



Modelagem do desmatamento na região do MATOPIBA

Eraldo Aparecido Trondoli MATRICARDI^{1*}, Adriano Saraiva AGUIAR¹, Eder Pereira MIGUEL¹,
Humberto ANGELO¹, Ricardo de Oliveira GASPAR¹

¹Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil.

*E-mail: ematricardi@gmail.com

Recebido em maio/2017; Aceito em outubro/2017.

RESUMO: A maior parte do desmatamento de vegetação nativa na região MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) está relacionada à expansão das atividades de produção de commodities agrícola. O monitoramento do desmatamento com o uso de dados de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento, associados ao desenvolvimento de modelagem espacialmente explícita podem contribuir para melhor compreensão das variáveis relacionadas ao desmatamento, permitindo também a simulação de prováveis trajetórias futuras deste fenômeno. Na presente pesquisa, foram construídos e simulados três cenários (tendencial, otimista e pessimista) de desmatamento para a região MATOPIBA entre 2011 e 2050 com base no desmatamento observado em 2002, 2008 e 2010. Os resultados dos cenários simulados indicam um aumento de 10,3, 15,3 e 15,9 milhões de hectares de desmatamento de vegetação nativa entre 2011 e 2050 na área de estudo assumindo os cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente. Isto aumentaria o desmatamento em 55%, 82% e 85% (cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente) em relação ao total observado de áreas desmatadas até 2010. Os resultados desta pesquisa podem contribuir com os gestores e tomadores de decisão para a definição de estratégias para reduzir o desmatamento e para melhorar o desenvolvimento sustentado na região do MATOPIBA.

Palavra-chave: Região do MATOPIBA, modelagem espacial, cenários de desmatamento.

Deforestation modeling in the MATOPIBA region

ABSTRACT: Most of deforestation of native vegetation in the MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia) region is related to the expansion of the production activities of agricultural commodities. The deforestation monitoring using remotely sensed data and GIS techniques, associated with the development of spatially explicit modeling can contribute to better understanding the variables related to deforestation and allows the simulation of future trajectories of this phenomenon. In this research, we proposed and simulated deforestation scenarios (trend, optimistic and pessimistic) for the MATOPIBA region between 2011 and 2050 based on deforestation observed in 2002, 2008, and 2010. This study results indicate an increase of deforestation of 10.3, 15.3, and 10.9 million hectares between 2011 and 2050 assuming the optimistic, business as usual, and pessimistic scenarios, respectively. It would increase deforestation in 55%, 82%, and 85% (optimistic, business as usual, and pessimistic, respectively) when compared to the total observed deforestation by 2010. This research results may help decision and policy makers to improve strategies to reduce deforestation and improve sustainable development in the MATOPIBA region.

Keywords: MATOPIBA region, spatial modeling, deforestation scenarios.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço do agronegócio brasileiro, as novas fronteiras têm sido observadas na porção da região nordeste e em parte da região norte do Brasil. Os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, que juntos formam uma das mais recentes fronteiras agrícolas do país, denominada região do MATOPIBA, nome dado pela junção das iniciais das siglas dos quatro Estados. Com potencial agrícola promissor, esta região apresentou uma escala crescente em área plantada e na produção de grãos e outros produtos oriundos da agricultura (MIRANDA et al., 2014).

Segundo os dados do estudo “Projeções do Agronegócio, Brasil 2015/2016 a 2025/2026”, a região deverá produzir 24,4 milhões de toneladas de grãos em 2025/26, caracterizando um aumento de 17,35% em relação às safras

de 2015/16. Sendo o preço da terra o grande motivador da expansão agrícola na região (MAPA, 2016).

A região MATOPIBA está localizada no bioma Cerrado e apesar da sua dimensão e importância, é um dos ecossistemas mais ameaçados, pois a ocupação agrícola de seus solos tem provocado nas últimas décadas, transformações drásticas em sua paisagem natural (SILVA, 2000). Tendo em vista, que a produção agrícola promove desmatamento, até 2013 o Cerrado apresentava apenas 54,5% de sua vegetação nativa (INPE, 2015).

O desmatamento da vegetação do Cerrado ocorre em sua maior parte devido às suas características físicas e climáticas (planícies, boas condições climáticas, solos de fácil correção) e disponibilidade de mão de obra barata, o que proporcionou surgimento do celeiro agrícola atual (CHAVEIRO; CASTILHO, 2010). A conversão de áreas com vegetação

natural para áreas antropizadas causa alterações da fisionomia do ambiente, consequentemente são degradados vários benefícios proporcionados pela vegetação conservada, como por exemplo, conservação do solo, manutenção do clima, fauna, estoque de carbono, entre outros (AMAZONAS, 2009).

O emprego de dados de sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento tem promovido contribuições consideráveis para o monitoramento das alterações do meio físico (Soares et al. 2007, Melo; Souza 2015, Melo et al. 2016), para o gerenciamento territorial (Meneses; Almeida, 2012) e para a avaliação de impactos sobre os recursos naturais possibilitando diversas análises, gerando de resultados importantes com baixo custo em curto prazo de tempo (GASPARINI et al., 2013). Essas técnicas somadas à construção de cenários traduzem impactos advindos de diferentes perspectivas de uso do solo e podem representar o desenho espacial, bem como as perspectivas do desmatamento no futuro (PIONTEKOWSKI et al., 2014).

Assim, as pesquisas com modelagem se apresentam como ferramenta que pode contribuir para o melhor entendimento dos efeitos de atividades antrópicas sobre os recursos naturais. Os modelos podem prever possíveis trajetórias de impactos ambientais, utilizando informações das práticas do passado. Uma vantagem para a modelagem é que os dados utilizados para o processamento e caracterização das áreas utilizando variáveis espaciais relacionadas às diferentes ações antrópicas. O uso dessas variáveis espaciais reforça a imparcialidade dos resultados, uma vez que o operador do modelo apenas organiza os dados de entrada no sistema da modelagem (PIONTEKOWSKI et al., 2014).

Assim, o presente estudo buscou modelar perspectivas de desmatamento na região MATOPIBA utilizando variáveis espaciais relacionadas ao desmatamento envolvendo três cenários (tendência, otimista e pessimista) para o período de 2011 a 2050, utilizando o software DINÂMICA EGO. Os resultados obtidos podem ser utilizados para a reflexão sobre o futuro desejado para a área de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo envolve quatro Estados brasileiros, Tocantins: área total, Piauí: a porção sudoeste, sul e oeste, Maranhão: a porção nordeste e Bahia: porção oeste. A região está localizada entre os meridianos 50° 45' e 41° 45' de longitude Oeste e os paralelos 2° 15' e 15° 15' de latitude Sul. A área total de estudo envolve aproximadamente 73 milhões de hectares (Figura 1).

O limite da região MATOPIBA utilizado neste estudo foi o proposto pelo Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE) do MATOPIBA (MIRANDA et al., 2014).

2.2. Base de dados

Os dados espaciais dos fatores exploratórios utilizados na modelagem, a caracterização de cada variável utilizada, a extensão territorial e mais detalhes da base de dados podem ser observados na Tabela 1. Esses dados foram adquiridos de órgãos públicos, disponibilizados na rede mundial de computadores.

Os dados de desmatamento utilizados para esta análise foram produzidos no contexto do Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélites

(PMDBBS) e executado pela Secretaria de Biodiversidade e Floresta do Ministério do Meio Ambiente – SBF/MMA, através do Centro de Sensoriamento Remoto (CRS) do IBAMA. Os dados de desmatamento disponibilizados envolvem a série histórica correspondente aos anos 2002, 2008 e 2010.

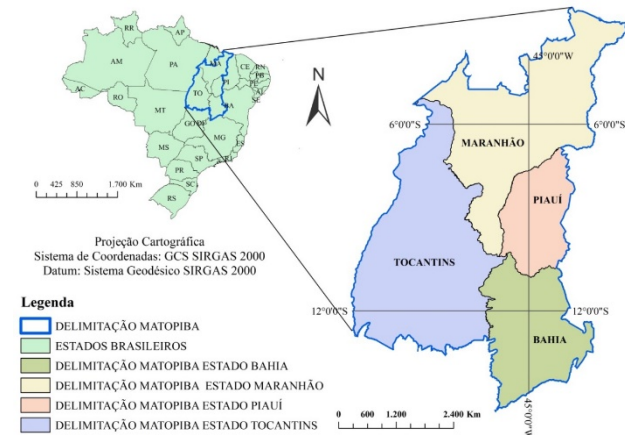


Figura 1. Localização da área de estudo (região MATOPIBA) no Brasil.

Figure 1. Location of the study area (MATOPIBA region) in Brazil.

Tabela 1. Base de dados usada como fatores exploratórios do desmatamento.

Table 01. Database used as deforestation exploratory factors.

Parâmetros	Origem	Escala / Resolução	Tipo	Ano
Desmatamento e áreas protegidas				
Desmatamento do Cerrado	PMDBBS-IBAMA/CSR	1:250.000	vetor	2011
Dados sociais				
Unidade de Proteção Integral	ICMBio-MMA	1:250.000	vetor	2009
Unidade de Uso Sustentável	ICMBio-MMA	1:250.000	vetor	2009
Dados fundiários				
Assentamentos Rurais	INCRA	(*)	vetor	2009
Terras indígenas	FUNAI	(*)	vetor	2009
Dados geográficos				
Rodovias **	DNIT	1:1.000.000	vetor	2009
Principais ferrovias	IBGE	1:1.000.000	vetor	2009
Zonas Urbanas	IBGE	1:250.000	pontos	2009
Principais rios	ANA	1:250.000	vetor	2010
Limites Políticas	IBGE	1:500.000	vetor	2009
Hidrografia				
Bacias Nível 6	ANA	1:250.000	vetor	(*)
Dados biofísicos				
Tipos de vegetação	IBGE	1:250.000	vetor	2013
Solos	IBGE	1:5.000.000	vetor	2013
Dados de relevo				
Modelo Digital de Elevação (MDE)	INPE/TOPO DATA	Resolução espacial de 30m	raster	2011
Acurácia dos dados				
Cenas RapidEye (2335207, 2234325, 2334815, 2333410)	Geo Catálogo (MMA)	Resolução espacial de 5,5m	raster	2011

Nota: * Escala ou data não informada na fonte. ** Rodovias principais e secundárias.

Os Modelos de Elevação Digital (MED) utilizados neste estudo foram obtidos do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE). Os MED foram utilizados para gerar mapas de altitude e declividade para a área de estudo.

2.3. Softwares utilizados

Neste estudo foi utilizado os softwares ArcMap®, que é a aplicação central do ArcGIS®, versão 10.2, voltado para a produção de mapas e processamento de dados georreferenciados, e o software DINÂMICA EGO®, versão 3.0.1, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais. Este último programa é de domínio público, com plataforma própria para modelagem ambiental (SOARES FILHO et al., 2009).

2.4. Métodos

No processo de modelagem é necessário que todos os mapas de variáveis estáticas, dinâmicas e categóricas de entrada no modelo, apresentem exatamente a mesma resolução espacial e mesma coordenada, resultando em uma matriz com mesmo valor de colunas e linhas. A resolução espacial aplicada nos mapas deste estudo foi de 90 x 90 metros com 15.911 linhas e 11.826 colunas, e utilizado o sistema de coordenada *South America Albers Equal Area Conic*.

As variáveis dinâmicas correspondem às distâncias de áreas desmatadas, considerando os períodos inicial e final de execução do modelo. Estas variáveis foram baseadas em taxas de transição obtidas a partir dos dados observados do desmatamento em 2002, 2008 e 2010.

As variáveis estáticas foram organizadas, em categóricas e contínuas. No grupo das variáveis categóricas foram utilizados os tipos de vegetação, os tipos de solos e as áreas protegidas (Terras Indígenas e Unidades de conservação de uso sustentável e proteção integral). No grupo das variáveis contínuas, foram utilizadas a: distância das rodovias principais e secundárias, distância dos rios principais, distâncias das ferrovias, distâncias das zonas urbanas, distâncias de assentamentos rurais, altitude e a declividade (Figura 02).

As variáveis que envolveram as distâncias dos objetos de análise (rios, rodovias, etc.), foram preparadas a partir de estimativas das distâncias euclidianas, onde cada pixel da imagem recebeu um valor específico referente à distância no mapa do objeto de referência. Para as variáveis altitude e declividade, não foram estabelecidas distâncias, pois os Modelos Numéricos de Elevação Digital derivados das imagens do projeto TOPODATA constituem variáveis contínuas de terreno (ver Figura 2).

A fim de considerar as características e efeitos locais na região do MATOPIBA para o desenvolvimento do modelo, foi adotado o critério de regionalização por bacias e interbacias. Dessa forma, o modelo considera os efeitos locais das variáveis espacialmente explícita por unidade de regionalização, melhorando a eficiência da modelagem. Tais efeitos podem ser influenciados por fenômenos particulares das bacias e interbacias utilizadas nesta análise.

Para a regionalização foram utilizados os dados de ottobacias que envolvem um conjunto de bacias e interbacias dos trechos da rede hidrográfica. As bacias e interbacias foram codificadas segundo o método de Otto Pfafstetter para

a classificação de bacias, realizado e disponibilizado pela Agência Nacional de Água – ANA. A região do estudo possui 65.535 ottobacias de nível 6 (seis) a partir do nível 1 (ottobacias principais), com área média de 11.576 hectares (Figura 3).

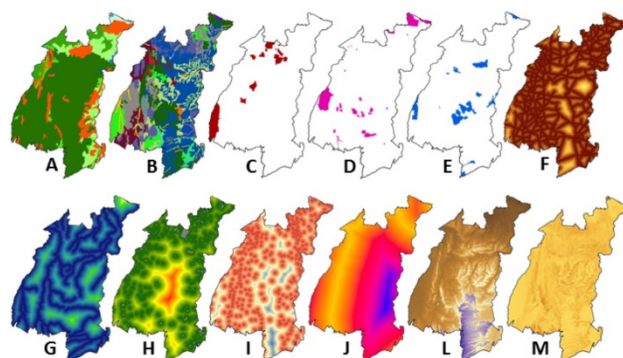


Figura 2. Variáveis estáticas utilizadas para o desenvolvimento do modelo, onde: A – Tipos de cobertura da terra; B – Tipos de solos; (C) Terras indígenas; (D) Unidade de Conservação de Proteção Integral; (E) Unidade de Conservação de Uso Sustentável; F - Rodovias principais e secundárias; G - distância dos rios principais; H - Distância dos assentamentos rurais; I - Distância de zonas urbanas; J - Distância de ferrovias; L – Altitude e; M - Declividade. Figure 2. Static variables used for the model development. A – Land cover types; B – Soil types; (C) Indigenous lands; (D) Protected areas of full protection; (E) Protected areas of sustainable uses; F – Main and secondary roads; G – Main river distance; H – Rural settlement distance; I – Urbana area distance; J – Rail road distance; L – Altitude and; M - Slope.

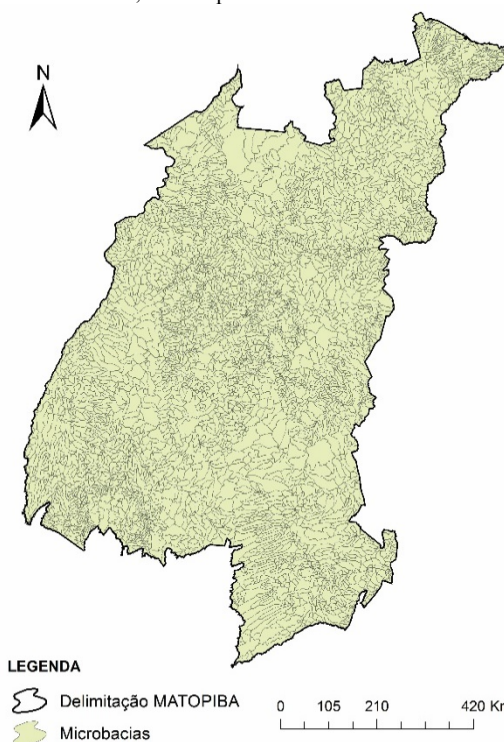


Figura 3. Microbacias (nível 6) na região do MATOPIBA. Figure 3. Watersheds (level 6) in the MATOPIBA region.

Para obtenção dos cenários simulados e projetados, foram realizados os procedimentos em 5 (cinco) passos, sendo indispensável a sequências destes para sua execução (Tabela

2). Para simplificar o processo, cada passo foi realizado em modelos separados, visto que podem ser incorporados em um único modelo.

Tabela 2. Etapas aplicadas para simulação dos cenários de desmatamento adotados para a região MATOPIBA usando o software DINÂMICA EGO.

Table 2. Steps applied to simulate the deforestation scenarios assumed for the MATOPIBA region MATOPIBA using DINÂMICA EGO software.

Geração das matrizes de transição
Calibração do modelo
Criar e executar um modelo de simulação
Validação do modelo
Geração de cenários futuros

2.4.1. Geração da matriz de transição

A matriz de transição compreende o processo de estimativa das taxas de transição de vegetação nativa para desmatamento ocorrido entre o ano inicial e final do período de estudo. No presente estudo, as taxas de transição corresponderam aos períodos de 2002 a 2010, 2008 a 2010 e 2002 a 2008, utilizadas para produzir as projeções de desmatamento nos cenários Tendencial, Otimista e Pessimista respectivamente.

Para a estimativa das taxas de transição utilizou-se a ferramenta *Determine Transition Matrix*, um *functor* da modelagem no DINÂMICA EGO, que permite estimar as taxas denominadas “*Single Step*” e “*Multiple Step*” respectivamente Passo Único e Passo Múltiplo (Soares Filho et al., 2009). O “*Single Step*” refere-se à matriz de transição ocorrida durante todo período de tempo da análise (global) e o termo “*Multiple Step*” utilizado no modelo refere-se à matriz de transição gerada por intervalo de tempo durante o período da análise (anual).

2.4.2. Calibração do modelo

Para calibração do modelo, foram utilizadas faixas de distâncias euclidianas das variáveis estáticas e contínuas, onde para cada uma dessas faixas, foram estimados os pesos de evidências em relação ao objeto de referência dos mapas de variáveis.

As variáveis dinâmicas e as variáveis estáticas contínuas necessitam dos parâmetros de classificação, sendo estes: o incremento mínimo é equivalente à resolução das células (90 metros) para mapas de distância; os deltas máximos e mínimos; e ângulos de tolerância, que medem o ângulo de desvio a partir de uma reta, foram utilizados os parâmetros pré-definidos pela ferramenta. As variáveis estáticas categóricas foram definidas como variáveis de categoria e a estimativa dos pesos de evidência foram realizadas para cada tipo específico de variável.

As variáveis estáticas contínuas (declividade e altitude) foram reclassificadas em intervalos ou faixas de interesse. Para a variável declividade (estimada em graus), optou-se por um incremento de 1° para cada intervalo. Para a variável altitude (metros), adotou-se o incremento de 10 em 10 metros.

2.4.3. Modelo de simulação do desmatamento

Nesta etapa, o programa DINÂMICA EGO recebeu como entrada: a matriz de transição “*Multiple Step*”; os pesos de evidências calculados; o mapa de desmatamento inicial; os

mapas de variáveis estáticas e o mapa de microbacias da região MATOPIBA.

O modelo possui duas funções na plataforma do programa DINÂMICA EGO que são responsáveis pelo processo de transição das células correspondentes à vegetação nativa para células correspondente a áreas desmatadas. As funções são “*expander*” e “*patcher*”. O “*expander*” tem a papel de expandir o desmatamento a partir das áreas já desmatadas e a função “*patcher*” de criar novas áreas de desmatamento.

É necessário determinar o percentual de células a serem alteradas em cada período de tempo dos cenários pelo “*expander*”, disponível na função “*modulate change matrix*”. Além disso, o programa automaticamente geracélulas referente a função “*patcher*”. Nesta análise, foi definido o valor de 70% para o “*expander*”, que implica em que 70% do incremento do desmatamento simulado foi alocado a partir de desmatamento previamente observado ou simulado.

Na sequência, estabeleceu-se no modelo a média, variância e isometria nas funções “*expander*” e “*patcher*”. Para “*expander*”, adotou-se a média de 9 hectares, a variância de 18 hectares e a isometria de 1,6, utilizando-se os mesmos parâmetros para “*patcher*”. Estes valores foram obtidos através de testes sucessivos, até obter um resultado que demonstrou um padrão espacial satisfatório da simulação do desmatamento na área de estudo.

2.4.3.1. Validação do modelo

Esta etapa consiste em certificar a similaridade mínima entre o mapa simulado e o mapa de referência (observado), para isso, foi usado o mapa de desmatamento produzido para o ano 2010, e o mapa de desmatamento (observado) do ano correspondente, proveniente do PMDBBS do IBAMA/CSR para o Cerrado na região MATOPIBA.

O método da similaridade *Fuzzy* foi empregado para a validação do modelo. Este método consiste na comparação dos dados produzidos na etapa anterior com os observados do desmatamento, utilizando as diferenças para distintos tamanhos de janelas, através da função de decaimento constante que utiliza janelas de tamanhos variáveis de 1x1 a 13x13 pixels.

Neste processo, o software computa as diferenças entre os mapas de desmatamento inicial (2002) e final (2010) e, logo relaciona as diferenças entre o mapa de desmatamento observado em 2002 e o mapa simulado para o ano 2010. Dessa forma, os mapas de diferenças são usados em funções que derivam de valores de similaridade mínima para cada tamanho de janela (SOARES FILHO et al., 2009).

2.4.4. Cenários futuros

Com a aquisição do grau de similaridade suficiente entre o mapa simulado e de referência, foi gerado três cenários futuros: Cenário Tendencial, Otimista e Pessimista. No cenário tendencial foram consideradas as perspectivas atuais dos padrões de desmatamento denominado de “o mesmo de sempre”. Utilizando como taxa média anual do desmatamento e para calibração dos pesos de evidências, a série histórica de desmatamento ocorrida nos anos de 2002 a 2010.

O cenário otimista tem como particularidade principal, a aplicação da Lei Federal Nº 9.985/2000 que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza

(SNUC) e determinou no Art. 25 que uma Zona de Amortecimento deve ser observada no entorno das unidades de conservação, exceto em Áreas de Proteção Ambiental e Reservas Particulares do Patrimônio Natural. Nesse cenário, foi utilizada como taxa média anual do desmatamento e calibração dos pesos de evidências, a série histórica de desmatamento ocorrida nos anos de 2008 a 2010.

Outro fator considerado neste cenário foi o que estabelece o Código Florestal, (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) que prevê a existência de Reservas Legal (RL), bem como de Áreas de Preservação Permanente (APP) em propriedades rurais.

No cenário pessimista foi utilizado o período de 2002 a 2008, em que as taxas anuais de desmatamento são superiores aos demais períodos. Essas taxas observadas e utilizadas na modelagem influenciaram diretamente na quantidade desmatada no futuro e na estimativa dos pesos de evidências relacionados ao comportamento das variáveis em relação aos novos desmatamentos. Nesta condição, observa-se a ausência da fiscalização ambiental para o desmatamento e para a implantação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) como exigências do Novo Código Florestal instituído pela Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012.

A elaboração de cenários é um instrumento que pode servir para compreender e antecipar as mudanças potenciais no futuro, e assim, melhorar as tomadas de decisões a respeito do uso do solo. Entretanto, os cenários não são previsões em sentido exato, mas apresentam a visão de diferentes futuros alternativos, plausíveis e imaginados (CHERMACK, 2007).

3. RESULTADOS

A partir da matriz de transição *Multi Step*, as taxas anuais estimadas de desmatamento foram 1,2%, 0,9% e 1,3% (Figura 4) para os períodos entre 2002 e 2010, 2008 e 2010 e 2002 e 2008, respectivamente.

Já a partir da matriz de transição *Single Step* (Passo Único), as taxas anuais estimadas de desmatamento foram 9,7%, 1,95% e 7,9% para os períodos de 2002 a 2010, 2008 a 2010 e 2002 a 2008, respectivamente. As taxas de desmatamento de 9,7%, 1,9% e 7,9% foram adotadas para os Cenários Tendencial, Otimista e Pessimista, respectivamente (Figura 5).

Na sequência foram obtidas as probabilidades de transição (vegetação para desmatamento) das células obtidas a partir das estimativas dos pesos de evidência das variáveis estáticas e dinâmica. Na Figura 6 são apresentados os pesos de evidência de cada mapa de variável aplicados nas transições, das faixas da variável dinâmica “distância das áreas desmatadas” de uma variável estática contínua “distância de zonas urbanas” e uma variável categórica “Unidades de Conservação de proteção integral” estimada com base no mapeamento do desmatamento ocorrido no período de 2002 a 2010.

Analisando os resultados apresentados na Figura 6 A e B fica evidente que quanto mais próximo de áreas já desmatadas e de zonas urbanas, as condições são favoráveis ao processo de conversão de vegetação nativa para desmatamento, visto que os pesos de evidências apresentam probabilidades positivas. Em relação a variável categórica (Figura 6 C) a resposta é inversa às duas situações iniciais, devido à resposta negativa das unidades de conservação de

proteção integral ao uso da terra, porém, essa resposta é positiva às unidades de conservação sustentável por ser agente ativo de uso da terra.

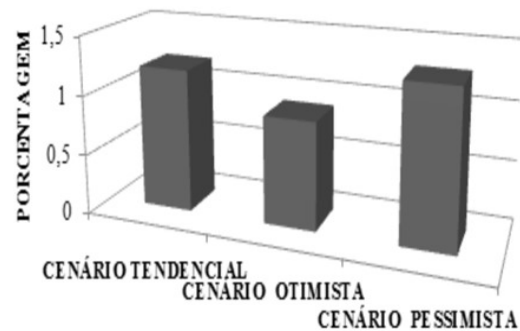


Figura 4. Matrizes de transição de passo múltiplo (taxa anual) do desmatamento adotadas para os cenários Tendencial, Otimista e Pessimista.

Figure 4. Matrix multistep transition (annual rate) of deforestation assumed for the Trend scenarios, Optimistic and Pessimistic.

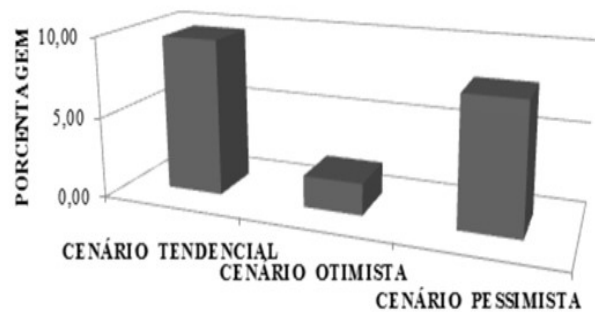


Figura 5. Taxas de desmatamento estimadas a partir de matrizes de transição de passo único (período de análise) adotadas nos cenários Tendencial, Otimista e Pessimista.

Figure 5. Deforestation rates estimated based on Matrix single step transition (analysis period) the corresponding deforestation to Trend scenarios, Optimistic and Pessimistic.

Na etapa de simulação do desmatamento, foi produzido o mapa de desmatamento simulado para o ano 2010 e validado através da comparação quantitativa com o mapa de desmatamento observado do ano 2010. Utilizando o índice de similaridade *Fuzzy* observou-se uma similaridade de 71% em janelas de 5x5 pixel (Tabela 03). Com esse resultado, foi possível validar a simulação, pois conforme sugerido por Hagen (2003) a obtenção de valores acima de 50% de similaridade entre os mapas categóricos pode ser considerada satisfatórios para validação de uma classificação. Esse resultado indica que em uma área de 20,3 hectares, 71% das células do mapa simulado são idênticas ao do mapa de referência do ano 2010.

O índice de similaridade *Fuzzy* pode torna-se inviável para a validação quando se utiliza uma resolução espacial muito grande. Segundo Ximenes et al. (2008), esse comportamento demonstra que, para janelas com resolução muito grande, o índice de similaridade torna-se ineficiente para avaliar a semelhança entre o mapa observado e o simulado.

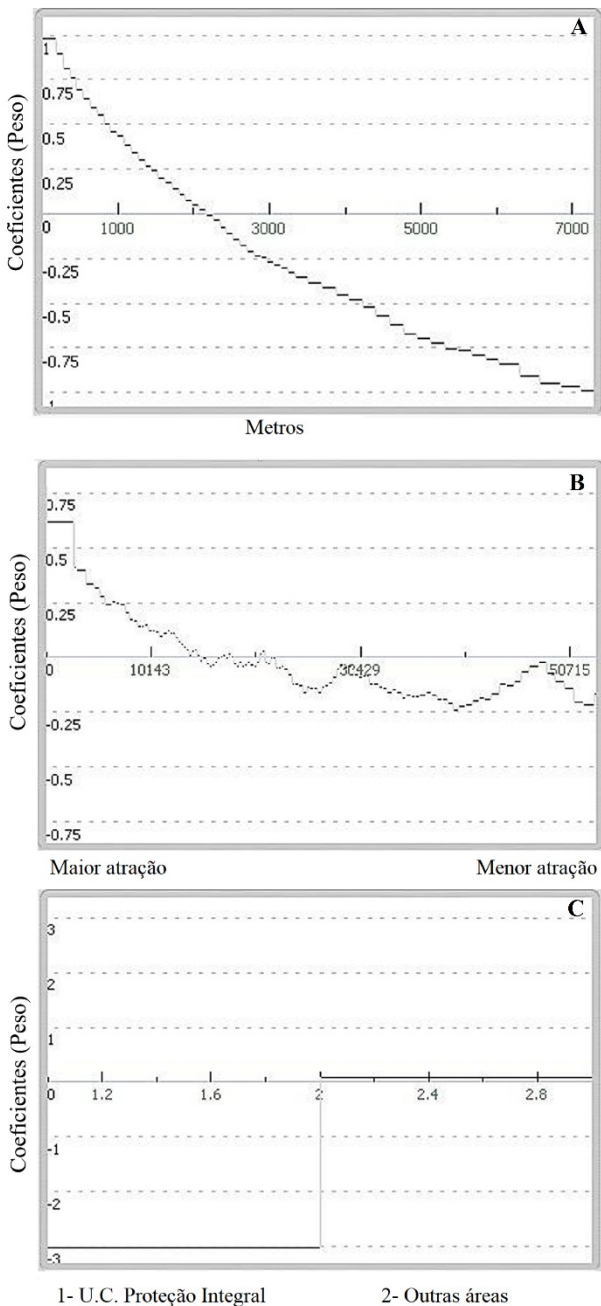


Figura 6. Variação dos pesos de evidência para: (A) por faixas de distância das áreas desmatadas, (B) por distância de zonas urbanas, e (C) Unidades de Conservação de proteção integral (variável categórica).

Figure 6. Variation of weights of evidence by: (A) distance from deforestation, (B) distance from urban areas, and (C) Protected lands of full protection (categorical variable).

Os resultados de desmatamento simulado obtidos para os três cenários (tendencial, otimista e pessimista) projetados até 2050, com as perspectivas propostas de manutenção dos padrões de desmatamento em cada cenário são apresentados a seguir.

Cenário otimista – Foi estimado um aumento do desmatamento na região de 10,3 milhões de hectares entre 2011 e 2050, equivalentes a 55% de aumento em relação ao total do desmatamento observado até 2010. Os desmatamentos futuros na região de estudo seriam mais evidentes na região norte MATOPIBA e totalizariam

aproximadamente 29 milhões de hectares ou 39,8% da área de estudo até 2050 (Figura 7A).

Cenário tendencial - A característica principal desse cenário foi considerar os aspectos de sustentação do desmatamento, ou seja, “o mesmo de sempre”. Neste cenário, o desmatamento teria um incremento de 15,3 milhões de hectares e, com isso, o total de áreas desmatadas corresponderiam a 34,1 milhões de hectares ou 46,7% da área de estudo até 2050 (Figura 7B).

Cenário pessimista – Este cenário é caracterizado por utilizar a maior taxa de desmatamento observado (2002 a 2008) na área de estudo. Neste cenário, seriam desmatados um total de 34,6 milhões de hectares de vegetação nativa entre 2011 e 2050. Neste cenário a região MATOPIBA atingiria 47,4% do seu território em áreas convertidas de vegetação nativa para os diferentes usos antrópicos (desmatamento), com um incremento de 21,7% em relação ao desmatamento observado até 2010. As previsões de desmatamento neste cenário estão apresentadas na Figura 7C.

Tabela 03. Validação do índice de similaridade Fuzzy com diferentes tamanhos de janela.

Table 03. Validation of fuzzy similarity index with different window sizes.

Modelo	Tamanho das janelas (Pixel)	Índice de similaridade (Fuzzy)
SIMULAÇÕES de 2002 a 2010	1 x 1	0,51
	3 x 3	0,63
	5 x 5	0,71
	7 x 7	0,77
	9 x 9	0,81
	11 x 11	0,84
	13 x 13	0,87

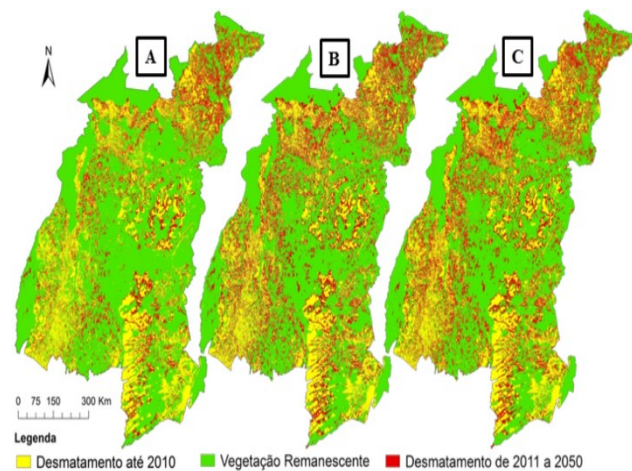


Figura 7. Simulação das áreas desmatadas entre 2011 e 2050 na região do MATOPIBA assumindo: (A) Cenário otimista, (B) Cenário tendencial e, (C) Cenário pessimista.

Figure 7. Simulation of deforested areas between 2011 and 2050 in the MATOPIBA region assuming: (A) Optimist scenario, (B) Business as Usual scenario, and (C) pessimistic scenario.

Na Figura 8 são apresentadas as quantidades de áreas que seriam desmatadas com erro padrão do desmatamento até o ano 2050 na região MATOPIBA no conjunto dos três cenários. As quantidades de desmatamento para o cenário tendencial e cenário pessimista se comportaram de maneira similar devido à pequena diferença (0,1%) entre as taxas de

transição (incremento do desmatamento) utilizadas na modelagem de cada um destes cenários. Os erros padrão de estimativas foi de 1,17, 1,75 e 1,8 milhões de hectares para os cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente.

Os resultados são apresentados em intervalos de cinco em cinco anos até 2050 para facilitar a visualização da dinâmica do desmatamento no período de análise. Os resultados das simulações preveem um aumento de 14,1%, 21%, e 21,7% do desmatamento até 2050 na área de estudo assumindo-se os cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente. Com isso, a região de estudo ficaria com o total de 29±1,17, 34,1±1,75 e 34,6±1,8 milhões de hectares de vegetação nativa desmatados até 2050 nos cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente.

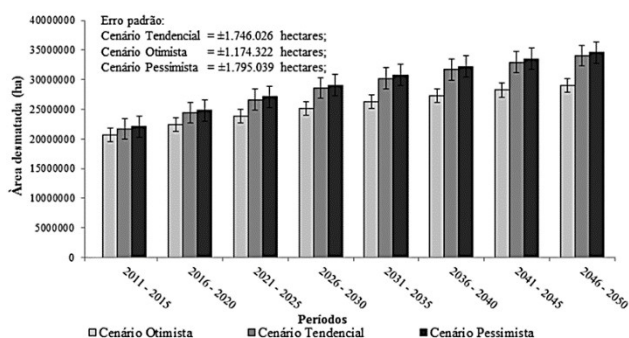


Figura 8. Previsão de desmatamento (hectares) nos três cenários (tendencial, otimista e pessimista) para a região do MATOPIBA entre 2011 e 2050.

Figure 8. Predicted deforestation (hectares) assuming three scenarios (business as usual, optimistic, and pessimistic) for the MATOPIBA region between 2011 and 2050.

4. DISCUSSÃO

Embora as projeções de desmatamento não mensuram de forma precisa as condições futuras, essas projeções simulam a variação do desmatamento estatisticamente provável de ocorrência na área de estudo. São, por isso, importantes para prognóstico das áreas mais vulneráveis ao desmatamento e de possíveis impactos sobre a vegetação natural. Como exemplo, dos impactos ambientais, pode-se mencionar a extinção de diversas espécies, as influências sobre o clima, a erosão e empobrecimento dos solos, a alteração da qualidade da água, as mudanças no nível superficial das águas, a redução da evapotranspiração, o aumento da vulnerabilidade da região a incêndios florestais, dentre outros problemas (COHEN ET AL., 2007).

As simulações do desmatamento estimadas com base nas variáveis utilizadas no presente estudo revelaram que o desmatamento futuro deverá se expandir a partir das áreas desmatadas. Este fenômeno foi observado por Aguiar et al. (2007) e tende a ocorrer de forma similar na área do presente estudo. A grande preocupação, entretanto, é a pressão que a expansão do desmatamento deverá exercer sobre os remanescentes naturais do Cerrado, especialmente aqueles localizados em áreas protegidas na região de estudo.

Geist; Lambin (2002) observaram que o desmatamento não é resultado da ação individual de uma ou outra variável, mas sim da relação complexa de distintos fatores das variáveis que tem sua origem em processos sociais, políticos e econômicos ditos complexos. Assim, no presente estudo, foram incluídas apenas as variáveis que melhor

representassem a complexidade dos processos que afetam o desmatamento da vegetação nativa na área de estudo.

4.1. Áreas protegidas

Os resultados deste estudo indicam grande pressão antrópica sobre as áreas protegidas (Unidades de Conservação e Terras Indígenas) que compõem a região MATOPIBA nos próximos anos. As maiores áreas de desmatamentos estão previstas dentro de unidades de conservação de uso sustentável, com a previsão de incremento de aproximadamente 900 mil hectares até o ano de 2050 nos cenários tendencial e pessimista. As terras indígenas e unidades de conservação de proteção integral também deverão sofrer grandes impactos quando comparados com a área afetada até 2010.

As unidades de conservação de proteção integral apresentaram um incremento do desmatamento em relação ao observado em 2010 de 444%, 727% e 839% para os cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente. Do mesmo modo, as Terras Indígenas apresentaram um incremento do desmatamento em relação a 2010 de 316%, 438% e 494% nos cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente. Por fim, as unidades de conservação de uso sustentável apresentaram incrementos de 146%, 182% e 186% nos cenários otimista, tendencial e pessimista, respectivamente. Neste último caso, embora tenham sido estimados os menores incrementos relativos, a área absoluta desmatada representou mais de 1,6 milhões de hectares no cenário otimista desta análise (Figura 9).

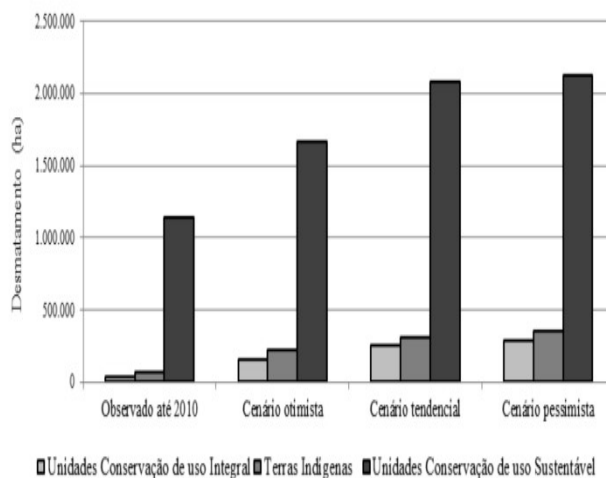


Figura 9. Áreas desmatadas (hectares) dentro de áreas protegidas observado até 2010 e previsão nos três cenários estudados (otimista, tendencial e pessimista) até 2050.

Figure 9. Deforested areas (hectares) within protected lands observed by 2010 and assuming three studied scenarios (optimistic, business as usual, and pessimistic scenarios) by 2050.

A pressão sobre as áreas protegidas deve ser objeto de atenção especial. Pedlowski et al. (2005) argumentam que uma vez iniciado as ocupações irregulares, há tendência de ampliação da pressão antrópica e descaracterização das áreas protegidas. Como exemplo, estes autores revelaram o início da invasão da Floresta Nacional do Bom Futuro em Rondônia e o risco de sua descaracterização total. Tal fato foi consolidado com a instituição da Lei Federal n. 12.249 de 11 de junho de 2010, que reduziu substancialmente a área da referida Floresta Nacional. O estudo de caso destes autores e os resultados deste estudo indicam que processos

semelhantes podem ocorrer na região do MATOPIBA, com consequências severas à conservação das áreas protegidas.

5. CONCLUSÕES

Assumindo-se qualquer um dos cenários deste estudo, os desmatamentos previstos para o período de estudo (2011 a 2050) na região do MATOPIBA poderão alcançar taxas consideradas altas. Tais mudanças previstas na vegetação natural da região podem trazer complicações ambientais, com efeitos diversos e imprevisíveis. Destaca-se, entretanto, o aumento da fragmentação da vegetação nativa, com consequências para a formação dos corredores ecológicos e à biodiversidade na região, além dos potenciais efeitos na regulação dos recursos hídricos e nas mudanças climáticas.

Nas áreas protegidas, existe uma pressão antrópica eminente observada em 2010. Os cenários simulados neste estudo indicam que esta pressão deverá ser catalisada nas próximas décadas, especialmente sobre as categorias de unidades de conservação de proteção integral, seguidas pelas terras indígenas e unidades de conservação de uso sustentado. Deste modo, os cenários aqui construídos apontam para a tomada de medidas e definição de estratégias pelo poder público para assegurar a integridade das unidades de conservação e terras indígenas na região de estudo.

Por fim, entende-se que os processos de modelagens similares ao implementado no presente estudo incluem incertezas e erros. Todavia, tais erros podem ser estimados fazendo com que os resultados possam ser utilizados para reflexão técnico-científica e para definição de políticas públicas futuras para a região estudada.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da CAPES, CNPq e UnB pelo apoio na realização desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.209, n.6, p.169-188. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.06.019>
- AMAZONAS. Governo do Estado do Amazonas. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável: **A floresta amazônica e seu papel nas mudanças climáticas**. Manaus: CECLIMA, 2009. 36p.
- CHAVEIRO, E. F.; BARREIRA, C. C. M. A. **Cartografia de um pensamento de cerrado. Goiânia, Goiás**, Editora Vieira, 2010. 186p.
- CHERMACK, T. J. Disciplined imagination: Building scenarios and building theories. **Futures**, Amsterdam, v.39, n.3, p.1-15. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2006.03.002>
- COHEN, J. C. P., BELTRAO, J. C., GANDU, A. W., SILVA, R.R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. **Ciência Cultura**, Campinas, v.59, n.3, p.36-39. 2007.
- FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**. Amsterdam, v.80, n.1, p.185-201. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4).
- GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. **Bioscience**, Oxford, v.51, n.2, p.143-150. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**. Kensington, v.17, n.3, p.235-249. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13658810210157822>
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. **Projeto TerraClass Cerrado 2013 – Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Cerrado**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80049/Cerrado/publicacoes/Livro%20EMBRAPA-WEB-1-TerraClass%20Cerrado.pdf>. Acesso em : 05 ago 2016.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Assessoria de Gestão Estratégica. **Projeções do Agronegócio - Brasil 2015/2016 a 2025/2026: Projeções de Longo Prazo**. Brasília, 2016. 41p.
- MELO, P. M.; SOUZA, R. M. Mapeamento geomorfológico da fragilidade ambiental do sítio urbano de Garanhuns-PE. **Nativa**, Sinop, v.4, n.5, p.303-307, out./dez. 2015. DOI: 10.14583/2318-7670.v03n04a07
- MELO, P. M.; SOUZA, R. M.; ROSS, J. L. S. Modelagem de geoformas para mitigação do risco geoambiental em Garanhuns -PE. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 10, n.22, p.87-105, jan./abr. 2016. Disponível em: <http://revista.ufrn.br/actageo/article/view/3281>. Acesso em: 11 set 2017.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. 2012. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 11 set 2017.
- MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; TORCIANO, R. **Proposta de Delimitação Territorial do MATOPIBA**. 2014.. Disponível em: https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf. Acesso em: 11 set 2017.
- PEDLOWSKI, M. A.; MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D.; COWERON, S. R.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, L. C. Conservation units: a new deforestation frontier in the Amazonian state of Rondônia, Brazil. **Environmental Conservation**, Cambridge, v.32, n. 2, p.149-155. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0376892905002134>
- PIONTEKOWSKI, V. J.; MATRICARDI, E. A. T.; PEDLOWSKI, M. A.; FERNANDES, L. C. Avaliação do Desmatamento no Estado de Rondônia entre 2001 e 2011. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.21, n.3, p.297-306.2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.068213>
- SILVA, L. L. O papel do estado no processo de ocupação das áreas de cerrado entre as décadas de 60 e 80. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v.1, n.2, p.24-36. 2000. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/viewFile/15251/8552>. Acesso em: 11 set 2017.
- SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; ROCHA, J. V. Sensoriamento Remoto no Monitoramento do Uso da Terra em Projeto de Reforma Agrária: o caso do Projeto

de Assentamento Reunidas. **Revista Ciências Agrárias**. Belém, v.47. n.1. p.221-229. 2007.

SOARES FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. S. editores. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinâmica ego. Guia prático do Dinâmica Ego**. Centro de Sensoriamento Remoto/UFG. 2009. 85p.

XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. D. Modelagem Dinâmica do Desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v.14. n.6. p.370-391. 2008.