 setembro 2015.
- JEUNG, H.; YIU, M. L.; JENSEN, C. S. Trajectory pattern mining. In: ZHENG, Y.; ZHOU, X. (Ed.). **Computing With Spatial Trajectories**. Nova Iorque: Springer, p. 143-177, 2011.
- JIANYA, G.; HAIGANG, S.; GUORUI, M.; QIMING, Z. A review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVII, p. 757-762, 2008.
- KAYHKO, N.; FAGERHOLM, N.; ASSEID, B. S.; MZEE, A. J. Dynamic Land Use and Land Cover Changes and Their Effect on Forest Resources in a Coastal Village of Matemwe, Zanzibar, Tanzania. **Land Use Policy**, v. 28, n. 1, p. 26-37, 2011.
- KORTING, T. S.; FONSECA, L. M.; CÂMARA,

- G. GeoDMA – Geographic Data Mining Analyst. **Computer and Geosciences**, v. 57, p. 133-145, 2013.
- KRATZ, L.; NISHINO, K. Anomaly Detection in Extremely Crowded Scenes Using Spatio-temporal Motion Pattern Models. In: **IEEE Conference on Computer Vision**, p. 1446-1453, 2009.
- LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O. T.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.; MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C.; XU, J. The Causes of Land-use and Land-cover Change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**, v. 11, n. 4, p. 261–269, 2001.
- LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J.; LEPERS, E. Dynamics of Land-use and Land-cover Change in Tropical Regions. **Environment and Resources**, v. 28, p. 205–241, 2003.
- LAMBIN, E.; GEIST, H. J. **Causes of Land-use and Land-cover Change**. 2007. Disponível em: <<http://www.eoearth.org/view/article/150964/>>. Acesso em: 10 setembro 2015.
- LAUBE, P.; IMFELD, S. Analyzing Relative Motion Groups of Trackable Moving Point Objects. In: EGENHOFER, M.; MARK, D. (Ed.), **Geographic Information Science, Second International Conference, GIScience 2002**, USA, Springer, p. 132–144, 2002.
- LAUBE, P.; KREVELD, M. V.; IMFELD, S. Finding REMO - Detecting Relative Motion Patterns in Geospatial Lifelines. In: **Developments in Spatial Data Handling**, p. 201–215, 2005.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Change Detection Techniques. **International Journal Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365–2401, 2004.
- LU, D.; LI, G.; MORAN, E. Current Situation and Needs of Change Detection Techniques. **International Journal of Image and Data Fusion**, v. 5, n. 1, p. 13–38, 2014.
- LUNETTA, R. S.; KNIGHT, J. F.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J. G.; WORTHY, L. D. Land-cover Change Detection Using Multi-temporal MODIS NDVI Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 2, p. 142–154, 2006.
- MENA, C. F. Trajectories of Land-use and Land-cover in the Northern Ecuadorian Amazon: temporal composition, spatial configuration, and probability of change. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 74, n. 6, p. 737–751, 2008.
- MIRGE, V.; GUPTA, S.; VERMA, K. A Novel Approach for Mining Trajectory Patterns of Moving Vehicles. **International Journal of Computer Applications**, v. 104, n. 4, p. 4–8, 2014.
- PINHEIRO, T. F.; ESCADA, M. I. S.; VALERIANO, D. M.; HOSTERT, P.; GOLLNOW, F.; MULLER, H. Forest Degradation Associated with Logging Frontier Expansion in the Amazon: The BR-163 Region in Southwestern Pará, Brazil. **Earth Interactions**, v. 20, n. 17, p. 1–23, 2016.
- QUINLAN, J. R. C4.5: **Programs for Machine Learning**. San Mateo: Morgan Kaufmann, EUA, 1993. 302p.
- RUIZ, J.; DOMON, G. Analysis of Landscape Pattern Change Trajectories Within Areas of Intensive Agricultural Use: case study in a watershed of southern Québec, Canada. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 3, p. 419–432, 2009.
- SAITO, E. A.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S.; KORTING, T. S. Efeitos da Mudança de Escala em Padrões de Desmatamento na Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 3, p. 401-414, 2011.
- SILVA, M. P. S.; CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; VALERIANO, D. M.; ESCADA, M. I. S. Mining Patterns of Change in Remote Sensing Image Databases. In: **Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Data Mining**, 8p., 2005.
- SILVA, M. P. dos S.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S.; de SOUZA, R. C. M. Remote-sensing Image Mining: detecting agents of land-use

- change in tropical forest areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 16, p. 4803–4822, 2008.
- SINGH, A. Digital Change Detection Techniques Using Remotely-sensed Data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 989–1003, 1989.
- THÉAU, J. Change detection. In: KRESSE, W.; DANKO, D. M. **Springer Handbook of Geographic Information**. Berlin: Springer, p. 175–184, 2012.
- TURNER, B. L.; MEYER, W. B. Global Land-use and Land-cover Change: an overview. In: MEYER, W. B.; TURNER, B. L. **Changes in land use and land cover: A global perspective**. Nova Iorque: Cambridge University Press, p. 3–10, 1994.
- VELDKAMP, A.; LAMBIN, E. F. Predicting Land-use Change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, n. 1–3, p. 1–6, 2001.
- VU, Q. H.; VU, T. H. N.; LI, M.; RYU, K. H. A novel clustering method for animal trajectory analysis using Wireless Sensor Network. In: **International Joint Conference on Awareness Science and Technology and Ubi-Media Computing (iCAST-UMEDIA)**. Japão, p. 249–255, 2013.
- WU, H. S.; ZHAO, Q.; DANPING, Z.; CHEN, Y. Q. Acquiring 3D motion trajectories of large numbers of swarming animals. In: **IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)**. p. 593–600, 2009.
- ZHOU, Q.; LI, B.; KURBAN, A. Trajectory Analysis of Land Cover Change in Arid Environment of China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 4, p. 1093–1107, 2008a.
- ZHOU, Q.; LI, B.; KURBAN, A. Spatial Pattern Analysis of Land Cover Change Trajectories in Tarim Basin, Northwest China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 19, p. 5495–5509, 2008b.