

## **Análise da dinâmica espacial de um potencial conector de paisagem utilizando cadeias de Markov e Autômatos Celulares**

Rodrigo Pinheiro Ribas<sup>1</sup>  
Bernardo Machado Gontijo<sup>1</sup>  
Ana Clara Mourão Moura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG  
Instituto de Geociências  
Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte – MG, Brasil  
ribasgeo@gmail.com; gontijobm@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG  
Escola de Arquitetura – Laboratório de Geoprocessamento  
Rua Paraíba, 697 – 31130-140 – Belo Horizonte – MG, Brasil  
anaclara@ufmg.br

**Abstract.** Assessing a landscape's dynamics provides an understanding of the interrelationships of processes operating in an area and provides the basis for analysis of abiotic, biotic and anthropogenic components that interact and affect changes in the landscape. Understanding and perception on current conformation, coupled with the possibilities of interpreting a past scene and proposing a future situation in the space, can direct environmental systems' planning and management actions. Supported by Remote Sensing techniques and the assistance of GIS, this study seeks to assess an area in relation to its potential to enable connectivity between habitat patches in the landscape. The detection of landscape dynamics was conducted between the years of 2010 and 2012, through evaluation of land use maps from a multitemporal classification of RapidEye satellite images. Projection and analysis made a 2014 scenario possible by implementing Markov Chain algorithms and Cellular Automaton. Results show that Geotechnologies together with landscape dynamics analyses allow an assessment of changes over time and space and can satisfactorily trace landscape projections.

**Palavras-chaves:** remote sensing, geographic information systems, connectivity, biodiversity, sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica, conectividade, biodiversidade.

### **1. Introdução**

Atualmente observa-se que em diversos contextos paisagísticos, a cobertura vegetal nativa vem sendo substituída por outras formas de uso e ocupação da terra, sendo que em alguns locais pode ocorrer maior intensidade de transformação, haja vista o contexto socioambiental preponderante. Esta tendência de transformação da paisagem tem grande potencial para colocar em risco a biodiversidade, sendo muitas vezes imprescindível a criação de áreas protegidas com o intuito de resguardo da diversidade biológica. Muitas vezes estas áreas protegidas são criadas ou podem vir a se tornar fragmentos isolados em meio a áreas que já sucumbiram à pressão antrópica e pensando num cenário mais realístico, o sucesso para a conservação da biodiversidade no planeta depende da capacidade de sobrevivência da biota em paisagens fragmentadas com intervenção do homem (Bennett, 2003). A gestão de áreas protegidas de forma isolada não é suficiente para a conservação, sendo necessária uma política de gestão de mosaicos de áreas protegidas, visto que estas áreas são enfaticamente influenciadas pela matriz envolvente (Metzger, 1999). Entender as consequências das mudanças ocorridas nos habitats e desenvolver efetivas estratégias para a manutenção da biodiversidade em paisagens modificadas é um dos maiores desafios de cientistas e gestores ambientais na atualidade.

Este artigo propõe uma análise, em escala de mais detalhe, de uma das áreas previamente identificadas em estudo anterior dos mesmos autores (Ribas et al, 2014), como potencial para permitir a conectividade na paisagem. Essa análise consistirá da realização de mapeamentos do uso e ocupação do solo em épocas distintas (passado e presente), tendo como base imagens de alta resolução espacial do satélite Rapideye. Estes mapeamentos, além de apresentarem a tendência das tipologias de uso no período analisado, permitem a observação da realidade atual com grande precisão de detalhes,

servindo também de base para a modelagem de um cenário futuro. Este estudo será desenvolvido com suporte de técnicas de Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informação Geográfica, no qual serão implementados procedimentos de análise e simulação espacial por meio de algoritmos de Cadeia de Markov e Autômato Celular.

## **2. Revisão de Bibliografia**

### **2.1 A investigação da dinâmica espacial**

De acordo Christofolletti (1999) os sistemas ambientais representam entidades organizadas na superfície terrestre, de modo que a espacialidade representa uma de suas características inerentes e sua organização está vinculada aos elementos que os constituem. A dinâmica de evolução das paisagens no espaço apresenta cenários distintos periodicamente e avaliação destes cenários, levando em conta, além do próprio espaço em si, a influência do tempo na alteração dos processos naturais e antrópicos, produz uma investigação menos limitada das condições do ambiente. A avaliação e criação de cenários é uma abordagem na qual a paisagem, que é o objeto de estudo, deve ser previamente investigada em suas peculiaridades. Segundo Bolós (1992) para a elaboração de perspectivas para um de cenário da paisagem, os fluxos e forças que impulsionam o desenvolvimento natural dos elementos abióticos e bióticos dos geossistemas precisam ser conhecidos, assim como a influência dos elementos antrópicos que estimulam a transformação da paisagem.

Os procedimentos de Cadeia de Markov e Autômato Celular são indicados para a análise da dinâmica espacial e possuem grande aplicação em investigações dos sistemas ambientais (Mondal e Southworth, 2010; Sang et al., 2011). A simulação por Cadeia de Markov é um processo estocástico, visto que podem ser agregadas uma ou mais variáveis aleatórias para o desenvolvimento de um modelo para o entendimento de um dado fenômeno. Em sistemas ambientais este algoritmo tem a capacidade de simular um cenário futuro para uma determinada paisagem, baseando-se nos seus estados precedentes, ou seja, o tempo  $t_{2014}$  depende dos valores medidos nos tempos  $t_{2010}$  e  $t_{2012}$ . Este procedimento se torna interessante para o estudo de mudanças ocorridas no uso e ocupação do solo, visto não ser um algoritmo muito complexo e por possuir grande interoperabilidade de implementação em ambiente SIG, assim como pelo fato de admitir como fonte de dados produtos provenientes de Sensoriamento Remoto.

Uma limitação da Cadeia de Markov é a sua característica de não relacionar a informação de uma célula ou pixel com as células vizinhas e também, a impossibilidade da inclusão de variáveis catalisadoras do fenômeno estudado, como por exemplo a inclusão de uma camada de rodovia para a explicação do fenômeno de desmatamento ou a espacialização de um dado socioeconômico que pode estar direcionando determinado fluxo de migração entre regiões, neste sentido, percebe-se que este modelo consegue indicar onde e qual a quantidade de mudança ocorrida, porém não consegue aprimorar a análise com respostas sobre o porquê da ocorrência da situação. Um modelo dinâmico que pode ser acoplado à Cadeia de Markov buscando amenizar essa sua limitação é o Autômato Celular. Neste algoritmo, a situação atual de uma célula irá depender do estado precedente das células vizinhas a esta, seguindo uma regra de transição para a atribuição do novo valor. Segundo Wolfram (1983; 1984) os autômatos são malhas com células regulares, nas quais cada célula possui um valor discreto e um tempo definido, podendo estes serem alterados em função do valor das células vizinhas. A combinação de Cadeia de Markov com Autômato Celular constitui uma metodologia com grande sintonia para investigações da dinâmica da paisagem, tendo em vista a característica de inter-relacionamento entre os elementos formadores e atuantes no meio ambiente.

## **3. Materiais e Métodos**

### **3.1 Área de estudo**

A área de estudo abrange um total de aproximadamente 65.000 hectares e, conforme apresentado no mapa da Figura 1, está localizada na porção noroeste do Mosaico de Áreas Protegidas do Espinhaço Alto Jequitinhonha - Serra do Cabral. Este Mosaico engloba 19 áreas protegidas em seu limite, sendo estas denominadas de Unidades de Conservação (UC's), podendo estas serem de Proteção Integral (com normas mais restritivas, impedindo determinadas atividades antrópicas) ou de Uso Sustentável (aliam a conservação com atividades antrópicas). O mosaico localiza-se na porção meridional da grande cordilheira denominada Serra do Espinhaço, estando numa porção da Serra do Espinhaço que é considerada uma Reserva da Biosfera reconhecida pela UNESCO, sendo esta a Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço.

Na área de estudo existem grandes manchas de vegetação com porte arbóreo na paisagem, apresentando um padrão “*stepping stones*” que tem potencial para permitir a conectividade entre a região norte da Serra do Cabral e a face principal da Serra do Espinhaço nas proximidades do Parque Nacional Sempre Vivas.

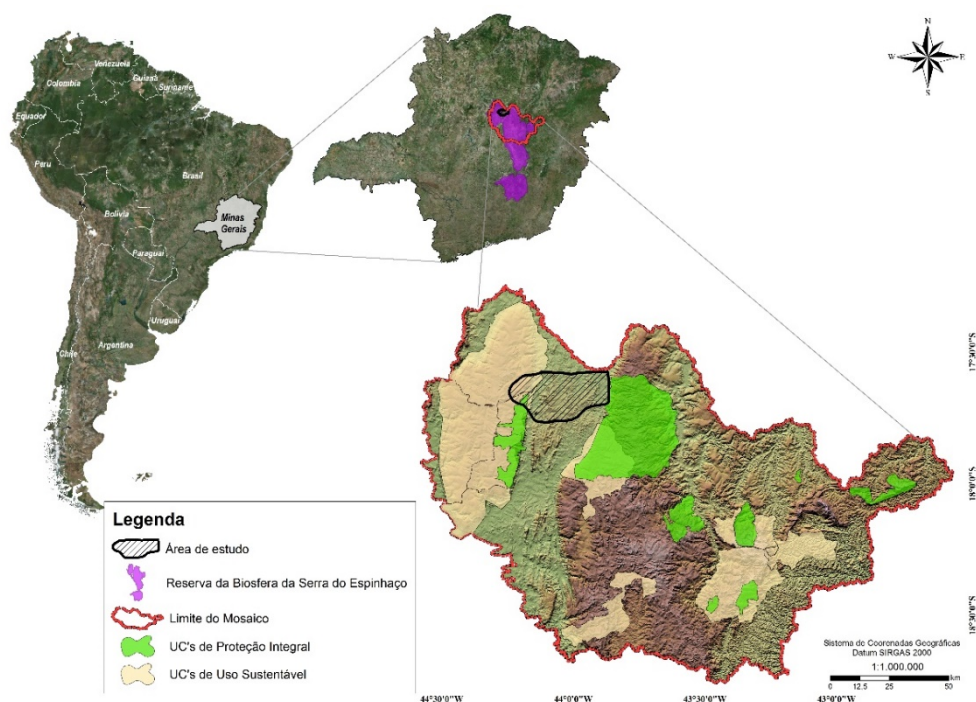


Figura 1. Localização da área de estudo

### 3.2 Base de dados

Para a análise da dinâmica da configuração espacial do uso do solo e da cobertura vegetal na área de estudo, foi realizado um mapeamento temático utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). Para a análise da dinâmica temporal da estrutura da paisagem foram utilizadas imagens do mês de setembro nos anos de 2010 e 2012, provenientes da constelação de satélites alemã RapidEye. Esta constelação possui 5 satélites equipados com sensor multiespectral capaz de capturar imagens em 5 bandas espectrais e com 5 metros de resolução espacial após ortoretificação. O RapidEye possui a banda Red-Edge propícia para monitoramento da atividade fotossintética da vegetação, sendo assim muito indicado para o mapeamento da cobertura vegetal.

### 3.3 Processamento das imagens de satélite

O pré-processamento, realce da imagem e posterior classificação da imagem foram realizados no software SPRING. Na fase de pré-processamento as imagens foram reprojatadas para o datum utilizado no estudo (SIRGAS 2000 - Fuso 23k Sul) e para a correção atmosférica foi utilizado o método Dark Object Subtraction (Chavez 1988). Para o realce da imagem foi aplicado um realce

linear de histograma. O realce de contraste produz uma ampliação do intervalo original dos níveis de cinza, de forma que eles são exibidos num intervalo maior. Este processo não aumenta a quantidade de informação contida na imagem, o objetivo é apresentar a mesma informação contida nos dados brutos, porém de uma forma mais claramente visível ao intérprete. Para o total recobrimento da área em análise foi necessário a realização do procedimento de mosaico entre 2 cenas do satélite, sendo estas as imagens com os identificadores 2330918 e 2330919.

Para a classificação das imagens neste estudo, foi utilizado um classificador supervisionado por máxima verossimilhança (MAXVER). Na classificação supervisionada, o usuário seleciona amostras representativas para cada uma das classes que se deseja identificar na imagem. Inicialmente foram selecionadas 2 classes para esta classificação sendo elas, vegetação de porte arbóreo e matriz (incluindo vegetação rasteira, pastagem entre outras tipologias desta natureza). Foram adquiridas 30 amostras de treinamento para cada classe. Após a classificação foi realizada a interpretação visual da imagem, procedimento de pós-classificação no qual um especialista humano extrai as informações baseando-se na inspeção visual da imagem. Este procedimento foi realizado com apoio de um Sistema de Informação Geográfico (SIG), o programa ArcGIS 10.1. Esta etapa foi realizada para a inserção da classe temática eucalipto, campo rupestre, água e estradas. Justifica-se esta etapa pelas seguintes razões: a classe vegetação arbórea inclui as espécies nativas da região e também as exóticas de porte arbóreo, tais quais o eucalipto. A classificação da água e estradas por métodos automáticos muitas vezes não reproduz essa tipologia de forma fiel. A tipologia Campo Rupestre é específica em suas características espectrais, sendo facilmente confundida com áreas de solo exposto.

Levando em conta que o formato espacial proveniente das plantações do eucalipto é peculiar, foi possível realizar a distinção de tais áreas para um mapeamento manual. Para a classe Campo Rupestre partiu-se do pressuposto sustentado por diversas investigações científicas, de que esta tipologia ocorre principalmente acima de 900 m de altitude, em montanhas cujas rochas são de origem pré-cambriana que foram remodeladas por movimentos tectônicos, estando associados, principalmente, a afloramentos de quartzito, arenito e minério de ferro. Para as classes água e rodovias foi realizado um ajuste das bases oficiais em escala 1:50.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) baseado em interpretação visual das imagens RapidEye.

### **3.4 Modelagem da dinâmica espacial**

A análise e modelagem da dinâmica espacial foi realizada com suporte do software IDRISI Selva (Eastman, 2011). Foram utilizados os mapeamentos do uso e ocupação do solo nos anos de 2010 e 2012 para a detecção e análise das mudanças ocorridas na paisagem. Após a identificação e análise das mudanças ocorridas neste período, foi realizada a simulação da paisagem para o ano de 2014. Esta data foi especificada para a simulação, visto que o intervalo entre os mapeamentos reais provenientes das imagens Rapideye disponíveis, também é de 2 anos. Outro fato que incentivou a realização de uma projeção para o ano de 2014 é a possibilidade metodológica de validação em campo da probabilidade que será demonstrada.

A matriz de transição de área gerada pelo algoritmo de cadeia de Markov, será a regra utilizada para guiar a mudança dos estados no modelo dos autômatos celulares. Foram realizadas 2 iterações no modelo de autômato celular e foi aplicado o filtro de 5x5 para análise da vizinhança. O erro proporcional considerado para o mapeamento de uso e cobertura do solo foi de 0,15 %, segundo indicação de Pontius (2000), tendo em vista que a classificação teve ajustes manuais. Foram introduzidas no modelo 4 variáveis catalisadoras do processo de transformação da paisagem, sendo elas a distância das estradas, a distância de focos de incêndio, as características pedológicas da região e também a proximidade de monoculturas de eucalipto já existentes na área.

## **4. Resultados e Discussões**

A figura 2 apresenta os ganhos e perdas em área (hectares) por categoria de uso e ocupação do solo, apresenta também o saldo final por categoria, indicando se uma classe ganhou ou perdeu mais

em área no período analisado e também apresenta quais foram as classes catalisadoras das mudanças nas classes que sofreram transformações significativas.

Percebe-se que as classes eucalipto e vegetação arbórea foram as únicas que obtiveram saldo positivo no período. Um fato que pode estar relacionado a esta tendência é a aprovação da Lei Estadual 18.365 em 2009, que definiu como meta a redução do consumo de carvão de vegetação de origem nativa até o limite máximo de 5% do consumo total por ano a partir de 2019, criando uma expectativa de crescimento de plantações de eucalipto para suprir a demanda e em contrapartida a conservação de espécies nativas já pode estar sendo estabelecida como uma medida para adequação por empresas do setor.

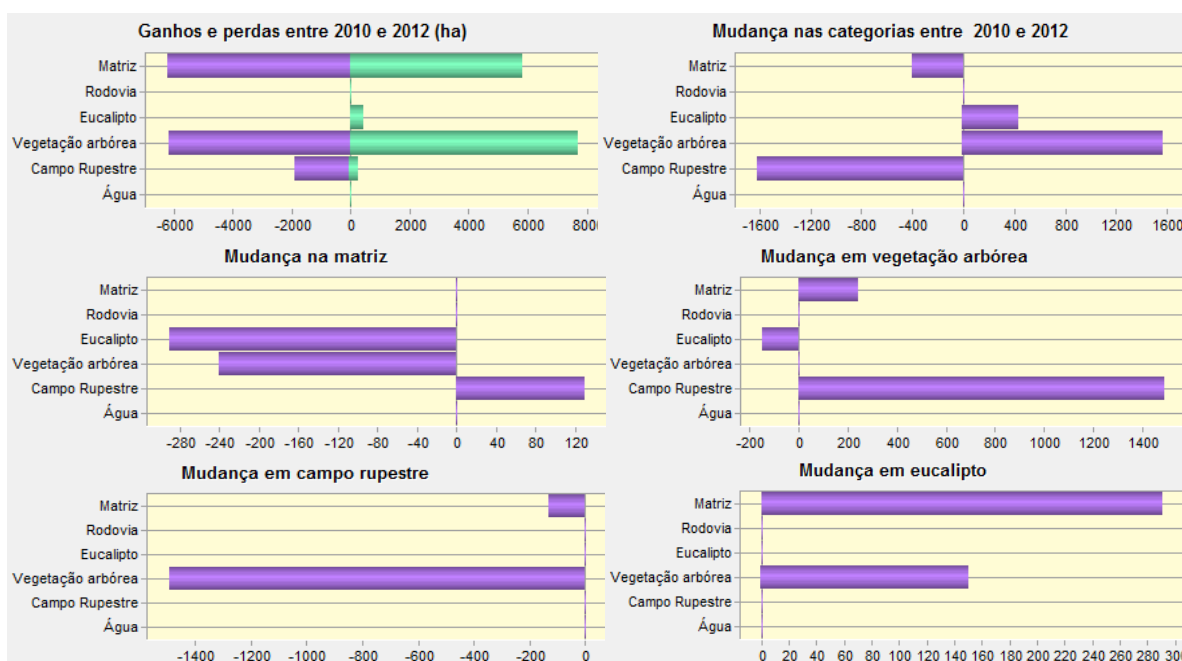


Figura 2. Tendências observadas no uso e ocupação do solo entre 2010 e 2012

A matriz de probabilidade apresentada na Tabela 1 foi o resultado obtido pela aplicação da cadeia de Markov nos mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2010 e 2012. Esta matriz representa a probabilidade de uma determinada classe se modificar e torna-se outra.

Tabela 1. Matriz de probabilidade de transição para as classes.

	Água	C. Rupestre	Arbórea	Eucalipto	Rodovia	Matriz
Água	0.8500	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000	0.0000
C. Rupestre	0.0000	0.6132	0.3816	0.0000	0.0000	0.0052
Arbórea	0.0000	0.0289	0.5875	0.0098	0.0000	0.3738
Eucalipto	0.0000	0.0000	0.0285	0.8492	0.0000	0.1223
Rodovia	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8500	0.0000
Matriz	0.0000	0.0000	0.0135	0.2747	0.0000	0.7117

Analisando as informações contidas na tabela, temos na diagonal principal a probabilidade existente das classes não sofrerem transformações. Observa-se assim que a classe arbórea possui a menor probabilidade entre as demais classes de não sofrer modificações, com aproximadamente 59%, sendo que, a classe com maior possibilidade de vir a se tornar arbórea é a classe matriz, possuindo cerca de 37% de chance. Esta constatação é totalmente pertinente com a realidade que vem ocorrendo não só na área de estudo, mas em diversas partes do país, onde a vegetação nativa é substituída por

pastagens, culturas entre outras tipologias relacionadas ao uso antrópico. A classe campo rupestre apresenta aproximadamente 61% de probabilidade de não se modificar, e é interessante notar que a classe arbórea responde por cerca de 38% dessa chance de mudança. Esta situação pode ser explicada por uma tendência de aumento da vegetação ciliar de porte arbóreo nas margens das drenagens que cortam os campos rupestres. A classe matriz possui alta probabilidade de não sofrer mudança, porém em suas áreas que possuem chance de ocorrência de transformações, a maior probabilidade é que estas se transformem em eucalipto. Essa situação pode ser sustentada devido à melhor condição pedológica para o desenvolvimento desta monocultura nos cambissolos existentes na matriz e também à presença de melhor infraestrutura viária.

Além da matriz de transição, a aplicação da cadeia de Markov produz um mapa de probabilidade de transformação para cada categoria do mapeamento e também realiza uma projeção estocástica de cada célula ou pixel pertencer a uma classe diferente da atual, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Matriz de probabilidade de cada pixel pertencer a outra classe

	<i>Água</i>	<i>C. Rupestre</i>	<i>Arbórea</i>	<i>Eucalipto</i>	<i>Rodovia</i>	<i>Matriz</i>
<i>Água</i>	92118	0	16257	0	0	0
<i>C. Rupestre</i>	0	814330	506809	0	0	6960
<i>Arbórea</i>	0	246787	5022921	83556	0	3196140
<i>Eucalipto</i>	0	0	18205	541785	0	78019
<i>Rodovia</i>	0	0	0	0	198185	0
<i>Matriz</i>	0	0	205031	4162210	2	10782697

A imagem proveniente da simulação para o ano de 2014 foi comparada visualmente nos mapas apresentados na Figura 3 e por meio da comparação dos valores quantitativos de área por classe em 2012 e 2014 apresentados na Tabela 3. Constatou-se o aumento da classe Matriz e da classe Eucalipto de forma mais expressiva, com um incremento de 203,97 e 196,69 hectares respectivamente. De forma mais discreta foi verificada uma possível tendência no aumento do número de estradas. As classes Campo Rupestre e Vegetação Arbórea tiveram diminuição em quantidade no período analisado, com perda de 107,86 e 295,95 hectares respectivamente. Dentre essas análises percebemos que as classes Eucalipto e Campo Rupestre mantiveram a tendência mapeada em ter 2010 e 2012, da qual foi extraída a matriz de probabilidade de transição, ocorrendo o ganho em área do Eucalipto e a perda do Campo Rupestre.

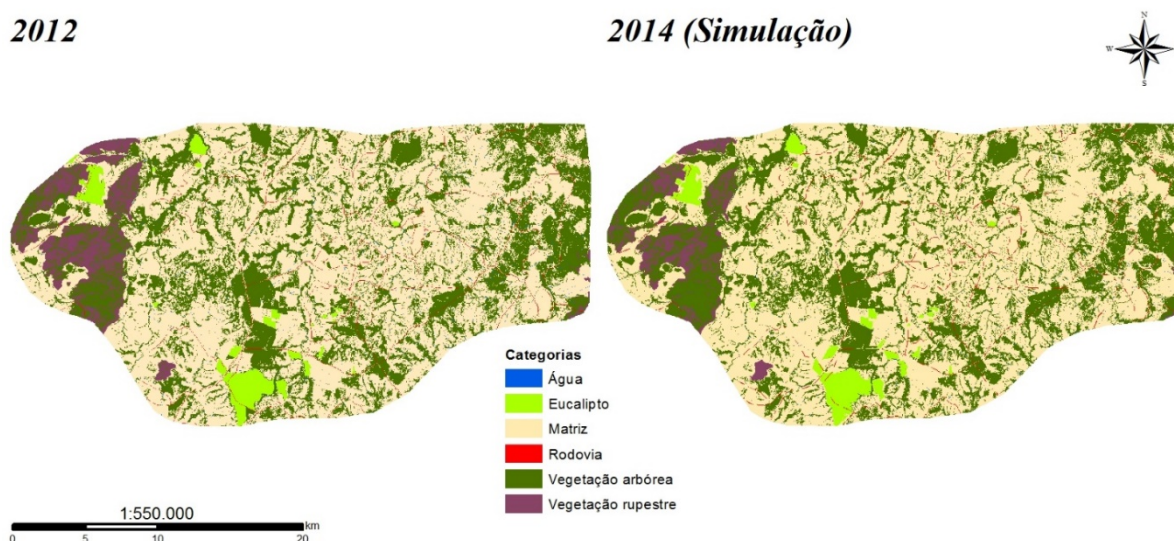
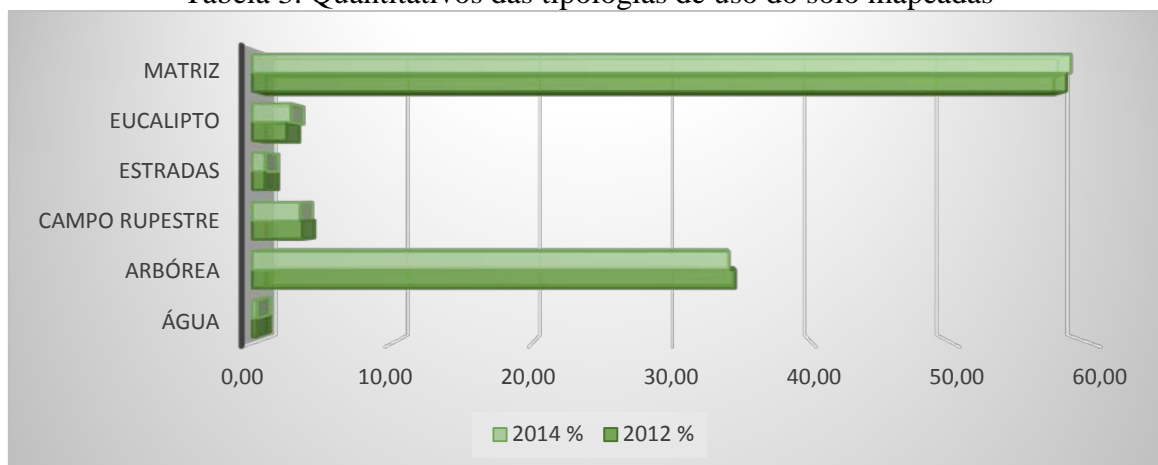


Figura 3. Tendências observadas no uso e ocupação do solo entre 2012 e 2014

Tabela 3. Quantitativos das tipologias de uso do solo mapeadas



Além da comparação entre o mapeamento realizado em 2012 e simulação para 2014, foi realizada uma verificação da situação real de uso do solo e cobertura vegetal também no ano de 2014. Esta verificação *in loco* foi realizada no mês de novembro de 2014, sendo realizada nas áreas onde foram detectadas as mais expressivas possibilidades de alterações em virtude da simulação realizada. Foram vistoriadas 7 áreas em campo, conforme demonstrado na Figura 4.

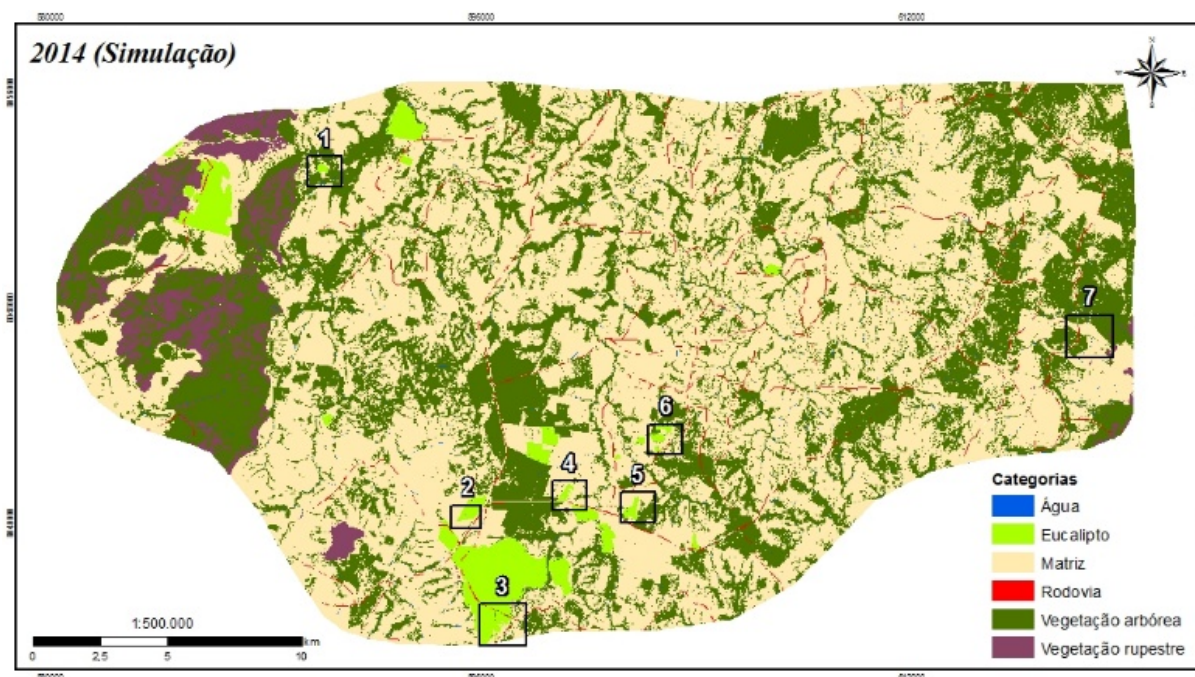


Figura 4. Áreas de verificação e validação em campo da simulação de 2014

Foi observado que em 4 áreas validadas (áreas 2, 3, 4, 5) a tendência realmente se consolidou, com um aumento da classe eucalipto ocorrendo nas áreas, seguindo inclusive o formato previsto. Nas áreas 1 e 6 não foi observado o avanço do eucalipto, mantendo-se na paisagem a vegetação de porte arbóreo típica de cerrado presente na região. A área 7, que apontou uma tendência de avanço da matriz em detrimento de vegetação de porte arbóreo, também não se consolidou, visto que a área se mantém com a vegetação natural, porém verifica-se no entorno grande influência da matriz por meio de pastagens, o que acaba tornando esta área susceptível a fragmentação.

## 5. Conclusão

Concluimos que a vantagem em se aplicar modelos na investigação da dinâmica da paisagem é a capacidade de trânsito em vários cenários temporais. Entendemos que o benefício de um modelo de simulação ocorre quando este é conjugado com uma boa análise in loco da área em foco, de forma que uma imersão na realidade atual seja capaz de instigar a um aprofundamento no conhecimento das engrenagens que dinamizam o espaço, permitindo assim a produção de boas pesquisas sobre o presente, com apoio no percurso originado no passado e com propostas produtivas para acompanhar a tendência num possível cenário futuro.

O software IDRISI Selva por meio do módulo CA-MARKOV se mostrou uma ferramenta de útil para o desenvolvimento da análise da dinâmica da paisagem, possuindo boa performance para o trabalho com dados raster. O resultado obtido na previsão do cenário utilizando cadeia de Markov e Autômato Celular foi bastante coerente com a realidade observada em campo, podendo assim ser considerada uma metodologia robusta para o entendimento e previsão de tendências na forma de uso e ocupação do solo.

## Agradecimentos

Agradecemos à bolsa para pesquisa da CAPES que favoreceu o desenvolvimento do presente trabalho e ao programa de pós-graduação em Geografia da UFMG. Agradecemos à Fapemig pelo apoio financeiro para participação no evento.

## Referências

- Bennett, A.F. **Linkages in the landscape: The role of corridors and connectivity in wildlife conservation**. Gland, Switzerland and Cambridge, United Kingdom: The World Conservation Union (IUCN) Forest Conservation Programme, 2 ed. 2003. 262 p.
- Bolos, M. **Manual de ciência del paisaje. Teoría, métodos y aplicaciones**. Barcelona: Ed. Masson, 1992. 273p.
- Chavez, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**. v. 24: p.459-479, 1988.
- Christofoletti, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Blücher, 1999. 236 p.
- Eastman, J.R. IDRISI Selva: **Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark Labs. 2011. 327 p.
- Metzger, J.P. Tree functional group richness and landscape structure in a Brazilian tropical fragmented landscape. **Ecological Applications** v. 10 (4): p. 1147-1161, 2000.
- Mondal,P., Southworth, J. Evaluation of conservation interventions using a cellular automata-Markov model. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 1716-1725, 2010.
- Pontius, R.G. Jr. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogramm Eng Remote Sensing**, v.66, p.1011-1016, 2000.
- Ribas, RP., Gontijo, B.M., Moura, A.C.M. Spatial uncertainty analysis of GIS-based multicriteria weights of factors that influence in landscape connectivity. **Environment, Development and Sustainability**, (no prelo), 2014.
- Sang, L., Zhang, Ch., Yang, J., Zhu, D. and Yun, W. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, p. 938-943, 2011.
- Wolfran, S. The statistical mechanics of cellular automata. **Review of Modern Physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.
- Wolfram, S. Universality and complexity in cellular automata. **Physica** v. 10, p. 1-35, 1984.