

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N^o 68/2, Edição Especial Aplicações dos SIG: 301-312
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DA CONECTIVIDADE ENTRE FRAGMENTOS DE VEGETAÇÃO NA PAISAGEM: ESTUDO NA REGIÃO DA SERRA DO ESPINHAÇO EM MINAS GERAIS

*Analysis of Connectivity between Vegetation Fragments in the Landscape:
Study in the Region of Espinhaço Mountain Range*

**Rodrigo Pinheiro Ribas¹, Bernardo Machado Gontijo¹
& Ana Clara Mourão Moura²**

**¹Universidade 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

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

*Recebido em 3 de Maio, 2015/ Aceito em 10 de Agosto, 2015
Received on May 3, 2015/ Accepted on August 10, 2015*

RESUMO

A conectividade representa na paisagem o oposto da fragmentação, em linhas gerais, indica a magnitude da conexão entre os habitats e a respectiva capacidade de dispersão das espécies no espaço. As paisagens são dinâmicas, estando em constante mudança segundo a interação entre os componentes abióticos, bióticos e antrópicos presentes. O entendimento e a percepção sobre a atual conformação da paisagem, juntamente com as possibilidades de interpretação de um cenário passado e a previsão de uma situação futura no espaço, incrementam as possibilidades de ações de planejamento e gestão dos sistemas ambientais. Este estudo procura avaliar uma área em relação ao seu potencial para permitir a conectividade entre fragmentos de habitats na paisagem. A detecção da dinâmica da paisagem foi realizada entre os anos de 2010 e 2012, por meio da avaliação de mapas de uso e ocupação do solo produzidos a partir de uma classificação multitemporal de imagens do satélite RapidEye, e a projeção e análise de um cenário futuro foi modelado para o ano de 2014 por meio da aplicação de algoritmos de Cadeia de Markov e Autômatos Celulares. Para a criação da rede de interligação entre os fragmentos foi utilizado um modelo de quantificação do caminho de menor custo baseado na Teoria dos Grafos e para a análise dos fragmentos situados em posições mais centrais na rede sob uma perspectiva de conectividade na paisagem foi aplicada uma análise de Centralidade de Intermediação. Os resultados demonstraram satisfatoriamente a dinâmica do uso e ocupação do solo no período analisado e as projeções tiveram boa assertividade, levando em conta a validação in loco realizada. Tendo em vista o padrão de trampolins de habitat observado na área de estudo, as metodologias baseadas na Teoria dos Grafos tiveram grande adequabilidade e produziram uma avaliação do local com grande capacidade para potencializar o entendimento e a conservação da biodiversidade na área de estudo, podendo também servir de modelo para a aplicação em outras áreas

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Análise Espacial, Conectividade, Biodiversidade.

ABSTRACT

Connectivity represents the opposite of fragmentation in the landscape and in general indicates the scope of connection among habitats and its respective capacity for species to disperse in the space. Landscapes are dynamic and under constant change due to interaction between their abiotic, biotic and anthropic elements. Understanding and perceiving the present shape of the landscape together with possibilities for interpreting a past scenario and forecasting a future situation in the space, increment possibilities for environmental systems' planning and management actions. This study strives to assess an area regarding its potential to allow for connectivity between habitat fragments in the landscape. Detection of landscape dynamics was done between 2010 and 2012 via evaluation of land use and occupation maps produced from a multitemporal classification of RapidEye satellite images and a future scenario projection and analysis was modeled for 2014 using Markov Chain and Cellular Automaton algorithms. To create a network of interconnections among fragments a least-cost path model was used based on Graph Theory and to analyze more centrally located fragments under a landscape connectivity perspective a Betweenness Centrality analysis was applied. Results satisfactorily demonstrate land use and occupation dynamics in the period analyzed and projections had good assertiveness taking the in loco validation done into consideration. Due to the habitat stepping stone pattern observed in the study area, methodologies based on Graph Theory were highly adequate and produced an assessment of the site that greatly empowers gains in biodiversity knowledge and conservation actions in the study area as well as being a model for application in other areas.

Keywords: Remote Sensing, Spatial Analysis, Connectivity, Biodiversity.

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, 2015), como potencial para permitir a conectividade na paisagem. Neste artigo o enfoque será na conectividade estrutural (HARGROVE *et al.*, 2004; GOEZ *et al.*, 2009) com direcionamento para os atributos físicos da paisagem (tamanho, forma, etc.) de fragmentos de tipologias de uso do solo. A presente investigação 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 apresentar 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. Esta etapa do estudo foi desenvolvida com suporte de técnicas de Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informação Geográfica, no qual foram implementados procedimentos de análise e simulação espacial por meio de algoritmos de Cadeia de Markov e Autômatos Celulares. Foi também realizada uma análise visando a identificação dos fragmentos com melhor potencial para permitir a conectividade na paisagem. Essa avaliação foi baseada na Teoria do Grafos, com a representação da paisagem a partir de uma estrutura de rede com ligação entre diversos vértices.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

Neste tópico será realizada uma revisão acerca de alguns conceitos relacionados à análise da paisagem e de recentes metodologias que vem sendo aplicadas na avaliação da dinâmica espacial.

2.1 A investigação da paisagem e sua dinâmica

De acordo Christofletti (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. Um modelo é designado como dinâmico no momento em que possui uma dimensão temporal explícita, ou seja, apresenta entradas e saídas que variam em função do tempo e se seu estado presente tem dependência de um estado anterior (WEGENER *et al.*, 1986). 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 e ecossistemas precisam ser conhecidos, assim como a influência dos elementos antrópicos que estimulam a transformação da paisagem.

2.1.1 Cadeia de Markov e Autômato Celular

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 & SOUTHWORTH, 2010; SANG *et al.*, 2011; SUAREZ & CANDEIAS, 2014). 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. A Cadeia de Markov tem grande aplicação na simulação

de sistemas dinâmicos, principalmente em estudos que visam detectar alterações no uso e ocupação do solo (MULLER & MIDDLETON, 1974). 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. Para cada célula do modelo são inseridas regras de transição que indicam o momento e a justificativa para alteração do valor de determinada célula.

A combinação dos algoritmos 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.

2.1.2 Análise de Rede e Teoria dos Grafos

A avaliação da conectividade na paisagem para a conservação da biodiversidade é uma das áreas inseridas no escopo da Ecologia da Paisagem que tem observado um grande crescimento no número de pesquisas nas últimas décadas. Provenido suporte a estas pesquisas diversas metodologias vem sendo desenvolvidas e validadas no sentido de mensurar a conectividade na paisagem. Em particular, temos os procedimentos de análise de redes provendo aplicações robustas para pesquisas científicas direcionadas ao estudo da complexidade dos sistemas ambientais e dos mosaicos de paisagem (CANTWELL & FORMAN, 1993).

A modelagem matemática de uma estrutura de rede é bem representada em sua topologia por um grafo, que é um diagrama formado por um conjunto de vértices interconectados por linhas de ligação entre os mesmos. Neste sentido, uma analogia com o formato presente nas paisagens fragmentadas é possível, sendo os vértices a representação das manchas de fragmentos e os arcos de interligação, representando os corredores ecológicos capazes de permitir a dispersão da biodiversidade na matriz.

A análise de redes e a teoria dos grafos disponibilizam uma grande quantidade de ferramentas e métodos para a análise de sistemas complexos, possuindo diversas aplicações sob a perspectiva dos estudos da paisagem e das interações entre as espécies e seus habitats (FALL *et al.*, 2007; URBAN *et al.*, 2009), assim como também oferece grande suporte para a avaliação, planejamento e gestão para a criação de áreas protegidas sob a perspectiva de manutenção da conectividade na paisagem (BUNN *et al.*, 2000; URBAN & KEITT, 2001; MINOR & URBAN, 2007). Em publicação recente, Dale e Fortin (2010) apresentam um revisão interessante sobre a aplicação da teoria dos grafos em estudos relacionados à Ecologia de Paisagens.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange um total de aproximadamente 65.000 hectares, interceptando

os limites dos municípios de Francisco Dumont, Joaquim Felício, Buenópolis e Bocaiúva no estado de Minas Gerais. Conforme apresentado no mapa da Figura 1, a área 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 de trampolins de habitat (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.

4. METODOLOGIA

Neste tópico será descrito o roteiro metodológico utilizado neste estudo.

4.1 Base de dados

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 ortorretificação. 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.

4.2 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-

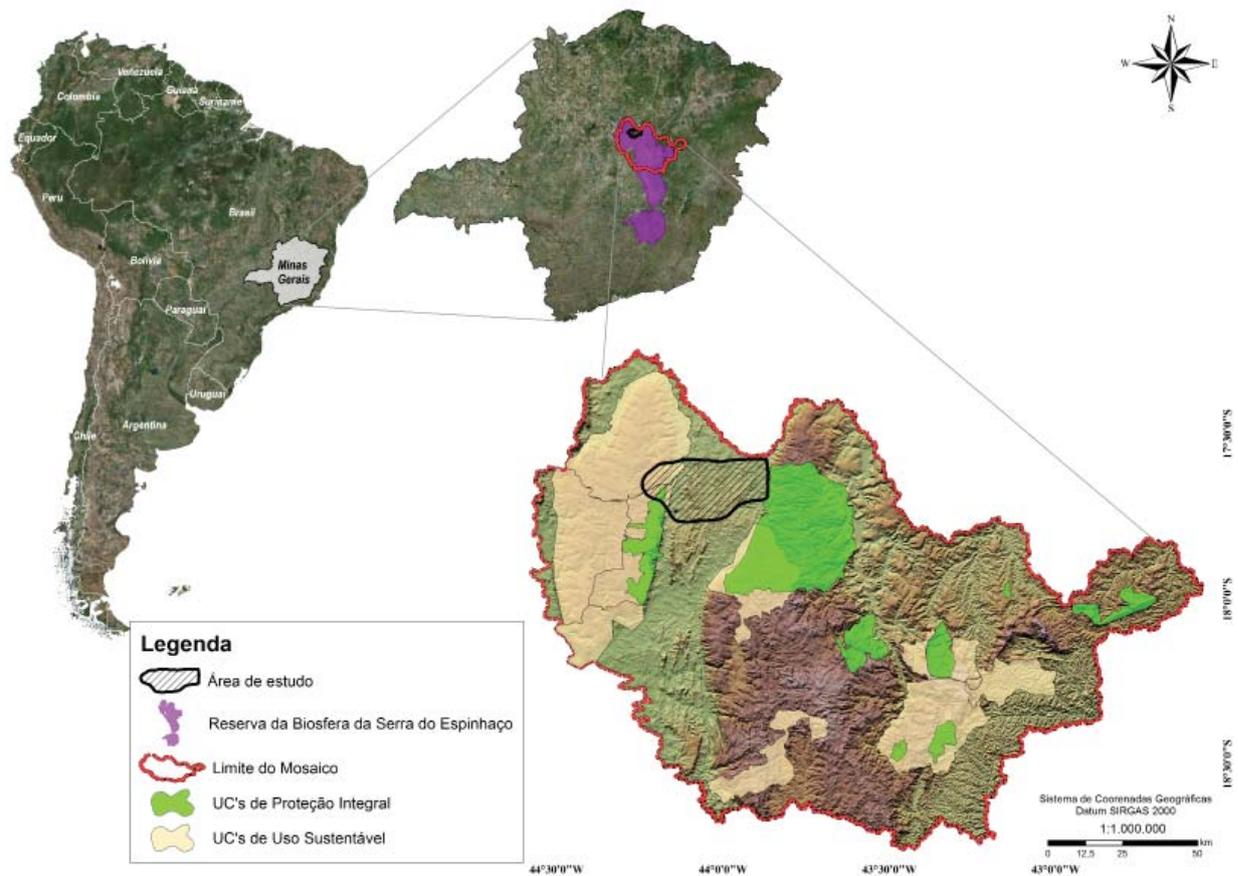


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

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 Geográfica (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.

4.3 Modelagem da dinâmica espacial

A análise e modelagem da dinâmica espacial foi realizada com suporte do programa computacional *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 (Base de Monitoramento do

INPE), as características pedológicas da região (Mapeamento Pedológico da Universidade Federal de Lavras) e também a proximidade de monoculturas de eucalipto já existentes na área.

4.4 Análise de rede

Para a análise de rede foi utilizado o programa *MatrixGreen* (BODIN & ZETTERBERG, 2010), este aplicativo possui uma extensão customizada no ambiente SIG do *ArcGIS*. Para a criação da rede de conexão na paisagem foram utilizados como manchas de referência os fragmentos com maior área núcleo, selecionados a partir da tipologia arbórea, obtida por meio do mapeamento categórico de uso e ocupação do solo.

Inicialmente é necessária a criação da rede (arcos) de conexão entre os fragmentos e para isso o *MatrixGreen* dispõe de três formas de cálculo: utilizando a distância euclidiana entre as manchas; efetuando o cálculo a partir da proximidade entre as bordas das manchas e, por fim; utilizando um modelo de quantificação do caminho de menor custo (least-cost path analysis - LCPA). Neste estudo foi utilizado a LCPA para a criação da rede, sendo para isso necessário a criação de um dado matricial no qual os valores dos pixels representassem a magnitude da resistência da matriz para a dispersão das espécies. Esta imagem foi criada atribuindo-se valores para as tipologias de uso mapeadas, sendo os valores mais altos, aqueles que proporcionam maior dificuldade de locomoção, como por exemplo, as rodovias, que obtiveram o valor mais elevado. A ordem (do valor mais alto para o mais baixo) utilizada foi a seguinte: rodovias; eucalipto; água; matriz; campo rupestre e arbórea.

Também é necessário informar qual a distância máxima de deslocamento possível e neste ponto, tendo em vista este estudo possuir uma abordagem sob o foco da conectividade estrutural e não da conectividade funcional (a partir do conhecimento da capacidade de dispersão dos organismos da região), uma alternativa para a falta de dados primários sobre a dispersão de espécies na paisagem analisada é a busca de informações em publicações científicas sobre o tema em áreas similares ao estudo. Tendo em vista a análise de alguns estudos (RODRIGUES & MARINHO-FILHO,

1999, 2001; TROVATI & BRITO, 2009; SANTOS JUNIOR, 2013) envolvendo espécies similares a da área em questão foi definida 5.000 metros, como sendo a distância máxima de deslocamento.

Após a criação da rede de conexão de menor custo entre os fragmentos foi realizada uma análise da conectividade na paisagem com foco em cada mancha de fragmento individualmente, aplicando-se o conceito de Centralidade de Intermediação (Betweenness Centrality). Este algoritmo, proposto por (FREEMAN, 1977) está implementado no MatrixGreen e tem como objetivo principal indicar a influência de um vértice nos seus pares em um grafo desconexo. Esta análise é uma forma de identificar os fragmentos que estão situados em posições mais centrais na rede sob uma perspectiva de conectividade entre os mesmos, sendo assim esta métrica se torna adequada para a identificação dos trampolins de habitat (stepping stones) na paisagem.

5. 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.

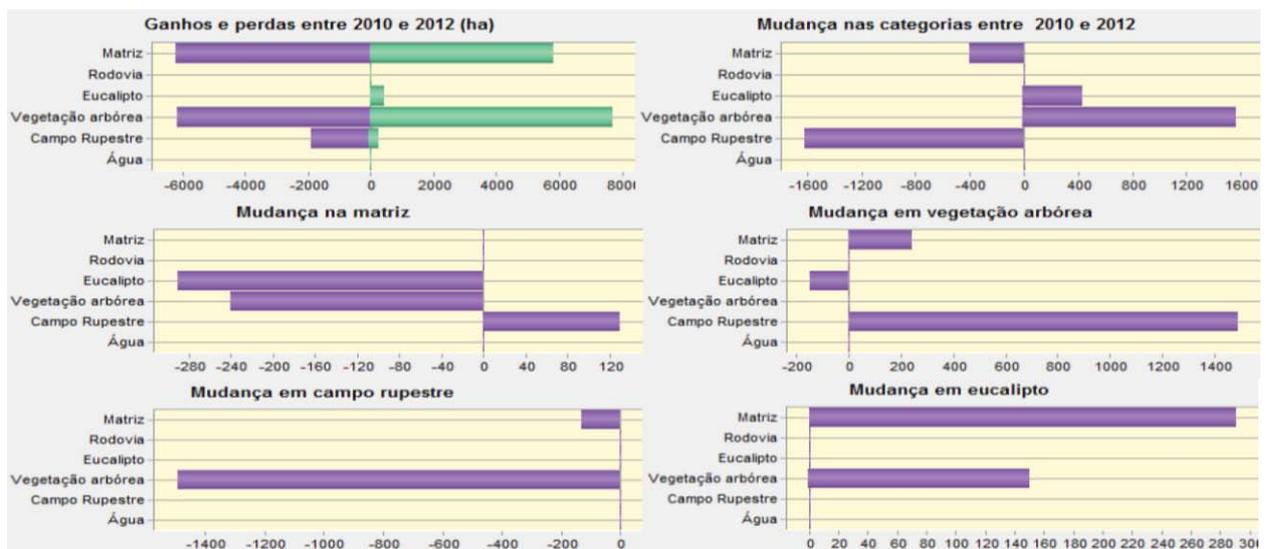


Fig. 2 - Tendências observadas no uso e ocupação do solo entre 2010 e 2012.

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 tornar-se outra.

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.

Tabela 1: Matriz de probabilidade de transição para as classes

	Água	Rupestre	Arbórea	Eucalipto	Rodovia	Matriz
Água	0.8500	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000	0.0000
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

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

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

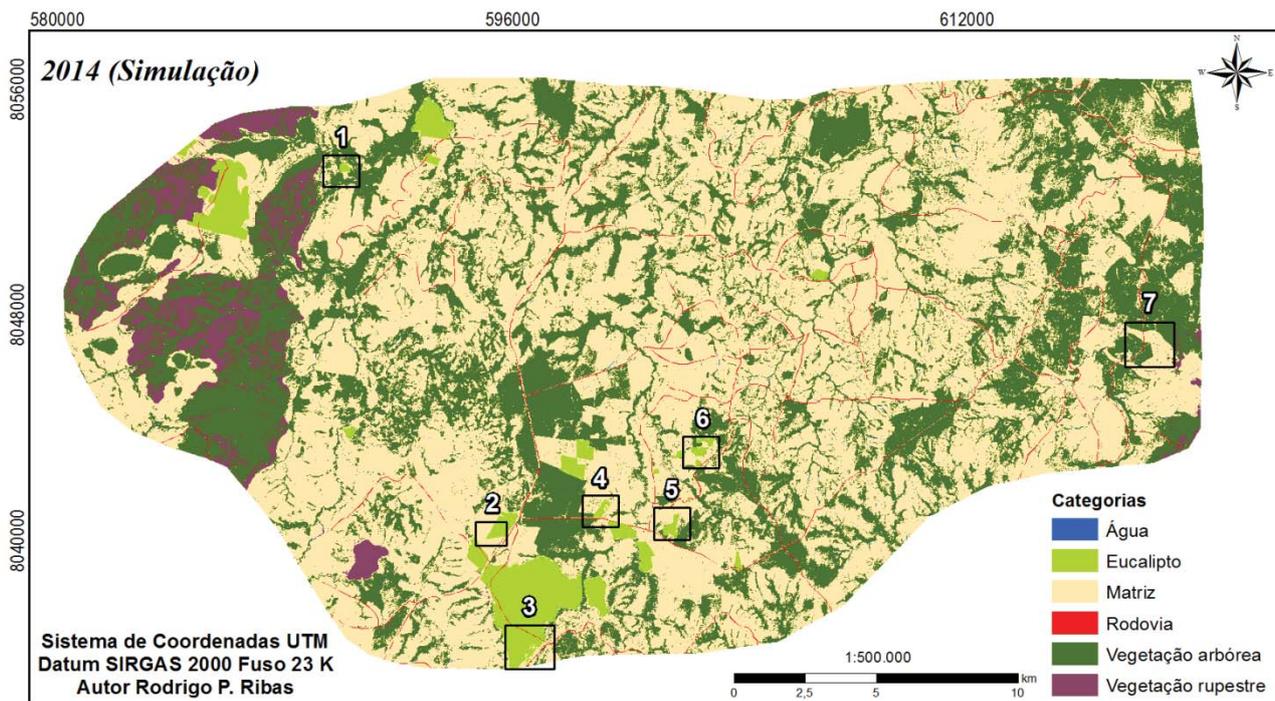


Fig. 3 - Áreas de verificação e validação em campo da simulação de 2014

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. Constatou conforme valores quantitativos de área por classe em 2012 e 2014 apresentados na Figura 4. 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 entre 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.

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 3.

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 manteve 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.

A aplicação da análise de rede pelo método do caminho de menor custo possibilitou a criação de uma rede interligando os fragmentos de forma satisfatória, conforme apresentado na Figura 5. Foi possível a modelagem de um corredor capaz de interligar os fragmentos por um caminho que perpassa o centro da área de estudo, capaz de permitir o trânsito desde o oeste nas proximidade da Serra do Cabral até a leste próximo as redondezas do Parque Nacional Sempre Vivas.

Neste caminho com menor resistência, a maior barreira para a conectividade entre os fragmentos é a BR-135, que corta perpendicularmente a área de estudo e a respectiva rota modelada. Uma opção para transpor esta barreira ou pelo menos amenizar os efeitos desta no trânsito da biodiversidade seria a aplicação dos conceitos de travessia de biodiversidade (Wildlife Crossings). Neste conceito, a construção de estruturas arquitetônicas podem vir a permitir a viabilização da interligação entre habitats e diminuição da mortalidade de fauna com a realização de obras de arte ao longo das estradas para a facilitação do trânsito das espécies presentes na região.

Este conceito vem sendo pesquisado no meio acadêmico, com destaque para a publicação *Road Ecology: Science and Solutions* (FORMAN *et al.*, 2002) que apresenta um capítulo dedicado a Análise de Rede para a implantação de rodovias ecológicas. A partir da análise do mapeamento apresentado na Figura 4, entendemos que uma local ótimo para a criação de uma travessia para biodiversidade seria nas proximidades das coordenadas UTM 595.957 Oeste e 8.046.988 Sul.

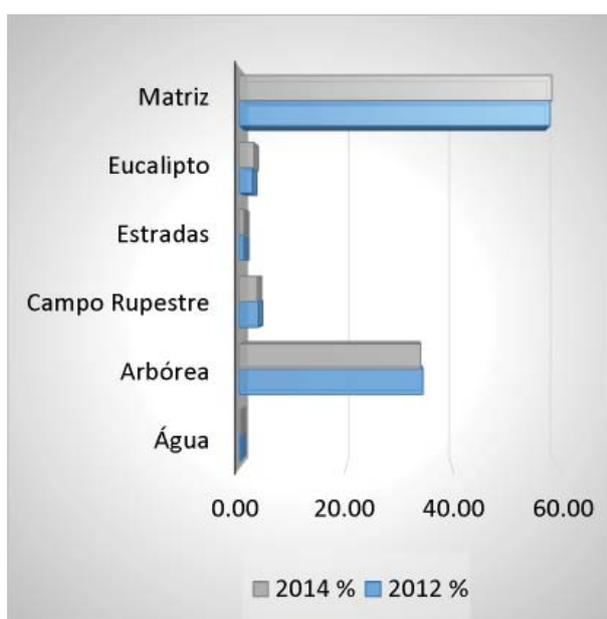


Fig. 4 - Quantitativos das tipologias de uso do solo mapeadas.

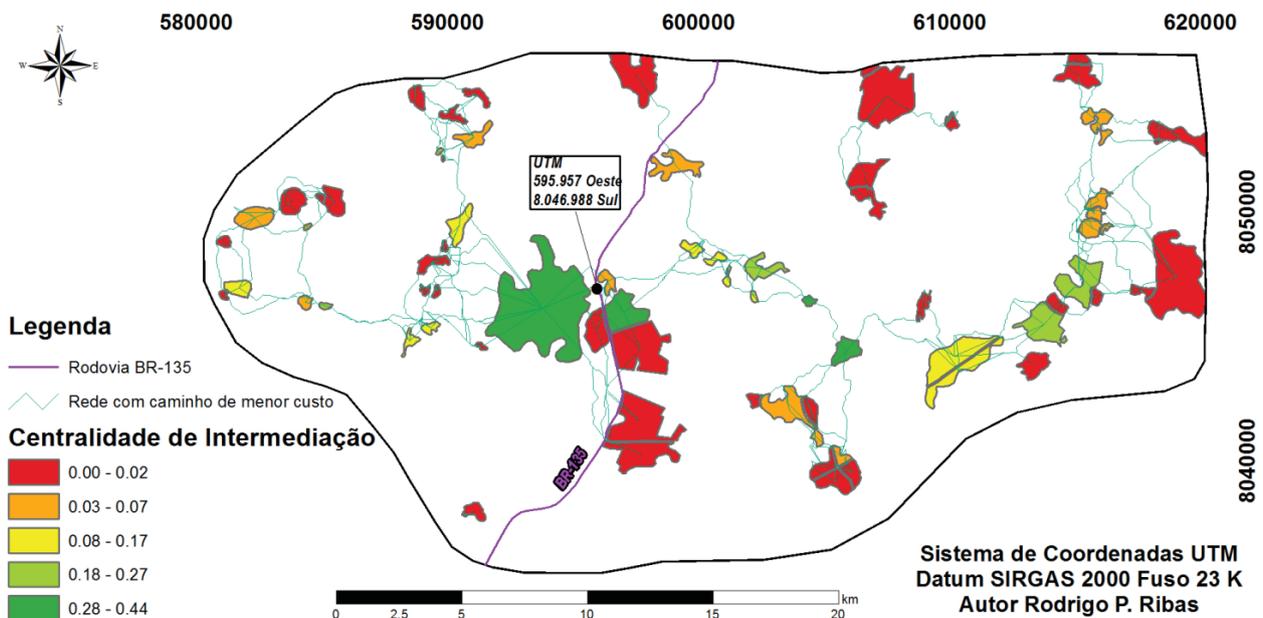


Fig. 5 - Rede com caminho de menor custo e centralidade dos fragmentos.

A análise de importância dos fragmentos em função de sua centralidade na rede criada, realizada por meio da análise de centralidade de intermediação, permitiu a identificação dos fragmentos que devem ser observados com mais cuidado em termos de conservação. Uma interpretação ecológica do índice de centralidade de intermediação é a sua potencial capacidade de indicar os fragmentos da rede que possuem maior proporção de caminhos mais curtos de dispersão entrecortando sua área e, com isso, essa mancha tem probabilidade de possuir maior variedade genética de longo prazo. A centralidade de intermediação se caracteriza como um índice que varia entre 0 e 1, onde os valores mais altos indicam maior relevância do fragmento ou maior centralidade, sendo estes os fragmentos mais importantes para garantir a conectividade na paisagem.

No mapa da Figura 4 aparecem os fragmentos mapeados de acordo com o respectivo valor do índice de centralidade de intermediação. Os fragmentos com valores mais altos são as peças fundamentais a serem consideradas para a busca da conectividade e formam um padrão de trampolins de habitat.

Este índice se mostra importante também na avaliação da fragmentação, visto que indica fragmentos ou regiões mais susceptíveis ao isolamento. É importante ressaltar que tais fragmentos são importantes em virtude de sua centralidade, sendo que os demais fragmentos

não devem ser simplesmente descartados por não terem centralidade para a conexão, pois estes podem ser relevantes segundo outros aspectos, como por exemplo, possuir grandes áreas núcleo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se 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.

A manutenção ou reestabelecimento da conectividade na paisagem pode evitar a extinção de espécies, principalmente aquelas que continuam sobrevivendo em paisagens alteradas e possivelmente encontram dificuldades para a dispersão num ambiente fragmentado. A análise de rede baseada na teoria dos grafos por meio do programa *MatrixGreen* se mostrou uma aplicação robusta e de fácil implementação, capaz de criar um cenário para dar subsídio a novos formatos de planejamento ambiental com foco na conectividade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a bolsa para pesquisa da CAPES, que favoreceu o desenvolvimento do presente estudo e ao programa de pós-graduação em Geografia da UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

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.

BODIN, Ö., ZETTERBERG, A. **MatrixGreen User's Manual: Landscape Ecological Network Analysis Tool**. Stockholm University and Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2010.

BOLOS, M. **Manual de ciência del paisaje. Teoría, métodos y aplicaciones**. Barcelona: Ed. Masson, 1992. 273p.

BUNN, A., URBAN D.L., KEITT, T. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. **Journal Environment Management**. v. 59, p. 265–278, 2000.

CANTWELL, M. D., FORMAN, R. T. T. Landscape graphs: ecological modeling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes. **Landscape Ecology**. v. 8, p. 239-255, 1993.

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.

DALE, M.R.T., FORTIN, M.J. From graphs to spatial graphs. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**. v. 41 (1), p. 21-38, 2010.

EASTMAN, J.R. IDRISI Selva: **Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark Labs. 2011. 327 p.

FALL, A., FORTIN, M-J., MANSEAU, M., O'BRIEN, D. Spatial Graphs: Principles and Applications for Habitat Connectivity. **Ecosystems**. v. 10, p. 448-461, 2007.

FORMAN, R.T.T., SPERLING, D., BISSONETTE, J.A., CLEVINGER, A.P., CUTSHALL, C.D., DALE, V.H., FAHRIG, L., FRANCE, R., GOLDMAN, C.R., HEANUE, K., JONES, J.A., SWANSON, F. J., TURRENTINE, T., WINTER. T.C. **Road Ecology Science and Solutions**. Island Press, Washington, D.C., 2003.

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.

MINOR, E.S., URBAN, D.L. Graph theory as a proxy for spatially explicit population models in conservation planning. **Ecological Applications**. v.17, p. 1771–1782, 2007.

MONDAL,P., SOUTHWORTH, J. Evaluation of conservation interventions using a cellular automata-Markov model. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 1716-1725, 2010.

MULLER, M.R., MIDDLETON, J. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. **Landscape Ecology**, v.9 (2), p. 151-157, 1974.

PONTIUS, R.G. JR. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.66, p.1011-1016, 2000.

RIBAS, R.P. **Análise espacial da conectividade estrutural na paisagem: Uma aplicação no Mosaico de áreas protegidas do espinhaço: Alto Jequitinhonha - Serra do Cabral**. Universidade Federal de Minas Gerais. Tese (Doutorado). 219 p.

- RODRIGUES, F.H.G., MARINHO-FILHO, J. Translocation of two species of small wild cats in Central Brazil: A preliminary report. **Cat News**. v. 30, p.28, 1999.
- RODRIGUES, F.H.G., MARINHO-FILHO, J., SANTOS, H.G. Home ranges of translocated lesser anteaters *Tamandua tetradactyla* in the cerrado of Brazil. **Oryx**, v. 35, p. 166-169, 2001.
- 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.
- SANTOS JUNIOR, T.S. **Mamíferos do Cerrado de Mato Grosso, com ênfase no uso do espaço por *Cercopithecus thous* (Carnivora, Canidae) e *Mazama gouazoubira* (Artiodactyla, Cervidae)**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 2013. 86p.
- SUAREZ, A.F., CANDEIAS, A.L.B. Modelagem Dinâmica de Cobertura da Terra na Mata Atlântica no município de Maragogipe- BA. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 66/5, p. 953-981, 2014.
- TROVATI, R.G; BRITO, B.A. Nota sobre deslocamento e área de uso de tamanduá-mirim (*Tamandua tetradactyla*) translocado no Cerrado brasileiro. **Neotropical Biology and Conservation**. v. 4, p.144-149, 2009.
- URBAN, D.L., KEITT, T. Landscape connectivity: a graphtheoretic perspective. **Ecology**. v. 82, p. 1205–1218, 2001.
- URBAN, D.L., MINOR, E.S., TREML, E.A., SCHICK, R.S. Graph models of habitat mosaics. **Ecology Letters**. v. 12 (3), p. 260–273, 2009.
- WEGENER, M.; GNAD, F.; VANNAHME, M. The time scale of urban change. In: HUTCHINSON, B.; BATTY, M. (Ed.). **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier. v. 17, p. 175-197, 1986.
- 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.