



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**ESTIMATIVAS DE MUDANÇAS ESPAÇO TEMPORAIS ADJACENTES
A RODOVIAS NA AMAZÔNIA: ESTUDO DE CASO NA BR 422**

ANDRÉ LUIS FONSECA FONTANA

**Dissertação submetida ao
Programa de Pós-graduação
em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do
Ceará, como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Ciências
(M.Sc.) em Engenharia de
Transportes.**

Volume 1

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS AUGUSTO UCHÔA DA SILVA

Fortaleza, 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

F756e Fontana, André Luís Fonseca.

Estimativas de mudanças espaço temporais adjacentes a rodovias na Amazônia: estudo de caso na BR 422 / André Luís Fonseca Fontana. – 2011.

129 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2011.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva.

1. Transportes. 2. Rodovias. 3. Autômato celular. I. Título.

CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FONTANA, A.L.F. (2011). Estimativas de mudanças espaço temporais adjacentes na rodovias: Estudo de caso BR na 422. Fortaleza, 2011. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 131 pág.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: André Luis Fonseca Fontana

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estimativas de mudanças espaço temporais adjacentes a rodovias: Estudo de caso na BR 422. Mestre 2011.

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

André Luis Fonseca Fontana
Rua Capanema, número 23, Vila permanente,
Cep 68464 000, Tucuui -PA, Brasil
e-mail: andreluis@det.ufc.br

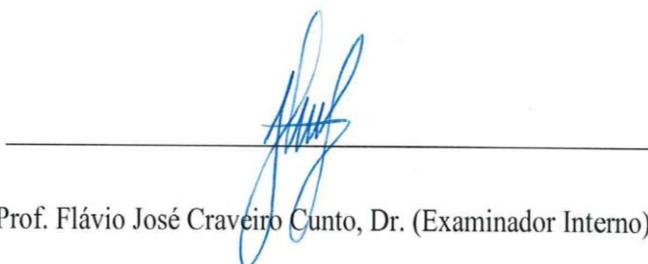
**ESTIMATIVAS DE MUDANÇAS ESPAÇO TEMPORAIS ADJACENTES A
RODOVIAS NA AMAZÔNIA: ESTUDO DE CASO NA BR 422**

André Luis Fonseca Fontana

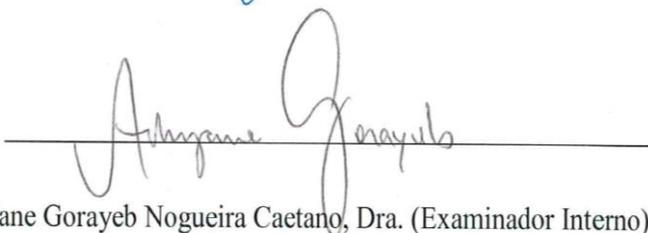
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.



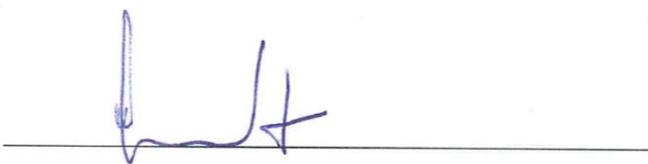
Prof. Carlos Augusto Uchôa da Siva, Dr. (Orientador)



Prof. Flávio José Craveiro Cunto, Dr. (Examinador Interno)



Prof.ª Adriane Gorayeb Nogueira Caetano, Dra. (Examinador Interno)



Prof. Maurício Roberto Veronez, Dr. (Examinador Externo)

FORTALEZA, CE – BRASIL.

NOVEMBRO DE 2011

“Embora ninguém possa voltar atrás para fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora a fazer um novo fim”.

CHICO XAVIER

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todos que depositaram confiança no meu potencial;

Dedico a todos aqueles que creem que Deus sempre possui um ótimo plano para nós;

Dedico à minha esposa e filha;

Dedico aos meus pais (Onivaldo e Fátima), por ser quem são;

Dedico à todos primos, tios, avós (em memória) e minha avó.

Ao meu irmão Rômulo “Muzzaga”;

Dedico a todos os colegas e professores do DET, em especial ao professor orientador Carlos Uchôa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, responsável por tudo que existe;

A minha mãe e pai, pela educação, confiança e ensinamentos de vida que foram me transmitidos;

À Maria Elisa (esposa) e Larissa (filha) pelo “suporte” na área emocional fundamentais neste trabalho, pois sempre que me achava sem forças, olhava para elas e recuperava todas as energias necessárias para continuar;

Ao meu tio “Robert” pelo entusiasmo e apoio. Valeu...Robert!!

Agradeço à bolsa concedida pela CAPES;

Agradeço ao professor e amigo Uchôa, pelo apoio e voto de confiança. Agradeço à professora Suelly Barroso e a Ivone pela ajuda quando cheguei ao PETRAN;

Agradeço a todos os professores do programa, com ênfase no prof. Felipe, que querendo ou não, ajudou-me muito neste trabalho;

Aos colegas de turma, Saulo, Nikael, Ricardo e Igor, bons companheiros de futebol nas quinta feiras, e principalmente ao “mala” Paulo André (PA), sem dúvidas coautor deste trabalho;

Ao Bruno Rafael (em Tucuruí) pela ajuda final com a formatação do texto.

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes

**ESTIMATIVAS DE MUDANÇAS ESPAÇO TEMPORAIS ADJACENTES
A RODOVIAS NA AMAZÔNIA: ESTUDO DE CASO NA BR 422**

André Luis Fonseca Fontana

Novembro de 2011

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS AUGUSTO UCHÔA DA SILVA

Este trabalho apresenta um método para a estimativa de mudanças espaço temporais no entorno de uma rodovia localizada na Amazônia, utilizando para tanto a técnica Autômatos Celulares adaptada em ambiente SIG, onde as variáveis explicativas do modelo serão somente os atributos do terreno. O modelo proposto usa imagens vetoriais (obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que posteriormente são convertidas para arquivos tipo *grid* – em formato *raster*, com a série histórica das mudanças espaciais na região objeto de estudo. Espera-se auxiliar os tomadores de decisão no atendimento das solicitações da resolução CONAMA 01/86 relativas à concepção de modelos que considerem cenários **com** e **sem** o empreendimento, e que os processos de construção/recuperação de rodovias possam ser realizados atendendo às normas legais, visando minimizar os potenciais impactos sócio ambientais. O modelo gerado a partir dos ACs mostrou-se promissor na geração de estimativas futuras de desmatamento e um bom indicador quantitativo e qualitativo para suporte no processo de tomada de decisão que pondere o desmatamento futuro a ser causado pela construção e/ou pavimentação de uma rodovia na Amazônia.

ABSTRACT

This paper presents a method for generating estimates of temporal changes in the surrounding area of a highway located in the Amazon, using the technique Cellular Automata and explanatory variables, only attributes of the land. The proposed model uses vector images (obtained from the National Institute for Space Research in Brazil), which are converted to grid type files – raster image, representing a series of spatial changes in the region of study. With this proposition, it is expected to assist decision makers in order to meet the requests of CONAMA Resolution 01, relating to environmental impacts, more specifically, as regards the construction of models which consider scenarios with and without the project, and that the process of construction / rehabilitation of roads can be made in view of the legal norms in order to minimize potential environmental and social impacts. The model generated from the CAs showed promise in generating future estimates of deforestation and a good quantitative and qualitative indicators to support the decision making process to consider future deforestation being caused by construction and / or paving of road in the Amazon.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO	16
INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
1.2 QUESTÕES DE PESQUISA	20
1.3 HIPÓTESE.....	20
1.4 OBJETIVOS	20
1.4.1 Objetivo Geral:.....	20
1.4.2 Objetivos Específicos.....	20
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2. CAPÍTULO	22
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 ESTUDOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS (EIA) E RELATÓRIOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS (RIMA) EM PROJETOS RODOVIÁRIOS.....	22
2.1.1 EIA/RIMA BR 319	23
2.1.2 EIA RIMA BR 163/230	24
2.1.3 RODOANEL.....	25
2.1.4 Limitações dos EIA RIMA	25
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL.....	25
2.3 A DINÂMICA ESPACIAL	28
2.4 MODELAGEM ESPAÇO TEMPORAL E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	28
2.5 TÉCNICAS PARA MODELAGEM DA MUDANÇA E USO SOLO	30
3. CAPÍTULO	37
ÁREA DE ESTUDO	37
3.1 A ÁREA DE ESTUDO	37
3.2 HISTÓRICO E COMPOSIÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA MICRO REGIÃO DE TUCURUÍ.....	39
4. CAPÍTULO	45
DESMATAMENTO: INDUÇÃO E MODELAGEM.....	45
4.1 O DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA.....	45
4.2 FATORES INDUTORES DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA	46
4.3 TÉCNICAS QUANTITATIVAS E MODELAGEM PARA PREVISÃO DE MUDANÇAS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	51

4.4	O USO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) NA MODELAGEM ESPAÇO TEMPORAL	52
5.	CAPÍTULO	54
	AUTOMATOS CELULARES (AC's)	54
5.1	HISTÓRICO DOS AUTÔMATOS CELULARES	54
5.2	CONCEITOS BÁSICOS DA TÉCNICA DE AC'S	55
5.3	DESCRIÇÃO DOS AC'S UTILIZADOS	56
5.4	APLICAÇÕES DE AC'S EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES	57
6.	CAPÍTULO	60
	METODOLOGIA	60
6.1	MATERIAIS	63
6.1.1	IMAGENS	63
6.1.2	APLICATIVOS COMPUTACIONAIS	65
6.2	MÉTODO	66
6.2.1	Manipulação dos dados em ambiente SIG:	67
6.2.1.1	Transformação de arquivos vetoriais em <i>raster</i>	68
6.2.1.2	Atribuição de valores numéricos às variáveis:	70
6.2.2	Modelagem usando AC's:	71
6.2.2.1	Criação de matrizes de transição	73
6.2.2.2	Cálculo da influência das variáveis	73
6.2.2.3	Estabelecimento dos pesos de evidência	74
6.2.2.4	Seleção das variáveis via teste de correlação	76
6.2.2.5	Calibração do modelo	77
6.2.2.6	Validação via método de decaimento exponencial	77
6.2.2.7	Geração das imagens com mudanças espaciais na área de estudo	80
7.	CAPÍTULO	82
	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE e DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	82
7.1	DESCRIÇÃO DAS MUDANÇAS NA ÁREA DE ESTUDO	82
7.1.1	Mudanças entre os anos de 2000 e 2001	82
7.1.2	Mudanças entre os anos de 2001 e 2002	84
7.1.3	Mudanças entre os anos de 2002 e 2003	86
7.1.4	Mudanças entre os anos de 2003 e 2004	89
7.1.5	Mudanças entre os anos de 2004 e 2005	90
7.1.6	Mudanças entre os anos de 2005 e 2006	92

7.1.7	Mudanças entre anos de 2006 e 2007.....	94
7.1.8	Mudanças entre os anos de 2007 e 2008.....	96
7.1.9	Mudanças entre os anos de 2008 e 2009.....	98
7.1.10	Mudanças entre os anos de 2000 e 2009.....	100
7.2	TESTE DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL VIA SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS	105
7.3	A MODELAGEM.....	106
7.4	DADOS DE ENTRADA PARA MODELAGEM.....	108
7.5	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	111
7.6	MODELAGEM PARA O ANO DE 2020.....	112
7.7	COMPARAÇÃO COM OUTROS MODELOS BASEADOS EM AC.....	114
8.	CAPÍTULO.....	117
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
8.1	CONCLUSÕES.....	118
8.2	SUGESTÕES.....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Técnicas de modelagem de mudança de uso do solo.....	31
Tabela 02: Modelos de mudança espacial	34
Tabela 03: Causas imediatas do desmatamento.....	47
Tabela 04: Causas indiretas do desmatamento na Amazônia.	48
Tabela 05: Outros fatores causadores do desmatamento.	49
Tabela 06: Tipos de variáveis biofísicas usadas na modelagem proposta.	60
Tabela 07: Descrição e caracterização das variáveis biofísicas estáticas usadas.....	67
Tabela 08: Atribuição de valores para as variáveis usadas na modelagem	71
Tabela 09: Taxas de mudanças espaciais entre 2000-2001.	83
Tabela 10: Influência das variáveis na ocorrência do desmatamento.....	83
Tabela 11: Influência das variáveis na ocorrência da recuperação da floresta.	84
Tabela 12: Taxas de mudanças espaciais entre 2001-2002.	85
Tabela 13: Influência das variáveis na ocorrência do desmatamento.....	85
Tabela 14: Influência das variáveis na ocorrência da recuperação da floresta.	86
Tabela 15: Taxas de mudanças espaciais entre 2002-2003.	87
Tabela 16: Comportamento das variáveis perante a ocorrência do desmatamento.	87
Tabela 17: Influência das variáveis na ocorrência da recuperação da floresta.	88
Tabela 18: Taxas de mudanças espaciais entre 2003 e 2004.	89
Tabela 19: Comportamento das variáveis no intervalo observado.	89
Tabela 20: Taxas de mudanças espaciais entre 2004 e 2005.	91
Tabela 21: Comportamento das variáveis no intervalo observado.	91
Tabela 22: Comportamento das variáveis no intervalo observado.	91
Tabela 23: Taxas de mudanças espaciais no período de 2005 a 2006.	93
Tabela 24: Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo de 2005 a 2006.	93
Tabela 25: Comportamento das variáveis no período 2005-2006.	93
Tabela 26: Taxas de mudanças espaciais no período de 2006 a 2007	95
Tabela 27: Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo 2006 a 2007.....	95
Tabela 28: Comportamento das variáveis no intervalo de 2006 a 2007.	95
Tabela 29 - Taxas de mudanças espaciais entre os anos de 2007 a 2008.	96

Tabela 30 - Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo de 2007 a 2008.	97
Tabela 31: Comportamento das variáveis no intervalo de 2007 a 2008.	97
Tabela 32: Taxas de mudanças espaciais no período de 2008 a 2009.	98
Tabela 33: Comportamento das variáveis sobre as mudanças espaciais no intervalo de 2008 a 2009.	99
Tabela 34: Comportamento das variáveis sobre as mudanças espaciais entre os anos de 2008 a 2009.	99
Tabela 35: Taxas de mudanças espaciais entre os anos de 2000 a 2009.	101
Tabela 36: Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo de 2000 a 2009.	101
Tabela 37: Comportamento das variáveis no intervalo de 2000 a 2009.	102
Tabela 38: Taxas líquidas de mudanças espaciais de 2000 a 2009.	102
Tabela 39: Descrição das mudanças espaciais ocorridas entre 2000 a 2009.	103
Tabela 40: Parâmetros obtidos para os algoritmos <i>expander</i> e <i>patcher</i>	108
Tabela 41: Resultado do processo de validação.	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Modelos de mudanças espaciais.	32
Figura 02: Visão geral da área de estudo.	38
Figura 03: Delimitação da área de estudo.	39
Figura 04: Micro região do lago da usina hidrelétrica de Tucuruí.	40
Figura 05: Diversos padrões espaciais seguidos pelo desmatamento.	42
Figura 06: Pedologia da área de estudo.	42
Figura 07: Vegetação da área de estudo.	43
Figura 08: Hidrografia da área de estudo.	44
Figura 09: Áreas desmatadas e macro regiões na Amazônia.	46
Figura 10: Hierarquização das variáveis responsáveis pelo desmatamento.	50
Figura 11: Abstração de um modelo de mudanças espaciais.	53
Figura 12: Representação de grade regular de células.	53
Figura 13: Esquema de dimensões de um AC.	57
Figura 14: Diferenças entre arquivos vetoriais e raster.	61
Figura 15: Fluxo da modelagem no software DINAMICA EGO.	66

Figura 16: Fluxograma das atividades desenvolvidas.	68
Figura 17: Processo de conversão	70
Figura 18: Fluxograma das atividades desenvolvidas na etapa de modelagem.	72
Figura 19: Mapas de transição.	75
Figura 20: Método de resoluções múltiplas.	78
Figura 21: Mudanças espaciais entre 2000 a 2001.	82
Figura 22: Mudanças espaciais entre 2001 a 2002.	85
Figura 23: Evolução do desmatamento entre 2002 a 2003.	87
Figura 24: Evolução das mudanças espaciais entre 2003 a 2004.	89
Figura 25: Evolução do desmatamento entre 2004 e 2005.	90
Figura 26: Evolução do desmatamento entre 2005 a 2006.	92
Figura 27: Evolução do desmatamento entre 2006 a 2007.	94
Figura 28: Evolução do desmatamento entre 2007 a 2008.	96
Figura 29: Evolução do desmatamento entre 2008 a 2009.	98
Figura 30: Evolução do desmatamento entre os anos de 2000 a 2009.	101
Figura 31: Evolução mudanças espaciais reais entre 2000 e 2009.	105
Figura 32: Produção de mapas de probabilidades de transição.	106
Figura 33: Probabilidade de desmatamento.	107
Figura 34: Probabilidade de recuperação da floresta.	107
Figura 35: Desmatamento efetivamente ocorrido no em 2009.	109
Figura 36: Desmatamento previsto para o ano de 2009 (Dados referente a 2000 - 2009)	110
Figura 37: Mudanças previstas para 2009 (Dados referentes a 2001 a 2009)	110
Figura 38: Mudanças estimadas para 2020.	112
Figura 39: Desmatamento realizado (00-09) e efetivado (2020).....	113
Figura 40 : Quantidade de floresta (00-09) e floresta prevista (2020)	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	57
Equação 2.....	74
Equação 3.....	74
Equação 4.....	76
Equação 5.....	79

LISTA DE SIGLAS NOMENCLATURAS

AC – Autômatos Celulares

AM - Amazonas

BR – Brasil

C – Celsius (unidade de medida de temperatura)

cm- Centímetro

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

CONAMA- Conselho Nacional de Meio Ambiente

DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S.A. de São Paulo

DNIT – Departamento Nacional de Infra Estrutura Terrestre

EIA- Estudo de Impactos Ambientais

FESPSP – Faculdade do Estado de São Paulo

GIS – *Geographic Information system* (Sistema de Informações Geográficas)

Ha – Hectares

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

km- Quilometro

m- Metro

mm - milímetro

MPU - Ministério Público da União

PA- Pará

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

REM – Radiação Eletro Magnética

RESEX – Reserva Extrativista

RIMA- Relatório de Impactos Ambientais

RNA – Rede Neural Artificial

SEPOF – Secretaria de Estado de planejamento, Orçamento e Finanças do Estado do Pará

SETRAN – Secretaria de Transportes do Pará

SIG – Sistema de Informações Geográficas

TDR – Termo de Referência

UC – Unidade de Conservação

UHE – Usina Hidrelétrica

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

UFC- Universidade Federal do Ceará

1. CAPÍTULO

INTRODUÇÃO

No Brasil o processo de construção das primeiras rodovias sempre considerou somente os aspectos geométricos, de relevo e geotécnicos, visando sempre um mínimo custo aliado a um maior retorno econômico possível, havendo pouca ou nenhuma análise das opiniões de comunidades lindeiras e estudos sobre alterações ao meio ambiente (LOBER e WILSON, 1988). A ausência de planejamento na construção das rodovias resulta, segundo AMOR e CHRISTENSEN (2008), em estradas que se tornaram os mais robustos agentes catalisadores do desmatamento de florestas tropicais. Dessa forma, torna-se imprescindível a estimativa do desmatamento em torno de uma rodovia, a fim de ser usada como ferramenta de apoio à decisão por parte dos planejadores de transportes.

Nos anos 1970, a comunidade técnica Estadunidense preocupou se com as interferências socioambientais causadas por rodovias, prevendo como consequências negativas da mesma, aspectos como o ruído, aumento na especulação financeira e desmatamentos (LISBOA, 2002). MALAFAIA, (2004) afirma que no Brasil os impactos ambientais de uma rodovia são identificados no meio socioeconômico (conflito de uso e ocupação do solo entre outros), no meio biótico (impedimento dos processos de intercâmbio ecológicos por corte de áreas, redução da cobertura vegetal) e no meio físico (retirada de solos, indução a processos erosivos, instabilidade de taludes, entre outros). Tais impactos podem ser facilmente observados por todo país e na Amazônia não poderia ser diferente.

A região norte do Brasil foi desbravada por colonizadores europeus por meio dos seus rios, onde conforme os colonizadores adentravam o continente surgia a necessidade de escoar a pequena produção florestal através de abertura de vias, e com isso, surgiram várias trilhas que futuramente tornar-se-iam estradas (DAMIÃO, 2007). Tal processo de colonização ocorreu lentamente até que, despertados pela importância da região no cenário político internacional o governo militar resolveu iniciar uma ocupação mais ofensiva da floresta nos anos 1950, disponibilizando grandes glebas de

áreas para que ocorresse a ocupação humana nas áreas mais remotas do bioma e realizando a abertura das primeiras estradas transamazônicas (THÉRY, 2002).

A abertura de diversas rodovias resultou em uma migração e ocupação em massa nas suas adjacências, fenômeno esse observado com maior intensidade nas maiores rodovias em extensão, as BR 163, BR 230 e BR 319. As áreas foram ocupadas seguindo as diretrizes governamentais, que determinavam a supressão da vegetação primária para dar lugar a áreas de produção agropecuária e agrovilas (LAURANCE *et al.*, 2001).

Entre 1950 e 1960 a população daquela região passou de 1 para 5 milhões de habitantes (BECKER, 2001). A partir dos anos 1970 o plano de ocupação foi paulatinamente deixado de lado pelo governo militar e os colonos, antes incentivados a ocuparem a área, ficaram esquecidos sem qualquer assistência governamental. Os grandes polos populacionais, conhecidos com agrovilas, em parte foram abandonados, e aqueles que possuíam um mínimo de infraestrutura transformaram-se em cidades e moldaram a atual conjuntura amazônica, em especial o Estado do Pará (ALVES, 2002).

Ainda segundo ALVES (2002), o acelerado processo de ocupação do território das últimas décadas do século passado resultou num aumento da área desflorestada na Amazônia Legal brasileira de 10 milhões de Ha em 1970 para aproximadamente 59 milhões de Ha em 2000, subtraindo uma porção de 14% da floresta original. Tal fato pode ser observado na ocupação da região, uma vez que se caracteriza por um padrão linear, ao longo dos eixos de circulação fluvial e rodoviária, separadas por grandes massas florestais com população concentrada ao redor de grandes rodovias (BECKER, 2001).

As rodovias, independente do seu estado de conservação, servem como catalisadoras do desmatamento uma vez que facilitam o acesso e o escoamento do estoque madeireiro, tornando viável a supressão florestal. (PALAZZI *et al.*, 2009). Isso ocorre com o surgimento de diversas vias de acesso (vicinais) ao largo das rodovias, deixando áreas ocupadas pelas rodovias, quando vistas por imagens de satélite, com um aspecto de “espinha de peixe” (PERZ *et al.*, 2005). O processo de desmatamento começa com a abertura oficial ou clandestina de estradas, onde a migração de pessoas e a ocupação irregular de terras resultam na exploração predatória de madeiras de alto valor comercial. Posteriormente, converte-se a floresta explorada em agricultura

familiar e pastagens para a criação extensiva de gado, fator esse responsável por cerca de 80% das áreas desmatadas na Amazônia legal (FERREIRA *et al.*, 2005).

Além dos impactos resultantes como agente catalisador de desflorestamento, as rodovias sem a adequada pavimentação ou até mesmo sem pavimento geram impactos ambientais negativos ao exigirem que os veículos tenham maior consumo de combustível e conseqüentemente emitam maiores quantidades de poluentes (Confederação Nacional dos Transportes, 2009).

Ainda segundo a CNT (2009), 97,8% das rodovias do Pará são classificadas como péssimas, ruins, ou regulares. O estado possui várias rodovias que sequer constam em cartas oficiais, e, conforme a Secretaria de Transportes Estadual do Pará (2009), as rodovias pavimentadas ou parcialmente pavimentadas são: BR 153, BR 158, BR163, BR 222, PA 124, PA 127, PA 136, PA 140, PA 150, PA 151, PA 154, PA 238, PA 242, PA 252, PA 253, PA 254, PA 255/423, PA 257, PA 263, PA 275, PA 279, PA 318, PA 370, PA 391, PA403/409, PA 415, PA 427, PA 457, PA 481.

Observa-se que na lista elaborada pela SETRAN, não consta a rodovia BR 422, área de estudo desta investigação, importante ligação do município de Tucuruí até o município de Limoeiro do Ajuru, atravessando o município de Baião e Cametá, além de cortar no sentido norte/sul duas áreas protegidas: a terra Indígena *Trocará* e a unidade de conservação Reserva Extrativista Ipaú-Anilzinho. Um dos diversos problemas relacionados ao fato da rodovia atravessar duas áreas Federais protegidas é a possibilidade de ela agir como um agente catalisador do desmatamento, uma vez que facilita o acesso aos recursos florestais.

Adicionalmente, observa-se que historicamente, o processo de construção de rodovias foi desordenado (CAMBOIN, 2008), onde o subjetivismo e a ausência de metodologias para tomada de decisão e análise dos impactos ambientais favoreceram toda sorte de atividade ilegal: desmatamento, grilagem de terras, biopirataria entre outras. Um planejamento conciso que atenda as solicitações legais deve tornar-se rotineiro para que se gerem cada vez menos impactos socioambientais.

Por questões metodológicas, a análise de um determinado evento é mais rica quando realizada *in loco* (BRIASOULLIS, 2000). Porém tal fato é praticamente

impossível quando se leva em consideração as dificuldades espaciais e temporais impostas pela Amazônia ao pesquisador. O uso de imagens de satélite para uma análise espaço temporal do desmatamento é de grande valia, haja vista a facilidade de observação da distribuição espacial das áreas desmatadas no espaço e no tempo (DAMIÃO, 2007).

DAMIÃO (2007) afirma ainda que o desmatamento em uma região segue um padrão espacial e a sua ocorrência é influenciada pela distância às áreas anteriormente desmatadas, sendo que quando presente em unidades de conservação ou terrenos acidentados o desmatamento tende a reduzir sua incidência. A obtenção de variáveis explicativas sobre as mudanças espaciais é um processo árduo, e por vezes, sem sucesso em função da carência de dados censitários para a região Norte do Brasil. Dessa forma, este trabalho assumirá as seguintes premissas:

- As rodovias atuam como principal agente causador do desmatamento na Amazônia (ALVES, 1999);
- Na maioria dos casos o desmatamento ocorre até 5 km ao redor de rodovias na Amazônia (SOARES FILHO *et al.*, 2004);
- É necessária a elaboração de EIA RIMA para o processo de construção / pavimentação de rodovias na Amazônia, Resolução CONAMA (01/86);
- Os modelos de previsão temporal, exigidos para os EIA RIMA, possuem falhas metodológicas (BRASIL, 2004);
- É notória a dificuldade de obtenção de variáveis desagregadas para esses estudos de caso na região Amazônica.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

De acordo com ALVES (1999) cerca de 70% do desflorestamento identificado na Amazônia concentra-se ao largo das rodovias pavimentadas. Embora já existam alguns métodos que prevejam a dinâmica do desmatamento no espaço e tempo, os Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e os Relatórios de Impactos Ambientais (RIMA), elaborados atualmente para o processo de abertura de rodovias, principalmente

na Amazônia, não atendem completamente ao CONAMA 01/86 quanto à construção de modelos de previsão dos impactos com cenários “com” e “sem” a presença do empreendimento (BRASIL, 2004).

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

Para ajudar na condução desta investigação, elencaram-se as seguintes questões:

- a) É possível prever as mudanças espaciais cujo fator de indução tenha sido a construção ou a pavimentação de uma rodovia?
- b) Quais variáveis podem ser usadas para explicar o desmatamento futuro em função da construção e/ou pavimentação de rodovias?
- c) Como a previsão de mudanças espaciais pode servir de indicador de impacto ambiental em um EIA/RIMA?

1.3 HIPÓTESE

Parte-se do princípio que é possível modelar as mudanças espaciais (do tipo desmatamento - floresta, floresta - desmatamento) ao redor de rodovias, produzindo resultados com índice de acerto superior a 50% usando somente variáveis biofísicas como explicativas para o fenômeno estudado.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral:

Desenvolver um método para geração de estimativas de mudanças espaciais ao redor de rodovias na Amazônia que utilize, como variáveis explicativas, somente atributos do terreno, e que venha a servir como suporte à tomada de decisões quanto a avaliação dos prós e contras da construção/pavimentação de rodovias.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Conceber um modelo que possa estimar as mudanças espaciais ao redor de uma rodovia;

2. Apresentar a estatística descritiva (média, variância) através da análise exploratória das mudanças espaciais na área de estudo;
3. Calibrar o modelo, unindo os dados de média e variância a um índice de isometria que produza acerto superior a 50%. Isso ocorrerá heurísticamente, isto é, serão testados todos os valores disponíveis no intervalo de 0 à 2 (descrito de forma detalhada no CAPÍTULO 5);
4. Produzir uma imagem com as mudanças espaço temporais para um intervalo futuro de 11 anos, iniciando em 2009 até 2020.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação estrutura-se em sete capítulos descritos a seguir:

O **capítulo 1** traz a introdução e motivação do trabalho juntamente com o problema de pesquisa e questões de pesquisa, a hipótese e os objetivos gerais e específicos.

No **capítulo 2** discorre-se acerca da fundamentação teórica para toda a dissertação, porém sem esgotar os assuntos tratados neste documento.

O **capítulo 3** contempla os estudos relacionados à análise das causas e consequências, agentes indutores, variáveis e modelos de previsão relacionados ao desmatamento como resultado da implantação de rodovias na Amazônia.

O **capítulo 4** apresenta toda a revisão bibliográfica sobre o funcionamento dos Autômatos celulares voltado aos estudos de mudanças espaciais.

O **capítulo 5** descreve a metodologia, materiais, seleção de variáveis, *softwares* utilizados, fluxo com as atividades realizadas e conceitos adicionais necessários para o entendimento do método adotado neste trabalho.

O **capítulo 6** apresenta a área de estudo, os resultados obtidos no processo de modelagem e traz uma análise desses resultados.

Por ultimo, o **capítulo 7** traz as conclusões da investigação e sugestões para futuros trabalhos.

2. CAPÍTULO

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz os conceitos teóricos usados, referenciando os trabalhos realizados acerca dos relatórios/estudos de impactos ambientais aplicados em transportes, a técnica de sensoriamento remoto, as técnicas de modelagem de mudanças espaciais aplicadas a sistemas de informação geográfica com estudo de caso voltado à construção de rodovias na Amazônia.

O que se busca neste trabalho é a geração de estimativas acerca de como, onde e quando ocorrerão mudanças espaciais no entorno de uma rodovia através de uma modelagem que produza resultados localizados no espaço e tempo. Para isso, realiza-se uma descrição do estado da arte dos estudos de impactos ambientais no Brasil, bem como das ferramentas mais utilizadas na estimativa da ocorrência desses fenômenos, as técnicas de modelagem espaço temporal em transportes e de mudanças no uso e ocupação do solo com ênfase na Amazônia.

2.1 ESTUDOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS (EIA) E RELATÓRIOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS (RIMA) EM PROJETOS RODOVIÁRIOS

A tomada de decisão referente à minimização de impactos ambientais é um processo complexo, onde são realizadas análises subjetivas de diversas variáveis espaciais e temporais, fato esse consagrado em EIA RIMAS (LISBOA *et al.*, 2002).

Segundo MARTTUNEN *et al.*, (1995), os dados relativos aos impactos ambientais apresentados nos EIA RIMAs são bastante úteis para o processo de tomada de decisão quando neles forem refletidas as diferentes perspectivas dos diversos agentes da sociedade, direta ou indiretamente envolvidos. Portanto, um dos fatores mais importantes para a realização do planejamento ambiental é analisar, em tempos futuros, a capacidade de resposta perante os possíveis impactos ambientais resultantes de um dado empreendimento.

Segundo BRASIL (2004), um erro muito comum em estudos de impactos ambientais é a disposição de uma informação solicitada no termo de referência (TDR) de forma superficial. Obras viárias costumam seguir esse padrão na medida em que o licenciamento ocorre por trechos, não permitindo que sejam previstos e caracterizados os impactos de médio e longo prazo da via como um todo, quer seja como indutora de uma série de atividades econômicas em escala regional quer seja como meio de penetração humana em áreas antes protegidas pelo isolamento em relação aos centros urbanos.

O Art. 6º da resolução CONAMA 01/1986 diz que: “*O estudo de impacto ambiental desenvolverá, no mínimo, as seguintes atividades técnicas*”: [...] “*II – Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes*”. Isso torna explícita a necessidade dos órgãos ambientais, da elaboração de termos de referência onde se solicite a realização de uma prospecção de como uma determinada região se comportará com e sem a presença de um determinado empreendimento.

2.1.1 EIA/RIMA da BR 319

No presente estudo é oportuna uma análise sobre o conteúdo dos EIA RIMAs referentes aos principais projetos de construção e ampliação de rodovias no Brasil. Um dos exemplos que mais se aproxima da rodovia objeto de estudo é o projeto de construção e pavimentação da BR 319, que liga Manaus-Am a Porto Velho-Ro, que juntamente às rodovias BR 163-Cuiabá-Santarém e a BR 230 –Transamazônica são os principais eixos indutores de desmatamento na Amazônia (BECKER, 2001).

No EIA RIMA da BR 319 (BRASIL, 2009) a elaboração do Prognóstico Ambiental considerou as condições ambientais e sociais emergentes, com e sem a implantação do projeto, conduzindo à proposição de medidas destinadas ao equacionamento dos potenciais impactos. Além disso, foram analisados os potenciais impactos da rodovia, sobre o meio ambiente em suas diferentes fases de implantação e operação.

Os principais itens considerados na análise de cada cenário foram: Modal abordado; Controle ambiental; Situação social; Articulação do mercado; Papel do Estado; Expansão das Unidades de Conservação; Recursos naturais e Situação indígena. O estudo usa o ferramental Autômatos Celulares (AC), aliado a um processo de construção de cenários, e para tanto foram criaram-se quatro possíveis cenários: reconstrução de uma rodovia sem governança, reconstrução de uma rodovia com baixa governança; reconstrução de uma rodovia com forte governança; e o cenário mesmo de sempre (BRASIL, 2009).

Todo o EIA RIMA da BR-319 baseou-se nos resultados de SOARES FILHO *et al.*, (2003), que estimam, por micro bacias amazônicas, via programa DINAMICA EGO, o comportamento do desmatamento como resultado da pavimentação de rodovias, tendo como produto os cenários anteriormente descritos. A metodologia de cenários usa como técnica os Autômatos Celulares, SOARES FILHO *et al.*, (2001), que prevê a possibilidade de desmatamento baseado na análise da influência da vizinhança mais próxima na transição e na dinâmica do comportamento de uma determinada célula.

O estudo em questão analisou o comportamento do desmatamento por micro bacias, onde as variáveis espaciais e variáveis socioeconômicas foram usadas como dados de entrada. Devido ao fato de tais variáveis possuírem um elevado nível de agregação, o produto deste o EIA RIMA considerou os resultados numa escala de micro bacia, deixando a desejar em um detalhamento maior das mudanças espaciais. Isso pode conduzir a erros quando da tomada de decisão, devido à generalização do comportamento das mudanças espaciais.

2.1.2 EIA RIMA da BR 163/230

Para o EIA RIMA da BR 163 e a BR 230 existe uma grande dificuldade de acesso aos dados desses estudos, haja vista que esses documentos ainda não foram tornados públicos. Devido a pouca disponibilidade de estudos sobre impactos ambientais de rodovias na Amazônia, buscou-se em outros grandes empreendimentos recentes, ainda que estes não se localizem na Amazônia. Assim, decidiu-se realizar uma análise do EIA RIMA do RODOANEL, construído no Estado de São Paulo.

2.1.3 RODOANEL

Nos procedimentos adotados pela empresa de Desenvolvimento Rodoviário S.A. de São Paulo (DERSA) na revisão dos estudos de engenharia rodoviária do Rodoanel, a equipe responsável pelos estudos ambientais trabalhou em articulação permanente com as empresas de engenharia rodoviária contratadas utilizando como método para a previsão dos impactos ambientais uma metodologia multicritério de apoio à decisão (FESPSP, 2009). Ainda sobre o rodoanel Mário Covas trecho norte, LISBOA *et al.*, (2002) utilizaram a metodologia multicritério de apoio à decisão denominada *Analytic Hierarchy Process – AHP* no estudo de alternativas de traçados com melhores indicadores do ponto de vista socioeconômico e ambiental.

2.1.4 Limitações dos EIA RIMA

Os EIA RIMA das rodovias analisadas possuem nos seus estudos de impactos ambientais as falhas mais comuns nos EIA RIMAs analisados pelo estudo técnico do Ministério público da União (MPU), como o uso de dados secundários e ausência da metodologia para previsão de cenários, respectivamente. A alegação mais comum nesses casos por parte dos elaboradores é a falta de tempo ou até mesmo a dificuldade logística para a coleta de dados *in loco*. Tendo em vista tal fato, e juntamente com a previsão de grandes investimentos na Amazônia, deve-se estimular o uso de ferramentas que ao mesmo tempo possuam boas respostas para a prospecção de eventos, mesmo em situações de escassez de dados, e que sejam de fácil manipulação e acesso. Uma dessas ferramentas de modelagem é denominada Autômatos Celulares, que usa imagens de satélite como dados de análise.

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

A definição usual para sensoriamento remoto (SR) é dada como um conjunto de técnicas e ferramentas utilizadas para a obtenção de informações sobre objetos sem a necessidade do contato físico. Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (NOVO, 1989).

Ao adentrar na superfície terrestre a radiação eletromagnética (REM) incide nos corpos (sólidos, líquidos e gasosos) chamados de alvos, onde neles a energia sofre três tipos de situações: parte é absorvida, parte é transmitida e parte é devolvida a espaço. Tal característica está intrinsecamente ligada às propriedades do corpo em interação com a REM, pois fatores como massa, cor, morfologia entre outros são responsáveis pelo tipo de resposta espectral dada por cada alvo (FLORENZANO, 2002).

Os sensores mais utilizados são os chamados sensores passivos, definidos como aqueles que não emitem radiação eletromagnética, e os registros são obtidos a partir da identificação da reflectância dos diferentes alvos quando interagem com a REM (CARVALHO, 2005).

O produto disponibilizado pelo sensoriamento remoto orbital basicamente é uma cena, uma imagem do tipo malha ou *grid's* de cada unidade (*pixel*) têm sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo "linha e coluna", representados por "x" e "y", respectivamente. Pode-se definir *pixel* – advindo da abreviação de *Picture element*, como menor unidade de composição de uma imagem, e possui as seguintes características:

- Quanto à geometria: são isométricos, isto é, quando aglomerados em um *grid* possuem as mesmas dimensões;
- Quanto à aparência: O estado de um pixel depende de um atributo denominado número digital, do inglês *digital number* (DN), que indica o nível de cinza de uma célula. O DN é diretamente proporcional à média da intensidade da energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície “imageada”.

A qualidade final do produto sofre influência de diferentes tipos de resolução, como resolução espacial resolução temporal resolução espectral, onde a resolução espacial refere-se à área de visão de um *pixel* da imagem. Como exemplo, um *pixel* que possua resolução de 1 metro distingue objetos com igual ou maior geometria de 1 metro, enquanto uma resolução de 10 metros por *pixel* permite a visualização de objetos com geometria a partir de 10 metros (BRYN, 2008).

A **resolução temporal** é a propriedade de um sensor em revisitar uma determinada área. A resolução espectral é o intervalo do espectro, uma medida da largura das faixas espectrais e da sensibilidade do sistema sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal de retorno (NOVO, 1989).

A **resolução radiométrica** detecta as variações da radiância espectral recebidas, que indica o nível de cinza do *pixel* - número digital (Z) (do inglês *digital number*), valor este variando de 0 (preto) até K-1 (branco) onde K é o número de valores possíveis, denominados de níveis de quantização (NOVO, 1989). O seu valor é sempre em potência de 2, por exemplo 8 bits significam $2^8=256$ níveis de cinza. As diferenças são maiores nos níveis 2 e 4 do que nos níveis 256 e 2048, devido ao fato do olho humano não possuir sensibilidade às mudanças de intensidade acima de 30 níveis de cinza (CROSTA, 1993).

Dentre os satélites mais usuais para geração monitoramento das mudanças espaciais na Amazônia, o INPE adotou os da série *Land Sat* com os sensores TM (*Thematic Mapper*) e ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) para a produção dos resultados da taxa anual de desmatamento na Amazônia legal.

As imagens geradas pelo satélite *LAND SAT 05* são utilizadas com dados de entrada no programa de cálculo do desflorestamento da Amazônia (PRODES) desenvolvido pelo INPE e possui as características de resolução espacial de 3 metros nas bandas visível, infravermelho próximo e médio, e 120 metros na banda do infravermelho termal (CAMARA *et al*, 2006).

São vários os usos dos produtos gerados por sensoriamento remoto, tendo sua aplicação em áreas que vão do estudo da composição geomorfológica do solo até a análise espacial da ocorrência de furtos em uma cidade (CAMARA *et al*, 2006). Uma das áreas de uso de imagens de satélite é a modelagem de mudanças espaciais em sistemas de informação geográfica (SIG).

Os SIGs comumente são utilizados para analisar eventos de forma linear, isto é, uma visão de um mundo estático e bilinear. Com a introdução de técnicas de modelagem espacial em SIGs torna-se viável produzir análises espaciais, nas quais podem ser representados os processos dinâmicos de mudanças no espaço e tempo.

2.3 A DINÂMICA ESPACIAL

Segundo BENEDETTI (2010) a análise da dinâmica da paisagem e de seus processos de transição exige o uso de diversos recursos cartográficos, tais como mapeamentos, fotografias aéreas, imagens de satélite e demais levantamentos que caracterizem o uso/ocupação e a cobertura do solo no intervalo de tempo proposto. Ao se considerar uma série temporal distinta, definida por duas imagens, t_1 (inicial) e t_2 (final) tomadas de uma mesma paisagem, pode-se observar por meio de tais recursos o estado de cada elemento (classe de uso/cobertura) de interesse.

A avaliação das mudanças no uso e ocupação do solo enseja observações através de sistemas de monitoramento que possibilitem a identificação de taxas e padrões. Dentre as chamadas geotecnologias, uma das mais usadas para avaliação de mudanças na paisagem é o sensoriamento remoto, que possibilita a obtenção de imagens para diferentes fins com diferentes níveis de resolução espacial e temporal, o que são características desejáveis quando se analisa estes fenômenos.

2.4 MODELAGEM ESPAÇO TEMPORAL E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Ao construí-lo, dependendo do objetivo, pode-se enfatizar um ou outro desses elementos. Dessa forma os modelos podem ser classificados em empíricos e de sistemas (LAMBIN, 1994).

Partindo do pressuposto que existem técnicas de modelagem e previsão capazes de representar a realidade, e que estas aglutinam informações baseadas no conhecimento que se tem de fatos e indicadores passados, pretende-se usar tais ferramentas na tentativa de construir um modelo espaço-temporal que embase os tomadores de decisão sobre a influência da implantação de uma rodovia na Amazônia.

A maior dificuldade encontrada em modelagem é justamente o fato de que os modelos, como meras representações do mundo real, apenas resumem as infinitas variáveis envolvidas numa simulação e somente produzem aproximações com a realidade (BRIASSOULLIS, 2000).

Algumas medidas são eficazes para diminuir o problema da aproximação da realidade (redução), como os testes estatísticos de análise exploratória de variáveis. GARCIA *et al.*, (2007) realizaram uma seleção de variáveis via modelos lineares clássicos e espaciais que estabelecessem relações funcionais entre essas variáveis e o desmatamento amazônico entre 1997 e 2001, com base na exploração estatística de variáveis que direta ou indiretamente estejam envolvidas no processo de desmatamento amazônico.

AGUIAR, (2003) afirma que em se tratando de técnicas de modelagem, os métodos de regressão linear estabelecem uma associação de significância estatística entre variáveis, mas não uma relação causal, isto é, um modelo baseado em regressão é uma técnica útil para explorar a existência de possíveis ligações entre variáveis.

Várias são as dificuldades encontradas durante as etapas de modelagem de eventos. Uma das mais comuns consiste na obtenção de variáveis que possam ser usadas como entrada em modelos para antever, no espaço e no tempo, o comportamento do objeto de estudo.

A construção/aplicação de modelos para a previsão de impactos esbarra na pouca ou nenhuma disponibilidade de dados. Tratando-se da Amazônia Brasileira as séries históricas com metodologia de obtenção consagrada e desagregada por município existem somente a partir de 2000. Portanto deve-se estimular o acesso a modelos de previsão de impactos ambientais que produzam resultados mais próximos da realidade com índices de acerto a partir de 75%, haja vista o caráter falível das predições ambientais (SOARES FILHO *et al.*, 2003).

Uma dificuldade comumente observada na análise de variáveis é relacionada a sequência temporal dos dados, função da ausência de séries históricas concisas ou procedimentos de coleta de amostras que infligem premissas estatísticas, tornando a análise das variáveis impróprias. Desta forma devem-se selecionar séries históricas de maior confiabilidade possível (BARRETO, 1998).

Uma questão que não pode ser ignorada é o fato de as séries históricas de dados estatísticos na região amazônica são falhas por diversos motivos. Um dos casos a citar é o cálculo do monitoramento do desmatamento anual, que somente a partir de 2000

tornou-se disponível anualmente e de forma desagregada por município, uma vez que as taxas anuais de desmatamento, anteriores a 2000, estavam disponíveis apenas por Estado (CÂMARA *et al.*, 2006).

LI e YEH (2002), PIJANOWSKI *et al.*, (2002), DAMIÃO (2007), ALMEIDA *et al.*, (2005) em seus trabalhos, selecionaram e usaram para a modelagem de eventos, variáveis biofísicas (atributos do terreno) que melhor representam o fenômeno de mudanças espaciais.

LI e YHE (2002), além de ALMEIDA *et al.*, (2005) usaram a técnica dos Autômatos Celulares juntamente com as RNAs para prever a dinâmica de mudanças do solo numa região urbana, enquanto PIJANOWSKI *et al.*, (2002) previram, usando redes neurais, a probabilidade de mudanças no uso do solo em micro regiões nas adjacências da bacia hidrográfica da baía de Michigan nos Estados Unidos. Já DAMIÃO (2007) usou a técnica de regressão logística para prever o desmatamento na região Sul do Estado do Pará, mais especificamente no município de São Félix do Xingu.

Uma das etapas fundamentais na construção de rodovias, principalmente em florestas tropicais, é simular, através de modelos de mudança espacial as consequências causadas por esses projetos de infraestrutura, visando criar subsídios aos tomadores de decisão quanto à avaliação dos reais impactos resultantes do estabelecimento de empreendimentos na região (AMOR e CHRISTENSEN 2008).

2.5 TÉCNICAS PARA MODELAGEM DA MUDANÇA E USO SOLO

Os tipos de modelos mais usuais para avaliação de mudança de uso do solo estão subdivididos em modelos de sistema e modelos empíricos. Os primeiros possuem a característica de serem descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, e os modelos empíricos são baseados nos relacionamentos entre as variáveis do modelo, a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro. Na Figura 01 observa-se um fluxograma onde estão dispostos os tipos de modelos de mudança espacial (CAMARA *et al.*, 2002) e na Tabela 01 apresenta-se resumidamente as principais técnicas utilizadas para modelar mudanças de uso do solo.

Tabela 01: Técnicas de modelagem de mudança de uso do solo.

Modelo	Por que	Quando	Aplicações
Cadeias de Markov	Não pode explicar a razão de um fenômeno por ser processo estocástico e não suportar a inclusão de variáveis exógenas	Pode prever a evolução de processos estacionários	Pode prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com GIS
Logístico de Difusão	Permite a inclusão de poucas variáveis exógenas, entretanto é um modelo descritivo, não suportando investigações exploratórias	Suporta a dimensão temporal podendo prever a evolução de processos não estacionários	Pode prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com GIS
Regressão	Contribui para identificar forças direcionadoras, entretanto são modelos descritivos, não sendo capaz de estabelecer relações causais entre as variáveis	Pode prever a evolução de processos estacionários	Não são modelos espaciais, entretanto podem ser combinados com GIS
Simulação de Ecossistemas	Modelo exploratório que requer descrições funcionais dos sistemas ecológicos	Pode formular cenários de mudanças futuras no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo	Apresenta dificuldades na representação espacial
Simulação	Requer modelos	Pode	Pode prever

Espacial Dinâmica	funcionais espacialmente definidos	predizer mudanças temporais no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo	evolução de padrões espaciais em processos determinísticos
GEO ESTATISTICA	Utiliza os princípios da Krigagem linear	Modela os valores de um atributo, dentro de uma região da superfície terrestre como uma função aleatória	Pode prever um evento de duas formas: a) Com o conhecimento da distribuição estatística (paramétrico) ou não (não paramétrico)

Fonte: CAMARA *et al.*,(2002)

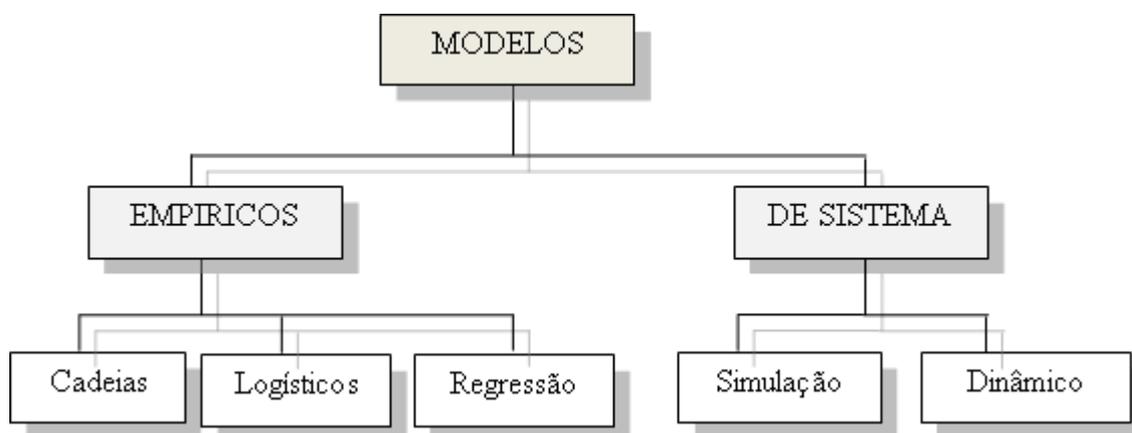


Figura 01: Modelos de mudanças espaciais.

Fonte: CAMARA *et al.*,(2002)

Os modelos de uso e ocupação do solo analisam complexas variáveis biofísicas e socioeconômicas sobre o espaço e tempo, e lidar com tal situação sem de alguma forma

simplificar o processo é quase impossível, resultando geralmente numa representação grosseira da realidade (DAMIÃO, 2007). Ainda segundo o autor, os principais usos desses modelos são:

- Suporte à decisão em contextos de políticas ambientais;
- Descrição das relações espaciais e temporais entre os indutores e os padrões resultantes de usos do solo e de suas mudanças;
- Predição de futuras configurações de padrões de uso do solo sob vários cenários de mudança biofísica e socioeconômica;
- Avaliação de impactos de atividades nas esferas ambientais e socioeconômicas.

Os modelos existentes de predição espacial usados na modelagem de diversos eventos possuem alguma ligação quanto a sua base teórica. E para todos, torna-se necessário um claro entendimento na hierarquização dos agentes responsáveis diretamente e indiretamente pela ocorrência de um fenômeno. (LI e YEH, 2002). Os modelos de predição espacial podem ser classificados de acordo com o conhecimento de caso e a forma de análise estatística buscada pelo analista. As formas mais usuais são classificadas em:

- **Modelos mecanicistas** (determinísticos): Possuem parâmetros arbitrários e são baseados no conhecimento acumulado sobre o objeto estudo de caso. Não seguem premissas rígidas sobre o comportamento das variáveis usadas na modelagem, por exemplo, polígonos de *Thiessen*; Interpolação inversa da distância; Regressão em coordenadas; modelos baseados em vizinhança próxima; *Splines*;
- **Estatística linear**: Para esse segmento da modelagem estatística os parâmetros usados na predição de eventos devem satisfazer as premissas estatísticas. As predições seguem a teoria da probabilidade e seus resultados são acompanhados com uma estimativa do erro. Como exemplo, observam-se os modelos de Krigagem (geoestatística), Correlação espacial (baseados em modelos de regressão), Modelos

baseados na estatística Bayesiana e modelos híbridos (Krigagem - regressão);

- **Sistemas baseados na expertise do autor:** Esses modelos podem ser completamente subjetivos ou baseados na análise de dados. Para o primeiro caso a única ferramenta é o conhecimento empírico do autor, tomadas de decisões, baseadas em critérios subjetivos, podem ser de valia para a sociedade. Já os modelos baseados na análise de dados seguem a teoria da probabilidade estatística, sendo os modelos Bayesianos mais usados. Embora ocorra claramente uma segregação dos modelos, comumente há uma interseção entre as teorias, o que é muito utilizado pelos tomadores de decisão.

DAMIÃO (2007) afirma que a concepção de modelos está associada a propósitos específicos dos mesmos e ao resultado esperado para a modelagem. BRIASSOULIS (2000) estabeleceu cinco métodos de modelagem descritos na Tabela 2, a saber: a) modelos estatísticos e econométricos; b) modelos de interação espacial; c) modelos de otimização; d) modelos integrados; e) modelos gerados a partir de abordagem recente.

Tabela 02: Modelos de mudança espacial

MODELO	CONCEITO
Modelos estatísticos e econométricos	A técnica comumente utilizada e o método de regressão linear múltipla
Modelos de interação espacial	Baseiam-se na tentativa de modelar as atividades humanas no espaço físico, fazendo uma analogia com a lei da gravidade.
Modelos de otimização	Tais modelos são usados para aperfeiçoarem os objetivos de tomadores de decisão.
Modelos integrados	São aqueles que consideram interações, relações e ligações entre dois ou mais componentes de um sistema espacial- sejam eles setores da atividade econômica, regiões, sociedades e econômica, meio ambiente e economia e as relacionam ao uso do solo e ás

	suas mudanças.
Abordagem recente	Esses modelos podem ser classificados, a grosso modo em abordagens orientadas pelas ciências naturais, modelagem “markoviana” de mudanças no uso e cobertura do solo e abordagens orientadas para sistemas de informação geográfica

Fonte: BRIASSOULIS (2000)

SOARES FILHO *et al.*, (2001) propõem como modelo o Dinâmica Espacial (DE), baseada nos mecanismos dos Autômatos Celulares (BATTY *et al.*, 1997) e a define como um modelo espacial dinâmico que é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações de forças dirigidas.

Sua concepção metodológica ocorre como um arranjo n-dimensional de células onde o estado de cada célula dependerá de seu estado anterior e de um conjunto de regras de transição, de forma que sejam atualizadas simultaneamente em passos de tempo discretos (SOARES FILHO *et al.*, 2003).

Essa dinâmica de transição entre as células que compõem o modelo é determinada por um algoritmo conhecido como regra local. De modo que, o processo que controla a transição de uma célula de um estado *A* para um estado *B* depende da regra de transição adotada. No caso do modelo baseado em Autômatos Celulares usou-se para determinar essa regra de transição uma ferramenta denominada pesos de evidência, do inglês *weights of evidence*, muito usada por profissionais da área de estudos geológicos para a avaliação de locais favoráveis a presença de fenômenos geológicos. O resultado dessa etapa é um mapa de favorabilidade, onde se estimam os locais mais prováveis de mudança e quais variáveis espaciais contribuem para o processo.

A técnica de modelagem espacial do tipo Autômato Celular usa como entrada um mapa da paisagem inicial, um mapa do tempo de cada célula no seu estado atual e um conjunto de variáveis cartográficas divididas em estáticas e dinâmicas, sendo as últimas recalculadas a cada interação do programa (SOARES FILHO *et al.*, 2001). O

objetivo desses modelos é o estabelecimento de relações funcionais entre um conjunto de variáveis preditoras espaciais para então prever a localização da mudança na paisagem (PIJANOWSKI *et al.*, 2002).

DAMIÃO (2007) afirma que os principais modelos aplicados às mudanças no uso do solo na Amazônia são os modelos de regressão logística com base em informações de degradação de fragmentos florestais e distâncias de fontes de ignição previram com 80 % de precisão a ocorrência do intervalo entre os anos de 1997-1998 no período do *El Niño* (ALENCAR *et al.*, 2004).

SOARES FILHO *et al.*, (2004) aplicaram modelos baseados em Autômatos Celulares para a simulação dos efeitos da pavimentação na rodovia BR 163 - Cuiabá – Santarém, prevendo vários cenários em um intervalo de 30 anos, usando um sistema de informação geográfica (SIG), desenvolvido pelos autores, denominado DINAMICA.

Na mesma linha, o CLUE (*Conversion of Land Use and its Effects*), desenvolvido na *Wageningen Agricultural University*, localizada na Holanda, é um modelo que utiliza regressão logística para “especializar” mudanças na paisagem. Já foi utilizado em vários países para analisar mudanças de culturas agrícolas (GEOMA, 2002).

AMOR e CHRISTENSEN (2008) usaram o *Generalized Linear Model* (GLM) para estimar a probabilidade de desmatamento relacionada com diversas variáveis. Em sua investigação, que tinha como objeto de estudo os países da América central mais especificamente Belize, Guatemala e México, os autores estimaram a probabilidade da ocorrência de desmatamento em decorrência da construção de rodovias.

Diversos modelos têm sido propostos como suporte aos tomadores de decisão na tentativa de se prever novos desmatamentos em regiões da floresta amazônica, assim como para estimar o uso e ocupação do solo do bioma. Desta forma, para uma modelagem concisa, devem-se pesquisar quais os fatores indutores da causa do fenômeno e analisar a disponibilidade de dados na execução da tarefa.

3. CAPÍTULO

ÁREA DE ESTUDO

3.1 A ÁREA DE ESTUDO

Alguns critérios foram considerados quando da escolha da área de estudo. O primeiro é que a área estivesse situada na Amazônia, uma vez que busca-se gerar estimativas de desmatamento no bioma Amazônia. Um segundo critério enseja que na região exista uma ou mais rodovias, construídas anteriormente ao período da série histórica das imagens disponíveis. Como último critério para seleção é que existam dados espaciais de mudanças no uso do solo (imagens vetoriais) da referida área que possibilitem uma análise espaço-temporal (série histórica).

Adicionalmente, é conveniente que na área escolhida e naquelas contíguas a ela, possam ser extraídas variáveis biofísicas que ajudem na construção de um modelo de estimativas de desmatamento. Baseado nos critérios descritos anteriormente buscou-se junto ao banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) áreas que possuam tais características.

Para que os objetivos desta investigação possam ser atingidos, tornou-se necessário analisar e determinar o “comportamento” dos *pixels* em decorrência da sua distância até as variáveis estáticas, consideradas neste estudo como única fonte explicativa da dinâmica espacial, em função da pouca disponibilidade ou indisponibilidade das variáveis socioeconômicas desagregadas. Isso confere um caráter imprescindível à escolha de uma região de estudo que seja compacta, uma vez que grandes áreas demandariam um custo computacional elevado para seu processamento, talvez até inviabilizando o processo.

A área selecionada para a realização deste estudo está inserida no município de Baião, estado do Pará, possuindo uma população estimada de 28.299 habitantes, área de 3.758,27 km², localizada nas coordenadas geográficas Longitude: 49,67° W e Latitude: 2,79° S com trecho situado entre o km 27 ao km 70 da BR 422, conforme identificado na Figura 02. Este intervalo foi escolhido em função de possuir características espaciais heterogêneas, sendo um trecho da rodovia situado entre uma reserva indígena e uma

unidade de conservação reserva extrativista. Outras características desejáveis na área são a sua distância de áreas urbanas, o fato de possuir áreas de floresta remanescente e de suas imagens estarem disponíveis para o horizonte de estudo (10 anos).

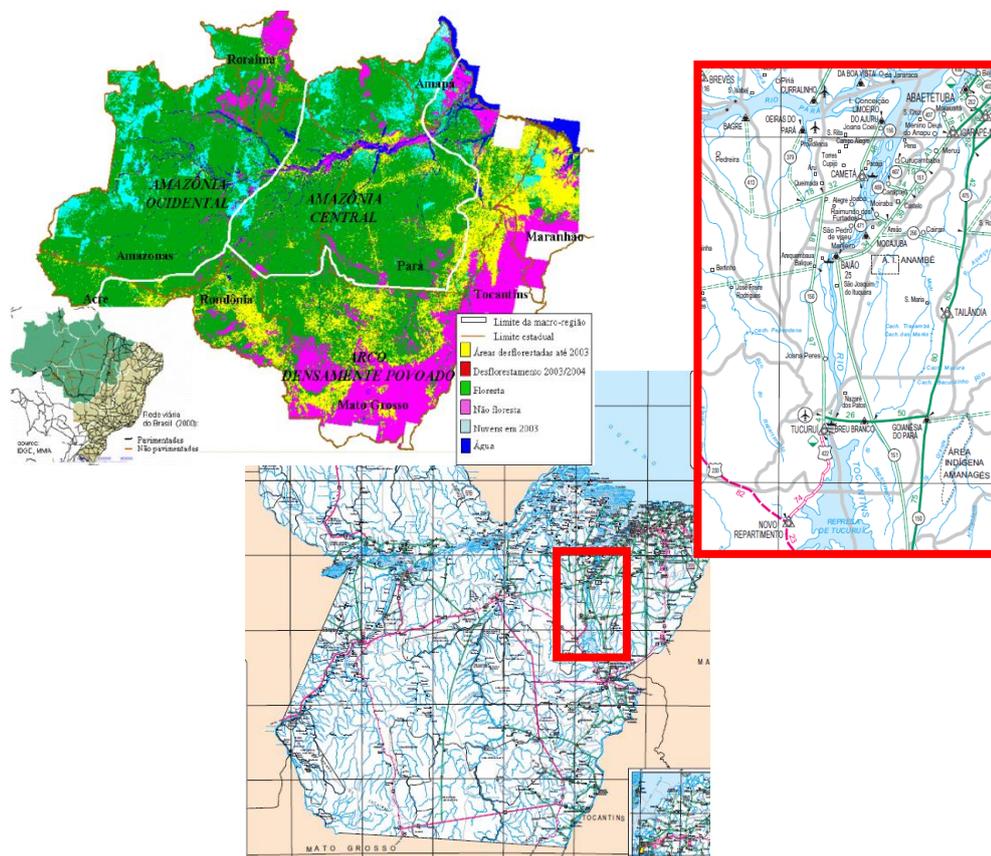


Figura 02: Visão geral da área de estudo.

A rodovia BR 422 localizada no estado do Pará é localmente conhecida como Transcarnetá, possuindo uma extensão de 367 km e ligando o município de Tucuruí (inicia no entroncamento com a BR 230), perpassando pelo município de Baião, onde neste atravessa a reserva indígena Trocará e a Reserva Extrativista Ipaú-Anilzinho, para então adentrar nos limites legais do município de Carnetá, se estendendo até Limoeiro do Ajuru, conforme descrito pela lei Federal nº 10.789, de 28 de novembro de 2003. Antes dessa data a rodovia em questão era uma rodovia estadual e possuía a

nomenclatura de PA 156, somente após a edição da referida lei passou a se chamar BR 422 e tornar-se de responsabilidade da esfera Federal.

BRANDÃO JUNIOR *et al.*, (2007) afirmam que o desmatamento se distribui exponencialmente em função da distância das estradas, isto é, o risco de desmatamento diminui drasticamente nas áreas mais distantes de estradas. Partindo-se dessa premissa, delimitou-se uma faixa de 5 km ao redor da rodovia BR 422 (oficial) e das estradas vicinais (não oficiais) no trecho compreendido na área de estudo, totalizando 302.079 Ha, como pode ser visto na Figura 03.

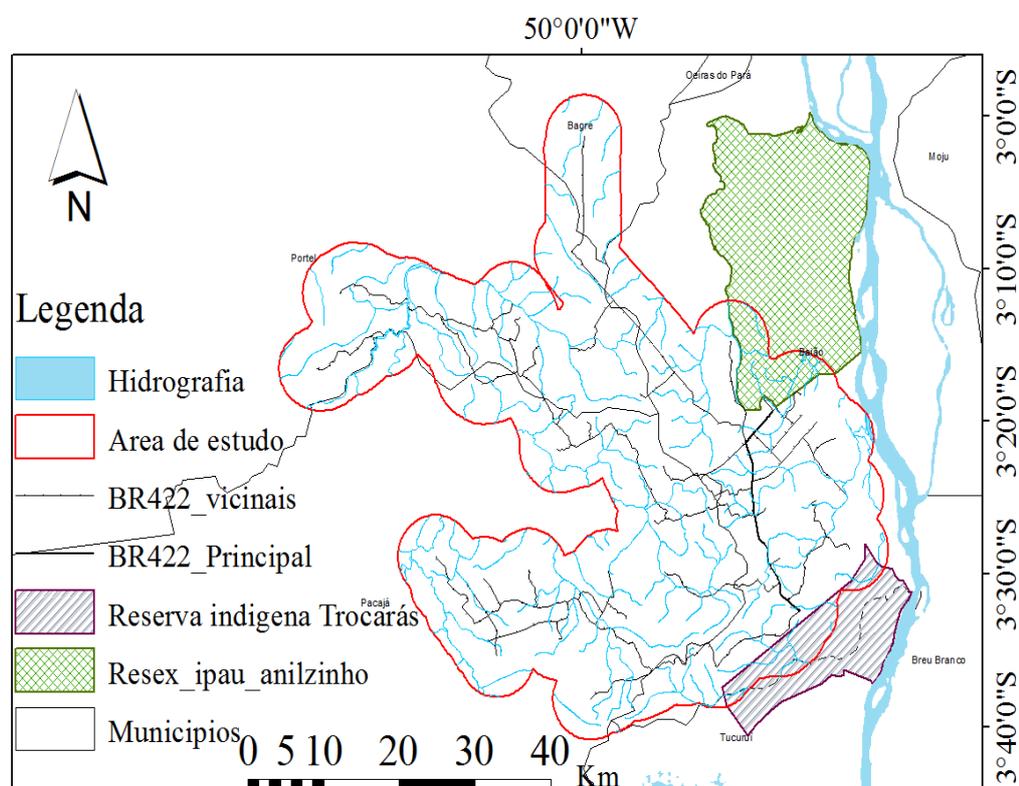


Figura 03: Delimitação da área de estudo.

3.2 HISTÓRICO E COMPOSIÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA MICRO REGIÃO DE TUCURUÍ

As áreas ocupadas hoje pelos municípios de Tucuruí, Breu Branco, Pacajá e Novo Repartimento, até metade do século 20 eram pertencentes ao município de Baião e atualmente compõem a micro região do lago da usina hidrelétrica (UHE) Tucuruí,

conforme exposto na Figura 04. Tais cidades tinham como a principal atividade econômica, naquela época, o comércio de castanha, onde uma estrada de ferro servia como a única via de escoamento para a matéria prima extraída.

Devido à topologia local acidentada, com grandes cachoeiras e potencial hidrelétrico, onde hoje está o município de Tucuruí construiu-se a usina hidrelétrica de Tucuruí como parte de um grande projeto de desenvolvimento para a Amazônia. Porém a construção desse empreendimento causou mudanças sem precedentes em toda área de inundação do lago da usina-montante (até o município de Marabá) e a jusante se estendendo ao município de Limoeiro do Ajuru.

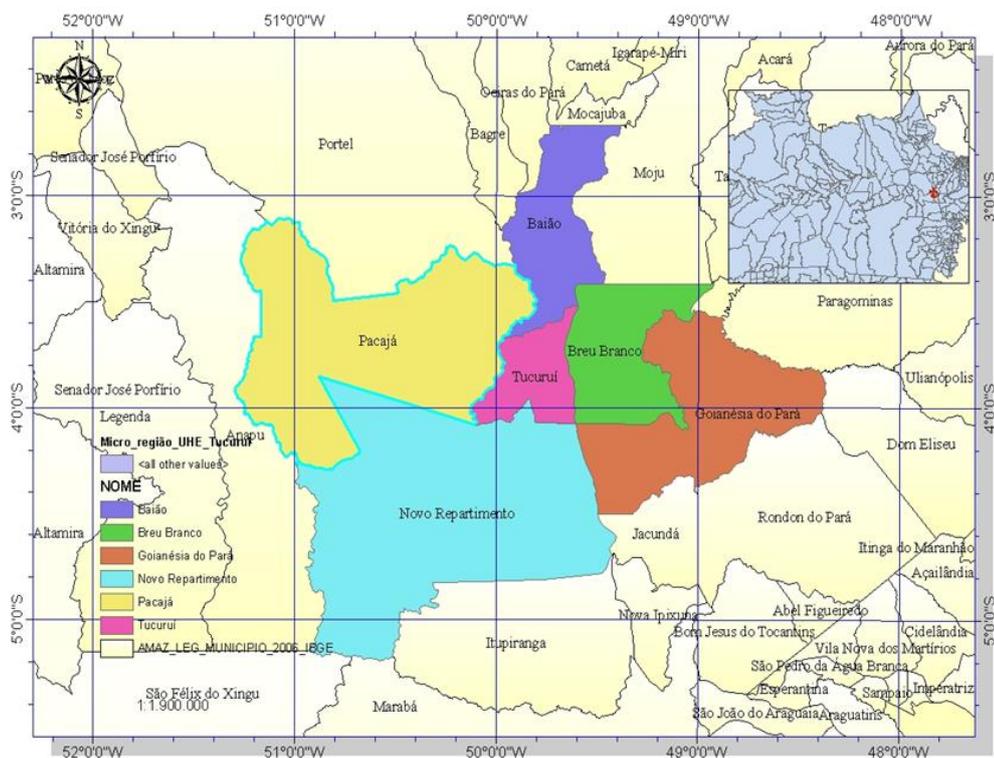


Figura 04: Micro região do lago da usina hidrelétrica de Tucuruí.

O contingente populacional naquela região aumentou significativamente no período que compreende o início das obras de construção da barragem até meados de 1990. Em 1970, o município de Tucuruí contava com aproximadamente 40 mil habitantes quando esse contingente chegou a atingir no pico de construção da obra nos

anos de 1978-1980 com aproximadamente 110 mil habitantes (CAVALCANTE *et al.*,2004).

No início dos anos 1980, grandes mudanças na cobertura vegetal da microrregião de Tucuruí foram registradas, resultado esse da extração dos recursos florestais sem precedente, nesta época o Estado brasileiro incentivava a ocupação na região sem qualquer tipo de restrição ao desmatamento desmedido (IBGE, 2005). Estradas foram abertas em todos os municípios ao redor do empreendimento para escoar os produtos florestais e facilitar o trânsito de pessoas. Uma dessas estradas foi a rodovia BR 422, que serve de ligação entre Tucuruí ao município de Limoeiro do Ajuru. Sua construção iniciou-se em 1982 e findou em 1985, e até novembro de 2011 permanecia sem a devida pavimentação.

No processo de construção dessa rodovia não houve preocupação, por exemplo, com o fato da estrada atravessar tanto terras indígenas quanto áreas ocupadas por ribeirinhos, que, embora não fossem delimitadas oficialmente, serviam a muito tempo de moradia para essas populações tradicionais.

Posteriormente, duas áreas protegidas, uma terra indígena e uma reserva extrativista foram criadas sobrepondo-se ao traçado da rodovia. Nas adjacências do trecho da rodovia, existem diversas estradas vicinais construídas por agentes locais sem qualquer tipo de autorização do poder público e menos ainda, sem estudos de viabilidade socioeconômica e ambiental. O que se observa nesses casos é que tais vias funcionam para facilitar o acesso aos recursos florestais ao redor da rodovia, dando à região um padrão espacial com aspecto de espinha de peixe (Figura 05).

A área de estudo abrange tanto a BR 422 quanto as estradas vicinais ao redor do trecho em questão. Essas estradas vicinais possuem como características: não serem pavimentadas, traçado irregular, leito com buracos, sem drenagem, de modo que não há qualquer atendimento às normas de construção de rodovias.

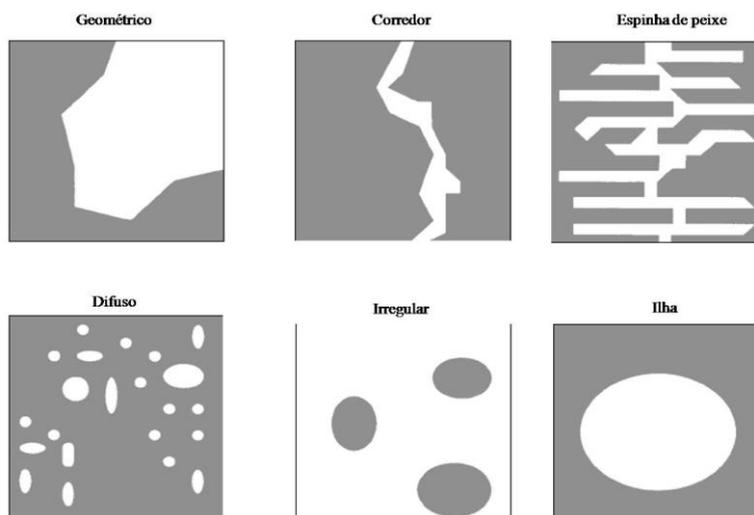


Figura 05: Diversos padrões espaciais seguidos pelo desmatamento.

Fonte: DUTRA, 2006.

Os solos do município são representados pelo Latossolo amarelo, Argissolo vermelho, Argissolo vermelho amarelo e Argissolo vermelho amarelo. Nas áreas aluviais, estão os gleyseutrófico e distrófico, textura indiscriminada; aluviais eutrófico e distrófico, textura indiscriminada; plintossolo distrófico, textura indiscriminada e areia quartzosa distrófica (IBGE, 2005). (Figura 06).

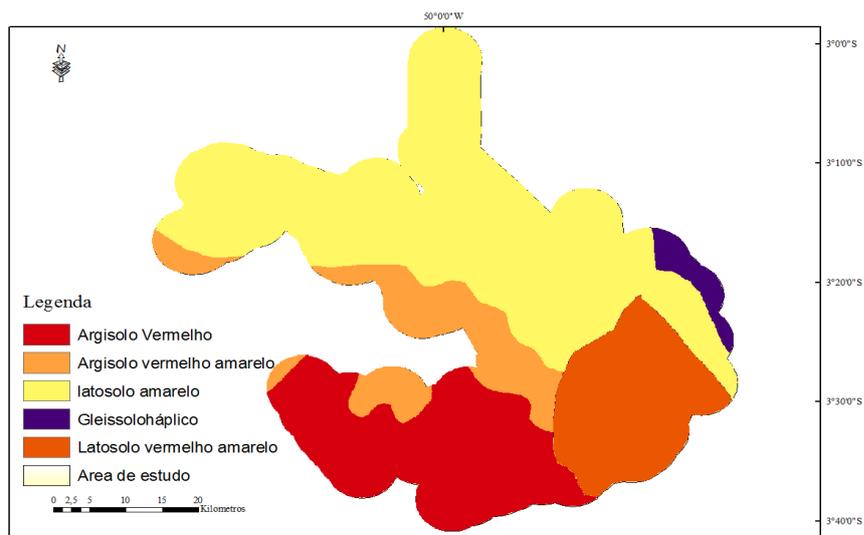


Figura 06: Pedologia da área de estudo.

A vegetação existente é de floresta densa dos baixos platôs, localizada nas porções mais elevadas e interiorizadas. Já nas áreas próximas à sede do município, onde a mata original foi removida pela ação do desmatamento, aparece a floresta secundária. Na porção insular do município de Baião, ocorre formações aluviais recobertas pela floresta de várzea, caracterizadas pela presença de palmeiras no meio da vegetação dicotiledônea (IBGE, 2005). (Figura 07).

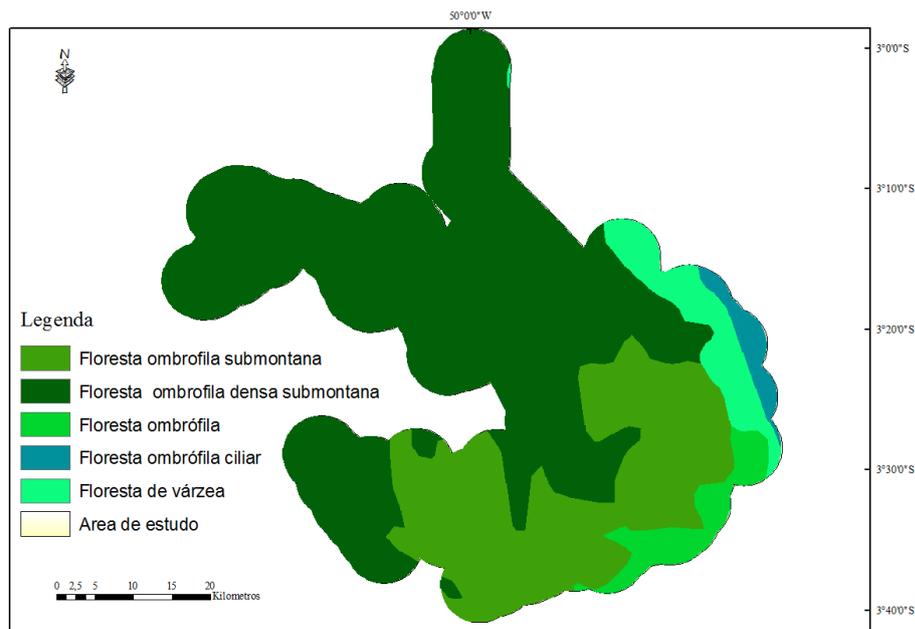


Figura 07: Vegetação da área de estudo.

A geologia do município é representada por sedimentos terciários, da formação barreiras, e sedimentos quaternários sub atuais e recentes. O relevo acompanha a pobreza litológica, com a presença de tabuleiros relativamente altos em relação aos do baixo Tocantins, havendo também níveis de terraços e várzeas, todos inseridos na unidade morfoestrutural planalto rebaixado da Amazônia do baixo amazonas (IBGE, 2005).

A hidrografia do Município é representada, principalmente, pelo rio Tocantins que atravessa o município no sentido norte/sul, formando algumas ilhas de grande extensão, como a ilha grande do Jutaí e a do Bacuri, que são as mais importantes (Figura 08).

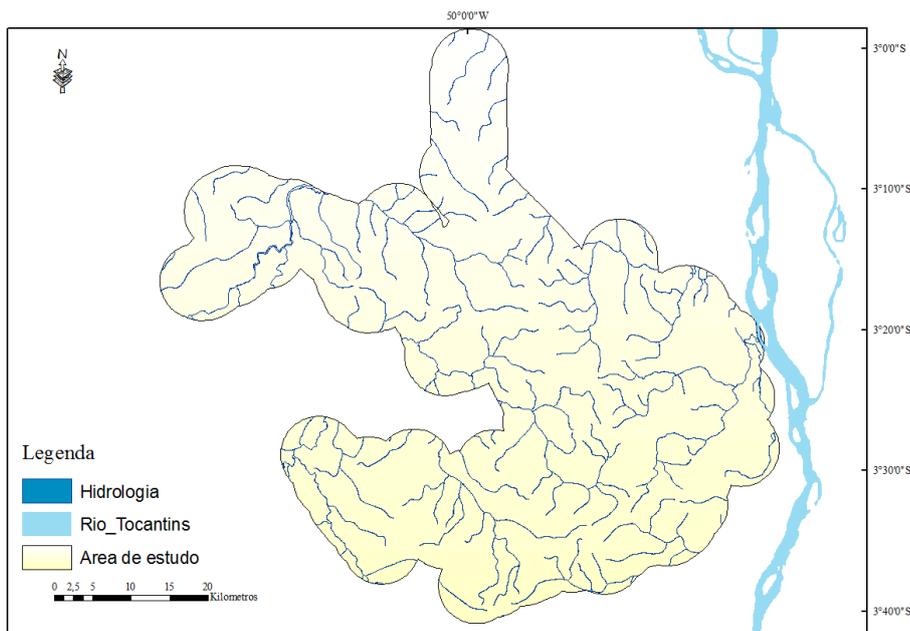


Figura 08: Hidrografia da área de estudo.

Pela classificação de *Köppen*, o clima corresponde ao tipo *Ami* que se classifica pela média mensal com temperatura mínima superior a 18° C, estação seca de pequena duração e umidade suficiente para manutenção da floresta, amplitude térmica que não ultrapassa 5° C. Há ligeira variação para o tipo *Aw*, com chuvas que ocorrem, com maior incidência, de fevereiro a abril (IBGE, 2005).

O mês de abril, considerado como o de maior pluviosidade, chega a registrar cerca de 44,1 mm, e novembro, o menos pluvioso, já registrou apenas 9 mm. Pelas condições climáticas, segundo o método do balanço hídrico de *Thorwaite*, constata-se que no município a maior disponibilidade de água no solo se refere aos meses de fevereiro a junho (SEPOF-PA, 2007) (IBGE, 2005).

4. CAPÍTULO

DESMATAMENTO: INDUÇÃO E MODELAGEM

Este capítulo será iniciado por uma revisão acerca dos fatores indutores do desmatamento na Amazônia, seguido por uma hierarquização das causas diretas, indiretas e outros fatores causadores do desmatamento para no final expor quais variáveis serão usadas como entrada na modelagem e o porquê da sua escolha.

4.1 O DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA

O desmatamento na Amazônia nos últimos anos tomou proporções nunca antes observadas seja via demanda pelas *commodities* produzidas pela região, seja pelo incentivo governamental com a abertura de estradas e programas de ocupação em massa através de políticas fundiárias. Como resultados desse desmatamento o aquecimento global e a perda da biodiversidade tornaram-se evidentes e resultam em alterações no funcionamento dos ecossistemas globais (MARGULIS, 2003).

O evento desmatamento possui diversas forças causadoras que podem variar tanto espacialmente como temporalmente. Para melhor entender o fenômeno espacialmente, BECKER (2001) subdivide a região amazônica em três fronteiras distintas (macro regiões) de desmatamento: Amazônia Ocidental, Amazônia Central e Arco do densamente povoado (Figura 09), sendo que nesta última encontra-se a rodovia objeto de estudo desta dissertação. Para cada macro região o fenômeno do desmatamento ocorre de forma distinta seguindo padrões locais, resultados de diferentes fatores indutores.

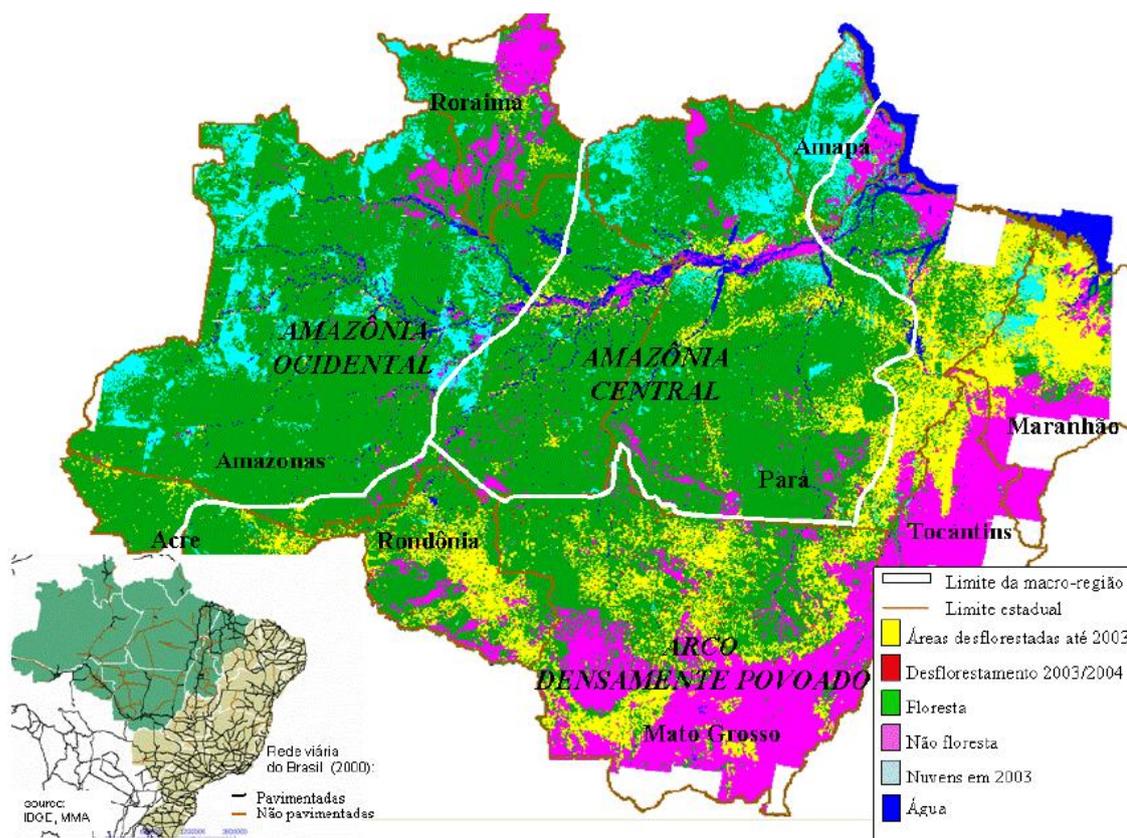


Figura 09: Áreas desmatadas e macro regiões na Amazônia.

Fonte: BECKER, 2001

4.2 FATORES INDUTORES DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA

De acordo com GEIST *et al.*, (2001), as forças causadoras do desmatamento mais observadas para toda a Amazônia legal podem ser segregadas em 3 grupos. O primeiro é denominado de causas diretas, o segundo de causas indiretas e o terceiro grupo classificado como de outros fatores.

As **causas diretas** são imediatamente relacionadas com a extração dos recursos naturais decorrentes das atividades humanas. Como exemplo, a demanda por madeira (extração madeireira), demanda por terra (agricultura) e a ocupação humana (urbanização e infraestrutura) são causas que influenciam diretamente na ocorrência do desmatamento, conforme descrito na Tabela 03.

Tabela 03: Causas imediatas do desmatamento

Causas diretas	
Atividade de agricultura	Agricultura temporária; Agricultura perene; Pecuária; Colonização e migração.
Extração madeireira	Comércio de madeira; Extração de lenha; Estacas de madeira; Produção de carvão vegetal;
Infraestrutura	Vias de acesso (rodovias, hidrovias, ferrovias); Investimentos (construção de infraestrutura, polos industriais); Expansão urbana; Estrutura para extração de recursos minerais.

Fonte: Adaptado de GEIST *et al.*,(2001)

As **causas indiretas** do desmatamento são descritas como fundamentais para o entendimento do processo e, diferentemente das causas diretas, não atuam, *in loco*, na ocorrência do fenômeno, e sim como uma força invisível que demanda por recursos florestais, conforme descrito na Tabela 04.

Tabela 04: Causas indiretas do desmatamento na Amazônia.

CAUSAS INDIRETAS	
Fatores Econômicos	Demanda de mercado por produtos florestais; Demanda por Urbanização e industrialização Condições de mercado (oscilações de preço, taxas cambiais);
Fatores políticos e institucionais	Fiscalização; Respeito ao direito de propriedade.
Fatores tecnológicos	Tecnologia na pecuária; Tecnologia no setor florestal; Tecnologia na Agricultura.
Fatores culturais	Movimentos populares; Conscientização popular acerca das questões ambientais.
Fatores demográficos	Migração; Pressão antrópica sobre os recursos naturais; Densidade populacional.

Fonte: Adaptado de GEIST *et al.*, (2001)

Finalmente, GEIST *et al* (2001) classificam como **outros fatores** a divisão que engloba as variáveis de características do solo, agentes biofísicos e eventos de emergência social conforme descrito na Tabela 05.

Tabela 05: Outros fatores causadores do desmatamento.

OUTROS FATORES	
Característica do solo	Qualidade / tipo de solo; Relevo; Localização de recursos hídricos; Tipo de vegetação.
Eventos de emergência social;	Guerra, rebeliões; Crise na saúde e economia; Mudanças radicais nas políticas governamentais; Eventos de extremos climáticos (chuvas, secas).

Fonte: Adaptado de GEIST *et al.*, (2001)

MARGULIS (2003) afirma que os agentes como extração madeireira, expansão da pecuária, pluviosidade e custos de transporte podem, em grande parte, explicar o desmatamento. Em seu estudo o autor descreve os agentes causadores do desmatamento tendo como escopo a região Sul do Pará, porém sem adentrar numa análise detalhada das variáveis causadoras deste fenômeno.

GARCIA *et al.*, (2007) em seu trabalho de modelagem do desmatamento na Amazônia usaram as variáveis distância média à rodovia asfaltada, cabeças de gado bovino por Km², índice de governança em 1996/2000, densidade populacional em 1996, percentual de área municipal plantada em 1997 e valor da lavoura por km² em 1997 para melhor explicar o desmatamento nos anos de 1997 e 2001.

O índice de governança é, segundo GARCIA *et al.*, (2007), definido como a forma de atuação do governo no cumprimento da legislação ambiental, isto é, a efetiva fiscalização dos órgãos responsáveis nas 3 esferas (Federal, Estadual, Municipal). RIBEIRO *et al.*, (2009) afirmam que a agricultura de larga escala, a pecuária de corte e as queimadas são causas diretas do desmatamento, sendo que dessas causas, a de maior influência é a pecuária.

O que se observa na literatura é uma mistura das variáveis biofísicas e socioeconômicas sem haver uma explicação detalhada do papel de cada uma na modelagem do desmatamento, além do uso das mesmas variáveis para explicar o evento do desmatamento em toda Amazônia, desconsiderando a heterogeneidade da região. BECKER (2001) afirma que é inviável entender o que ocorre em uma micro região e usar tal conhecimento para resolver conflitos em outra micro região, desconsiderando desta forma as escalas geográficas diferentes.

Uma classificação (hierarquização) mais consistente das variáveis torna-se necessária, para que haja um melhor entendimento do papel de cada uma na ocorrência de um evento nas diversas sub-regiões da Amazônia. A divisão aqui descrita é uma adaptação obtida na revisão das literaturas já citadas. A Figura 10 descreve a classificação das variáveis no desmatamento mais observadas na literatura.

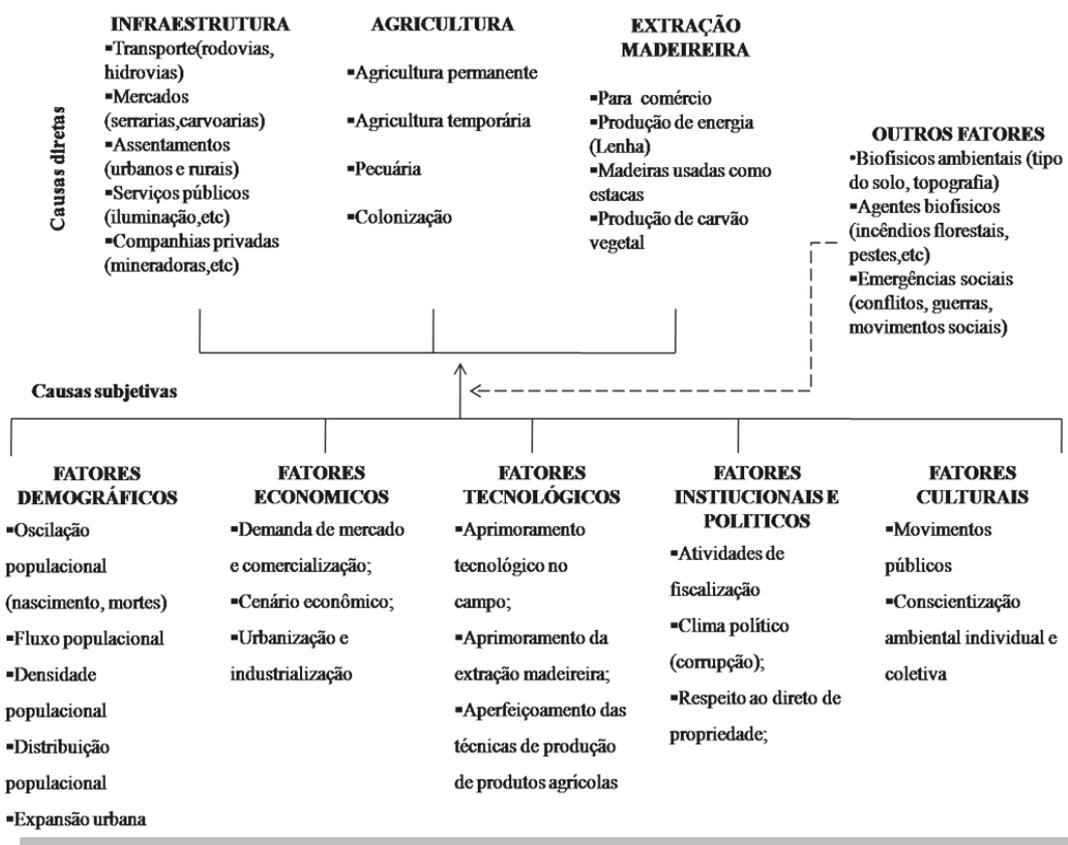


Figura 10: Hierarquização das variáveis responsáveis pelo desmatamento.

Fonte: adaptado de GEIST *et al.*, (2001).

AGUIAR (2003) expõe a falta de precisão encontrada na literatura no que se refere a uma classificação mais detalhada do papel de cada variável, e para tanto, a autora subdividiu em dois grandes grupos as variáveis, a saber:

- **Variáveis Socioeconômicas** - obtidas através de censos, tabulação de dados, por exemplo, renda *per capita*, migração populacional, crédito rural, produção agro florestal densidade demográfica, entre outras. Infelizmente, com frequência esse grupo de variáveis é disponibilizado em um nível de agregação (setores censitários, municípios) que dificulta ou impede seu uso para algumas aplicações. Este fato acentua-se na Amazônia, devido à extensa área ocupada por alguns municípios e conseqüentemente seus setores censitários. Como exemplo das dimensões dos municípios amazônicos pode-se citar município de Altamira no Pará, onde sua extensão territorial é de 159.696 km², sendo maior que vários países..
- **Variáveis Biofísicas** - obtidas através de levantamentos sobre as características geomorfológicas de uma região, por exemplo, características pedológicas, geológicas, geotécnicas, de relevo, fitofisionômicas, climáticas, uso do solo e outras.

Fica explicito que não há um conceito unânime a ser adotado na segregação das variáveis em classes e muito menos no papel que cada uma exerce na ocorrência de um evento, porém adotou-se neste trabalho a classificação usada por AGUIAR (2003).

4.3 TÉCNICAS QUANTITATIVAS E MODELAGEM PARA PREVISÃO DE MUDANÇAS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A previsão de eventos em ambientes SIG surgiu para solucionar as limitações das geotecnologias, baseadas em uma visão estática e bidimensional dos fenômenos, onde os modelos considerados dinâmicos são uma representação de um evento localizado no mundo real baseado em ferramentas matemáticas, possuindo dimensão temporal e, suas saídas variam com o tempo e a presença ou não de agentes indutores do evento objeto de estudo (BURROUGH, 1998).

BRIASSOULIS (2000) afirma que diversas metodologias podem ser empregadas na modelagem de uso e ocupação do solo e os tipos mais comuns pertencem ao grupo dos modelos econométricos e dos modelos de mudanças espaciais. Segundo AGUIAR (2003), os modelos econométricos são usados pra quantificar as mudanças no tempo através de uma ou mais equações que expressam a relação entre demanda e/ou produção e seus fatores determinantes, normalmente através de modelos de regressão múltipla, com uma ênfase em fatores econômicos.

Os modelos de estimativas de mudanças espaciais predizem no espaço e no tempo, os locais passíveis de mudança, empregando para tanto os três tipos de ferramentas mais usuais em mudanças espaciais nas regiões rurais, a saber: análises de regressão, estatística *Bayesiana* e os modelos mistos, onde modelos baseados em Autômatos Celulares (AC) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem se encaixar na última categoria de modelos de mudança espacial LESSCHEN *et al.*, (2005).

4.4 O USO DOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) NA MODELAGEM ESPAÇO TEMPORAL

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica proporciona uma maior flexibilização na representação de paisagens, tornando a modelagem dos processos ambientais mais objetiva. Os SIGs que também possibilitam a manipulação de imagens em formatos matriciais se tornaram ferramentas úteis na manipulação de imagens de satélite, principal fonte de informações na modelagem espacial.

A representação matricial, para um processo de simulação, torna-se mais fácil de lidar matematicamente uma vez que a unidade de análise (célula, *pixel*) possui o mesmo tamanho e forma, resultando em maior capacidade analítica, conforme descrito na Figura 11.

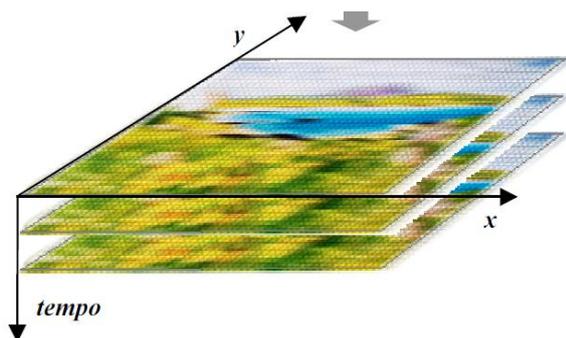


Figura 11: Abstração de um modelo de mudanças espaciais.

Fonte: SOARES FILHO *et al.*, (2003).

Essa capacidade dos SIGs em manipular dados geográficos permite a formatação dos dados obtidos sobre as mudanças espaciais para a etapa de modelagem. O processo de desenvolvimento de modelos envolve a “discretização” da variação espacial dos dados com o objetivo de permitir a sua descrição, representação e manipulação em um ambiente computacional (BARBOSA, 1997).

A modelagem baseada em Autômatos Celulares enseja que os arquivos usados como entrada, ou variáveis independentes, estejam em formato *grid* (Grade regular de células), (Figura 12) onde cada célula (ou *pixel*) possua um atributo espacial temporal e um par de coordenadas x,y .

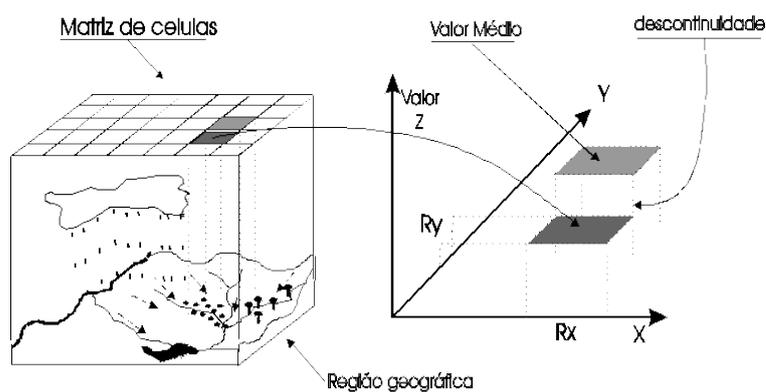


Figura 12: Representação de grade regular de células.

Fonte: BARBOSA (1997).

5. CAPÍTULO

AUTOMATOS CELULARES (AC's)

Neste capítulo, inicialmente será abordado o histórico da concepção dos Autômatos Celulares desde a inspiração, concepção, até as principais aplicações desta técnica. Em seguida serão descritos os conceitos usuais e princípios de funcionamento, composição, funções de transição, vizinhança entre outros conceitos básicos sobre AC's. Finalmente, pontuam-se as principais aplicações desta técnica em Engenharia dos Transportes.

5.1 HISTÓRICO DOS AUTÔMATOS CELULARES

Os Autômatos celulares derivaram das estruturas propostas pelo matemático Stanislaw Ulam em 1950, denominada espaço celular, e surgiram como resposta à pesquisa de Jonh Von Neumann de criar um modelo que emulasse os sistemas biológicos de auto reprodução, resultando no primeiro modelo de Autômato Celular. Posteriormente, até 1970, houve um hiato temporal quanto ao desenvolvimento teórico dos AC's, quando ocorreu o desenvolvimento do jogo da vida por Jonh Horton Conway, inspirado em AC's e em questões de lógica matemática, fato esse que resultou numa popularização sem precedentes do ferramental. Esse trabalho abriu novos precedentes e iniciou uma nova etapa do aprimoramento teórico dos AC's, com foco na criação de diferentes tipos de regras de transição e numa maior “complexização” do ferramental.

O jogo da vida baseia-se em uma matriz de células onde células adjacentes à célula de interesse, incluindo aquelas em posição diagonal são consideradas como parte de uma vizinhança. O entendimento dos princípios do jogo da vida é necessário para uma compreensão do que vem a ser os AC's, e têm como princípios as seguintes premissas:

- Uma célula inativa que possua três vizinhas ativas torna-se ativa;
- Uma célula ativa circundada por outras ativas não muda de estado;
- Em qualquer outra situação diferente das duas anteriores a célula torna-se ou permanece inativa.

Aproveitando-se do relativo sucesso alcançado pelo jogo da vida outras aplicações para os AC's foram desenvolvidas. O aparecimento das primeiras gerações de computadores em idos dos anos 1960 juntamente com o advento da geografia quantitativa nos anos 1970 propiciou a aplicação dos Autômatos em sistemas geográficos, dando início aos primeiros modelos de mudanças espaciais (TOBLER, 1970).

Nos anos 1980 a difusão da computação gráfica facilitou a propagação de modelos de mudanças urbanas e rurais. A partir de 1990 até os dias atuais os modelos baseados em AC's vêm ganhando melhoramentos, dentre os quais passaram a incorporar as dimensões socioeconômicas e ambientais como fatores determinantes para a concepção de modelos mais robustos.

5.2 CONCEITOS BÁSICOS DA TÉCNICA DE AC's

Um Autômato Celular pode ser resumido como uma grade regular uniforme discreta, onde cada componente, ou seja, uma célula agrega-se a outras células para formar uma grade, do inglês *grid*, quando é considerado como um sistema em duas dimensões (WOLFRAM, 1983). Inicialmente descrevem-se os princípios que regem os Autômatos Celulares da seguinte forma:

- Um vetor de n dimensões com a presença de células a (a_1, a_2, \dots, a_i);
- Um conjunto de estados S (s_1, s_2, \dots, s_i) possíveis de uma célula a_n num instante t ;
- Um conjunto de regras R (r_1, r_2, \dots, r_i). Uma regra local R_m é classificada como **determinística** quando a resposta a um determinado estímulo é sempre a mesma - independentemente de outras condições, sendo denominado AC determinístico. Já uma R_m **probabilística** é quando um conjunto de processos estocásticos determinam qual resultado será assumido por uma célula ao receber um estímulo.

Além dos princípios anteriormente descritos, pode-se citar como preceitos complementares o **paralelismo** e a **homogeneidade**, que influenciam na etapa de

atualização de uma célula indo de um tempo t para $t + 1$. O paralelismo é o processo de atualização de todas as células a cada interação. Um AC síncrono atualiza o estado de todas as células ao mesmo tempo a cada mudança do estado de tempo, diferentemente de um AC assíncrono, onde o estado de cada célula é atualizado uma após a outra, sendo necessário o estabelecimento da ordem de atualização. Quanto a homogeneidade, um AC é dito homogêneo quando um conjunto de regras R não depende da localização espacial de uma célula, diferentemente de um AC heterogêneo, que assume que a localização espacial de uma célula influencia no conjunto de regras R a ser aplicado (WOLFRAM, 1983).

Um sistema pode ser classificado quanto a sua dimensão e quanto ao formato da célula. Quanto a dimensão, um AC pode ser de 1 dimensão (1D), postos lado a lado, 2 dimensões (2D) e 3 dimensões (3D), distribuídos num espaço real, conforme apresentado na Figura 13. Como estrutura, os Autômatos Celulares devem possuir geometria com característica discreta (a_1, a_2, \dots, a_n) (BARROSO, 2006).

5.3 DESCRIÇÃO DOS AC's UTILIZADOS

O Autômato Celular elementar possui como características uma estrutura de duas dimensões, com células regularmente espaçadas e formas geométricas diversas, tendo maior uso a geometria quadrada. A dinâmica de atualização dos atributos das células é síncrona e heterogênea, com regras locais de transição (R_m) probabilística $a_{i,j}(t + 1) = \delta(a_{i,j}(t), a_{i+1,j}(t), a_{i,j+1}(t), a_{i-1,j}(t), a_{i,j-1}(t))$ onde o estado que cada célula pode assumir é estimado via um valor k .

A quantidade total de combinações possíveis que uma vizinhança de células pode assumir é dada pela Equação 01, onde n é o numero total de células considerando a célula central (1 célula) mais a vizinhança (8 células), p é o numero de estados que uma célula pode assumir (desmatamento \rightarrow floresta e vice versa), tendo dois estados. ($p = 2$). A influência da vizinhança na transição de uma célula x y é determinada por um parâmetro r , que relaciona a influencia no estado de uma célula central causado pelas células vizinhas.

$$pC_{n+p-1}^n = p \frac{(n+p-1)!}{n!(p-1)!}$$

Equação 1

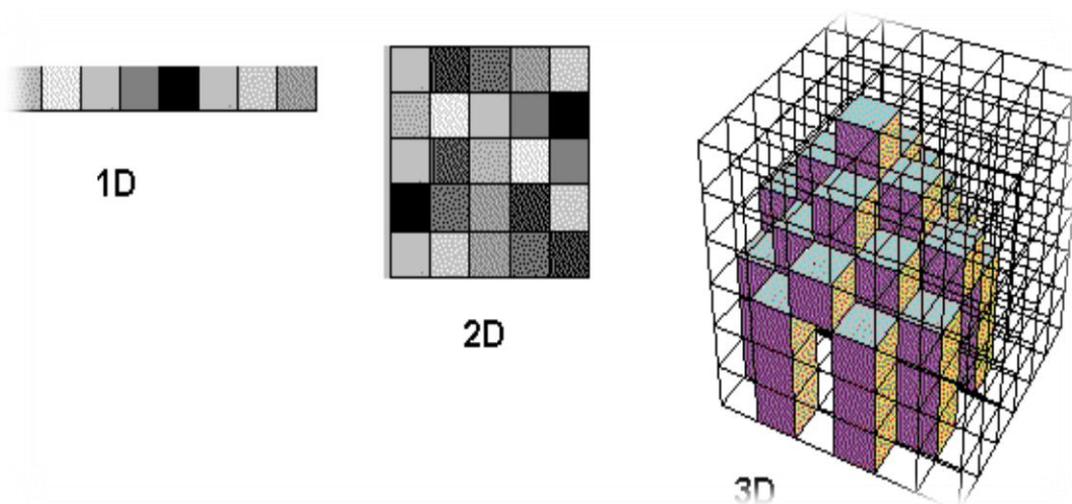


Figura 13: Esquema de dimensões de um AC.

Fonte: PÁDUA, (2001).

5.4 APLICAÇÕES DE AC'S EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

De acordo com SOARES FILHO *et al.*, (2003), o uso dos Autômatos Celulares ocorre em diversos campos do conhecimento, podendo ser usados em áreas como a medicina e biologia (emulação de micro-organismos) em estudos de dispersão de animais e fogo, modelagem de fenômenos físicos, biológicos e sociológicos, geração de efeitos gráficos, simulação do comportamento dos gases, do processo de cristalização entre outros.

O uso dos AC's em modelos de previsão de alterações espaciais possui o objetivo maior de estimar quando e onde ocorrerá uma mudança (ou permanência) de um estado em um tempo t para um estado igual ou diferente num tempo $t+1$. Desta forma algumas aplicações do ferramental direcionado a Engenharia de Transportes estão direcionadas simulação do trafego urbano se dá pela, e seu emprego se dá pela

estimativa do comportamento de um espaço geográfico no espaço e tempo em uma determinada área de estudo.

Ainda são poucos os trabalhos dedicados ao estudo das mudanças espaciais ao redor de rodovias usando Autômatos Celulares. Dentre tantos trabalhos desenvolvidos com o uso do ferramental em questão, pode-se citar os desenvolvidos por SOARES FILHO *et al.*, (2005), que utilizaram um modelo baseado em AC's no *software* DINAMICA para prever as mudanças resultantes da futura e recuperação da pavimentação nas rodovias BR 163, BR 319, BR 210, BR 401, BR 156, BR 158, BR 364 na Amazônia.

Os autores supracitados consideram diversos cenários possíveis, indo desde cenários otimistas com total aplicabilidade das leis e pouca/nenhuma demanda por recursos florestais (onde praticamente não ocorre desmatamento) até cenários pessimistas com total ausência do Estado e exacerbada demanda por recursos florestais.

ALMEIDA *et al* (2005) modelou as mudanças espaciais na microrregião do município de Piracicaba e Bauru no Estado de São Paulo, região conhecida por ser o maior polo intermodal da América Latina, usando como entrada atributos biofísicos do terreno e dados socioeconômicos. O desenvolvimento deste trabalho vêm a aumentar o conhecimento da técnica aplicada aos transportes no que tange ao estudo dos impactos causados pela construção de rodovias em áreas rurais.

TAVARES (2010) simulou o tráfego urbano na região de Belo Horizonte (Minas Gerais) desenvolvendo um modelo denominado *Cellular Automata for Urban Traffic Simulation* (CAUTS). Tal modelo possui a capacidade de simular o tráfego urbano considerando todas as variáveis envolvidas e todas as situações possíveis – indo de um fluxo de veículos saturado até momentos de pouca / nenhuma movimentação de veículos.

As considerações sobre as possíveis falhas ou virtudes dos AC's restringem-se tão somente a sua aplicação à modelagem de mudanças espaciais, mais precisamente no uso do aplicativo DINAMICA EGO. A principal falha / ausência encontrada foi quanto ao processo de cálculo das áreas suscetíveis a mudanças espaciais, uma vez que o

procedimento é restrito somente à técnica de Pesos de Evidência, e não é permitida a escolha de outras técnicas.

6. CAPÍTULO

METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais e método usados nesta investigação. Para isto foi necessário revisar as técnicas adotadas para produção de modelos de mudanças espaciais, selecionar e testar uma técnica que possibilitasse o uso das variáveis disponíveis como entrada (explicativas), apenas características biofísicas e usar ferramentas computacionais para construção do modelo, selecionar uma área de estudo e validar e testar o modelo proposto.

Para a modelagem proposta, inicialmente, foram obtidas imagens em formato vetorial, contendo informações sobre a série histórica da dinâmica das mudanças espaciais ao redor da rodovia além das variáveis estáticas como rodovia, rios, topologia, vegetação e relevo da área de estudo, todas descritas na Tabela 6.

Tabela 06: Tipos de variáveis biofísicas usadas na modelagem proposta.

Classe de variáveis	Tipo de variáveis
Variáveis dinâmicas: Sua localização depende da probabilidade de mudanças espaço temporais	É o objeto a ser modelado. Exemplo: Mudanças no uso do solo, como desmatamento, recuperação de áreas degradadas, urbanização.
Variáveis estáticas (não mudam no espaço durante o período da modelagem)	Exemplo: Rios, rodovias, relevo do terreno, pedologia entre outras.

Os arquivos disponíveis, imagens em formatos vetoriais, caracterizam-se por possuírem continuidade espacial, o que impede a delimitação de uma unidade para estudo. Contrapondo-se a eles, as imagens em formato *raster* possuem características discretas, o que torna possível a delimitação de uma área de estudo como pode ser visto na Figura 14.

Para cada *pixel*, que é a unidade de estudo, é atribuído um valor numérico pré-definido, que caracterizará uma variável biofísica. Este capítulo inicia descrevendo a modelagem em séries temporais, usadas nesta investigação, para posteriormente, descrever a forma de obtenção dos dados temporais usados, materiais e os procedimentos (métodos) adotados para a produção dos resultados.

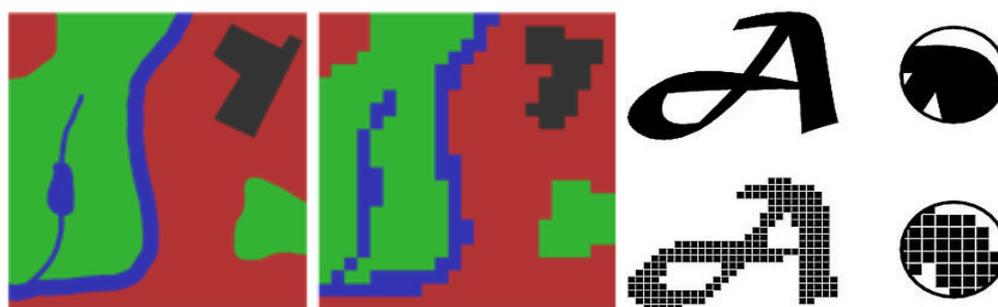


Figura 14: Diferenças entre arquivos vetoriais e raster.

Fonte: Adaptado de BRYS, (2008).

Quando se tenta modelar um evento real a sequência de acontecimentos deve ser observada e dela abstraídos seus padrões durante um período determinado, dependendo da escala temporal que se deseja estudar. Tais observações podem ocorrer *in loco* ou através de técnicas de observações remotas. Na etapa de processamento dos sinais um padrão temporal, por vezes, é contínuo. Em situações como essas, as amostras devem ser convertidas em uma sequência de padrões discretos no tempo para posterior processamento por um sistema computacional de modo que possam ser chamados de sequências temporais (BARRETO, 1998).

A modelagem de eventos dinâmicos, em diversos casos, trata de fenômenos físicos que ocorrem na natureza como, por exemplo, a previsão do tempo, estimativa de fluxo do trânsito de veículos numa determinada via, diagnóstico de doenças entre outros. Desta forma, o resultado de uma modelagem depende da aplicação e do problema objeto da pesquisa. Segundo HERZT *et al.*, (1991), quando se processa algum tipo de padrão temporal se está interessado em:

- Reconhecimento de sequência: Têm-se o reconhecimento de uma saída quando uma entrada específica é apresentada (ex: reconhecimento de voz);
- Reprodução de sequências temporais: o produto deve ser o reconhecimento de padrões. Como exemplo tem-se uma sequência melódica incompleta, que após o prévio reconhecimento, o produto da modelagem é a parte final da melodia;
- Associação temporal de sequência: para esta situação, uma série de saídas particulares deve ser gerada em resposta a um seguimento específico de entradas. A sequência de entrada e saída podem ser diferentes;
- Geração de sequências temporais: neste caso o sistema gera uma sucessão de estados entre dois pontos quaisquer, não consecutivos dados: o ponto inicial e o ponto final. Este conceito está estreitamente ligado ao de interpolação de estados.

Os dados espaciais, usados nesta investigação, foram obtidos como imagens, através de arquivos no formato vetorial com as informações sobre os atributos espaciais da área de estudo (variáveis biofísicas), juntamente com as séries históricas do desmatamento. Posteriormente, tais imagens foram convertidas para formato *raster*, com uma resolução adequada, onde cada *pixel* componente da imagem possui um valor que identificará seus atributos.

Os dados foram inseridos em um aplicativo computacional de modelagem espacial, denominado DINAMICA EGO, que se fundamenta na técnica de Autômatos Celulares. SOARES FILHO *et al.*, (2003) afirmam que um modelo simulação, com índice de acerto igual ou maior do que 75% estará validado, função do caráter falível das predições ambientais.

6.1 MATERIAIS

6.1.1 IMAGENS

O desenvolvimento desta investigação pressupõe a existência de dados espaciais (imagens) da região de estudo, e que tivessem sido obtidas em diferentes épocas (anos), que pudessem ser caracterizadas como uma série histórica e a partir das quais, se pudessem extrair variáveis biofísicas como forma de compreender e inferir, através de modelos que considerassem a variação espaço temporal da paisagem, como se dá o padrão de desmatamento induzido pela implantação ou pavimentação de uma rodovia.

Buscou-se no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), órgão que no Brasil é referência em sensoriamento remoto, saber se existiam tais imagens e como resultado. De forma gratuita, foi disponibilizado pelo referido instituto o relatório anual de desmatamento denominado de Programa de Cálculo do Desmatamento da Amazônia (PRODES), onde são divulgados, anualmente, os índices de desmatamento para toda a Amazônia legal. O INPE realiza a avaliação sistemática do desflorestamento na Amazônia Legal desde 1978, utilizando imagens dos sensores MSS, TM e ETM+ da série *Landsat*, sendo os últimos os de maior longevidade.

O Projeto de Estimativa do Desflorestamento na Amazônia, realizado pelo INPE, até início nos anos 2000 funcionava de forma analógica e seus resultados eram vedados à sociedade. Porém, o governo brasileiro decidiu pela produção de resultados digitais e pela divulgação dos resultados do desmatamento anualmente, sendo que seus resultados são amplamente utilizados pelo governo Brasileiro, principalmente pelo instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos renováveis (IBAMA), para ações de prevenção e controle do desflorestamento (DUARTE *et al.*, 2003).

A metodologia do PRODES Digital baseia-se no modelo linear de mistura espectral e na classificação não supervisionada das imagens frações gerada por este modelo. Esse sistema possui limitações quanto à escala temporal, uma vez que seus resultados são disponibilizados anualmente. Além do PRODES o INPE também desenvolveu o projeto DETER.

O projeto de detecção do desmatamento em tempo real (DETER) foi desenvolvido com o objetivo de suprir a carência de dados sobre o desflorestamento em

um período inferior ao anual. Foi implantado em Março de 2004 e possui como principal característica o uso de sensores com alta resolução temporal. Sua concepção só foi possível pela disponibilidade de dados do sensor MODIS (CAMARA *et al*, 2002).

O sensor MODIS usa como plataforma, um satélite que cobre uma mesma área na superfície terrestre (resolução temporal) entre 01 a 02 dias. Porém, devido à inadequada resolução espacial do MODIS, que varia entre 250, 500 e 1000 metros para cada banda, para manter a consistência das metodologias do PRODES, o DETER utiliza imagens do MODIS com características espectrais semelhantes ao do sensor TM *Landsat*, com imagens obtidas nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo (resolução espacial 250 metros) e infravermelho médio (resolução de 500 metros reamostrada para 250 metros).

Optou-se neste trabalho pelo uso das séries anuais produzidas pelo PRODES, haja vista que os resultados possuem melhor resolução espacial além de sua série histórica ser mais concisa do que a do recém implantado DETER. A coleta de dados tem seu início no mês de Julho de cada ano uma vez que há forte correlação entre o período de estiagem na Amazônia e as atividades predatórias de desmatamento (CAMARA *et al*, 2002).

Os dados usados nesta investigação são um conjunto de diversas imagens em formato vetorial que agrupadas, totalizaram 10 cenas correspondentes à série histórica da área de estudo no período compreendido entre os anos de 2000 e 2009.

Os dados do PRODES estão disponíveis desagregados numa escala municipal, para a Amazônia, somente a partir do ano de 2000. Resumidamente, as etapas do PRODES são descritas da seguinte forma:

- O processo de interpretação ocorre através da obtenção, georreferenciamento e segmentação das classes temáticas (uso do solo, floresta, etc.), via o modelo linear de mistura espectral das imagens, um método de classificação não supervisionada;
- As imagens dos sensores LANDSAT TM 5 e CBERS 2 e CBERS 2B são as utilizadas no PRODES;

- Algumas áreas não podem ser analisadas devido à presença de nuvens;
- Desmatamento ocorre somente na estação de estiagem amazônica (não chuva), que contempla de Junho/Julho a Dezembro/Janeiro.

6.1.2 APLICATIVOS COMPUTACIONAIS

Dentre os diversos pacotes computacionais denominados Sistemas de Informação Geográfica disponíveis para manipulação de dados espaciais, o ARCGIS foi o que melhor se adequou às necessidades deste trabalho. Utilizou-se a versão 9.1, desenvolvida pela ESRI e disponibilizada pelo Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO/CT/UFC).

O ARCGIS foi utilizado na etapa de conversão das imagens, inicialmente em formato vetorial para o formato *raster* e também na etapa de numerização, que consistiu na atribuição de valores numéricos que descrevem a características biofísicas de cada célula - *pixel*, nas imagens *raster*.

Os dados numéricos correspondentes às variáveis biofísicas foram usados como entradas para simulação das mudanças espaciais através do aplicativo computacional denominado DINAMICA EGO 1.6.2, na versão 64 bits, desenvolvido pelo centro de sensoriamento remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O pacote computacional DINAMICA EGO possui como principal característica a capacidade de modelar eventos no espaço e tempo utilizando como ferramenta a técnica denominada Autômatos Celulares, que usa como entrada imagens oriundas de sensoriamento remoto, em formato *raster* (matricial).

Através dele um mapa inicial e outro com atributos biofísicos do terreno foram contrapostos a um mapa da paisagem final para posteriormente o aplicativo, através de diversos *functor's* (tradução livre: funções), realizar os cálculos inerentes ao comportamento do evento, o que possibilita a criação dos mapas de probabilidade de mudanças espaciais e de estimativas futuras do evento, como representado na Figura 15. SOARES FILHO *et al.*, (2001).

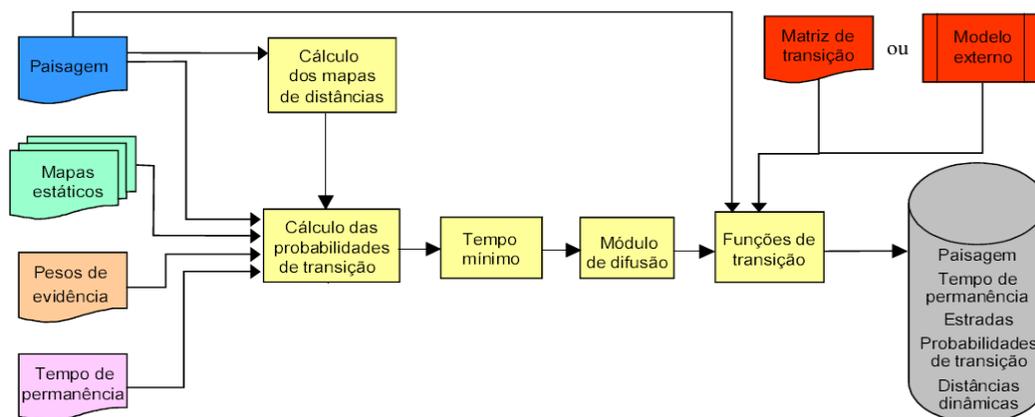


Figura 15: Fluxo da modelagem no software DINAMICA EGO.

6.2 MÉTODO

De posse de todos os dados e informações descritos no item anterior, pôde-se então, delinear e descrever a sequência de etapas, procedimentos e estratégias de processamento e restrições que foram adotadas no decorrer desta investigação.

A revisão bibliográfica e obtenção das variáveis (atividade 1) são etapas que antecedem a fase de preparação / adequação dos dados usados em ambiente SIG (atividade 2), que posteriormente serão utilizados na última etapa que consiste na modelagem propriamente dita.

As variáveis selecionadas para esta modelagem são classificadas como do tipo biofísicas estáticas, e biofísicas dinâmicas. A diferença entre ambas é que as primeiras não sofrem mudanças no espaço e tempo, diferente das últimas (dinâmicas) que têm sua localização modificada anualmente (2000 a 2009) e são objeto de modelagem.

São tidas como dinâmicas as variáveis floresta secundária (é identificada como dinâmica uma vez que sua localização varia no espaço tempo) e desmatamento. Todas as outras descritas na Tabela 7 são entendidas como estáticas - inclusive as florestas primárias, uma vez que não existe retorno de uma floresta desmatada à fase primária, mas sim para uma floresta tipo secundária, e as outras variáveis não sofrem mudanças no espaço/tempo durante o intervalo da modelagem.

Tabela 07: Descrição e caracterização das variáveis biofísicas estáticas usadas.

Variável	Descrição	Tipo
Desmatamento	Pode aumentar ou diminuir com o passar do tempo	Dinâmica
Floresta	Pode aumentar ou diminuir com o passar do tempo	Dinâmica
Floresta primária ombrófila sub Montana	Floresta com vegetação em estágio primário	Estática
Floresta primária ombrófila densa sub Montana	Floresta com vegetação em estágio primário	Estática
Floresta primária ombrófila	Floresta com vegetação pouco explorada	Estática
Floresta primária ombrófila	Região de floresta próxima ao rio Tocantins	Estática
Floresta primária de várzea	Área de floresta alagada sazonalmente, com vegetação rasteira	Estática
Argissolo vermelho	Tipo de solo	Estática
Argissolo vermelho amarelo	Tipo de solo	Estática
Latossolo amarelo	Tipo de solo	Estática
Gleissolo háplico	Tipo de solo	Estática
Latossolo vermelho amarelo	Tipo de solo	Estática
Rios	Qualquer recurso hídrico	Estática
Rodovia	Rodovia principal e vicinais	Estática

6.2.1 Manipulação dos dados em ambiente SIG:

O pré-processamento dos dados usados como entrada na modelagem ocorreu em ambiente SIG, mais especificamente no ARCGIS. Inicialmente cada arquivo foi convertido para o sistema de projeções cartográficas UTM, fuso 22 S, *Datum* SAD69.

Para cada ano produziu-se uma cena como resultado da união de diversas imagens vetoriais que foram convertidas para o formato *raster*.

Cada *pixel* da imagem recebeu atributos espaciais (coordenada plana) e característica biofísica (floresta, área desmatada, rios, rodovias, topologia e vegetação). Todas as rotinas descritas foram realizadas no ambiente ARCGIS, utilizando-se as extensões *Spatial Analyst* e *Arc Tool Box*. A Figura 16 é um fluxograma que apresenta uma visão macro das atividades executadas na preparação dos dados espaciais, onde adicionalmente é descrito de forma detalhada as rotinas seguidas no *software*.

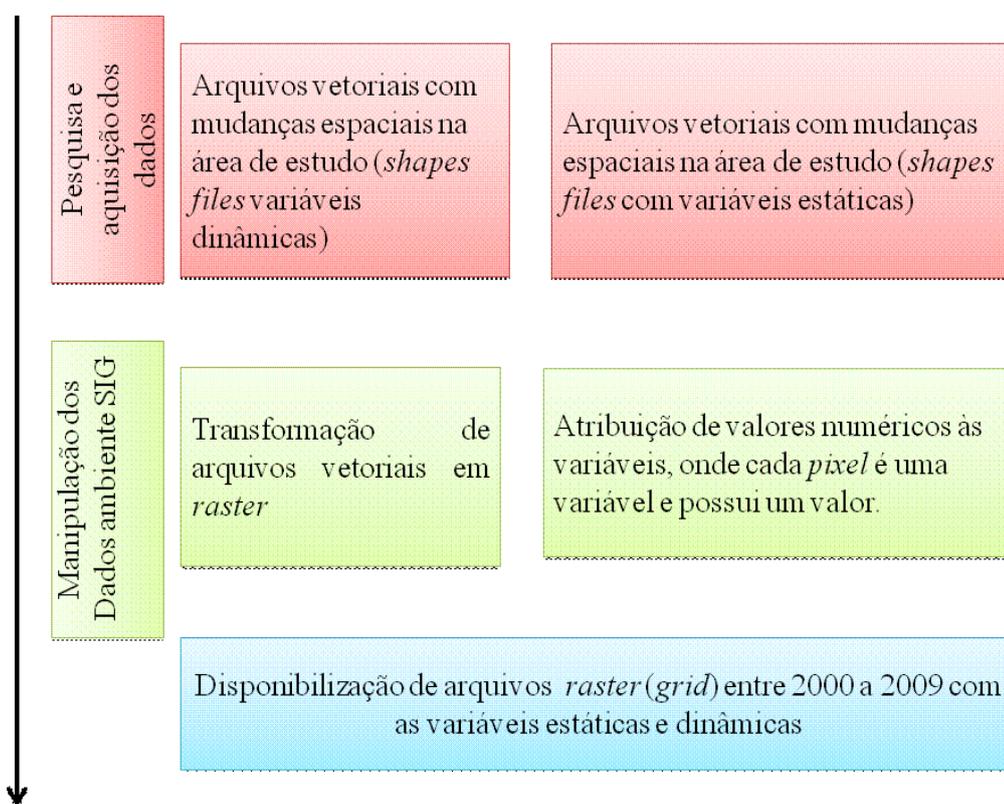


Figura 16: Fluxograma das atividades desenvolvidas.

6.2.1.1 Transformação de arquivos vetoriais em *raster*

AGUIAR (2006) afirma que uma resolução espacial fina, adequada para modelagens de uso / ocupação do solo, possui de 25 a 50 metros por célula.

Os arquivos vetoriais são compostos de polígonos e possuem como característica serem contínuos, fato esse que impede a modelagem aqui adotada. Portanto ocorreu a conversão para arquivos tipo *grid (raster)* que contem linhas e colunas, onde uma célula (ou *pixel*) x,y deste assumirá um estado numérico, dependendo de qual variável representar.

O processo foi realizado usando-se a opção *polygon to raster*, disponível na opção *arc tool box* no ARCGIS. A conversão considerou que um *pixel* do *raster* representará 107,98 m por 95,29 m do arquivo vetorial, e como um *pixel* deve possuir somente um estado, atribui-se que dentro as características que predominavam dentro da célula (opção *maximum_area*) . A Figura 17 descreve o processo em questão juntamente com a perda de informações espaciais que o processo resulta.

Como resultado a área de estudo possui 748 colunas e 818 linhas, onde cada célula possui a dimensão de 107,98 por 95,29 metros e representa 10.289 m² da área (ou 1,02 hectare), resultando num total de 292.297 células. Tal agrupamento tornou viável o processamento tendo em vista o não comprometimento das informações, uma vez que resoluções espaciais “mais finas” resultam em maior demanda computacional.

Área de 107,98x95,29 metros em um arquivo vetorial.

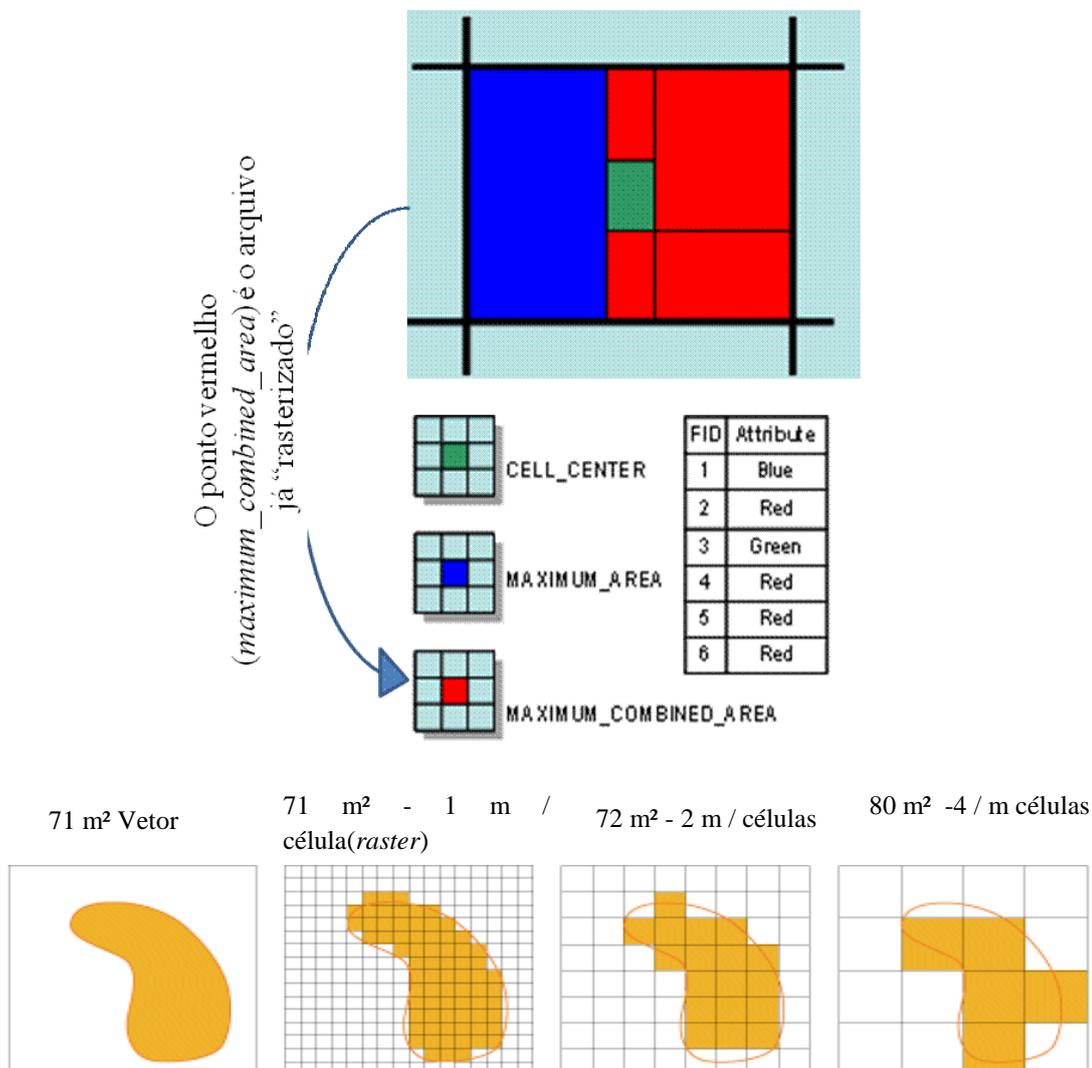


Figura 17: Processo de conversão

6.2.1.2 Atribuição de valores numéricos às variáveis:

Para que seja possível a modelagem cada *pixel* deve assumir um valor de acordo com seu estado. A Tabela 08 a descreve os valores que cada variável recebeu, onde a célula que possuir uma característica receberá um valor. Ex: O *pixel* que for área desmatada receberá o valor numérico 1. Os valores assumidos para cada variável foram escolhidos de forma aleatória.

Tabela 08: Atribuição de valores para as variáveis usadas na modelagem

Variável	Valor assumido
Desmatamento	1
Floresta	2
Floresta primária ombrófila sub Montana	5
Floresta primária ombrófila densa sub Montana	6
Floresta primária ombrófila	7
Floresta primária ombrófila	8
Floresta primária de várzea	9
Argissolo vermelho	10
Argissolo vermelho amarelo	11
Latossolo amarelo	12
Gleissoloháplico	13
Latossolo vermelho amarelo	14
Rios	15
Rodovia	16
Relevo	17

6.2.2 Modelagem usando AC's:

A usou-se a técnica denominada Autômatos Celulares para simulação de dados, nesse caso, para a geração de estimativas de mudanças espaciais no entorno de uma rodovia. Para a última etapa da modelagem, utilizou-se o aplicativo DINAMICA EGO, que possibilitou uma análise da evolução do desmatamento no período de tempo estudado (2000 a 2009), bem como a observação do comportamento do fenômeno perante as variáveis escolhidas, a geração de estimativa futura da ocorrência ou não do evento desmatamento, além da calibragem e validação do modelo.

Realizou-se uma análise do fenômeno de conversão de área de floresta para áreas desmatadas e vice versa ao redor da rodovia BR 422 e suas vicinais na área de estudo. Para tanto, utilizou-se o aplicativo para descrever os eventos de mudanças das células das imagens matriciais no formato *raster* da área estudada. O trabalho compreendeu a análise dos processos de conversões de células com a atribuição 2 (floresta) para células com atribuição 1 (desmatamento) e vice versa (variáveis dinâmicas). Para tanto, foram observadas essas conversões em decorrência da proximidade às variáveis estáticas. A modelagem propriamente dita é descrita de forma detalhada na Figura 18 que representa de forma resumida os procedimentos adotados nesta etapa.

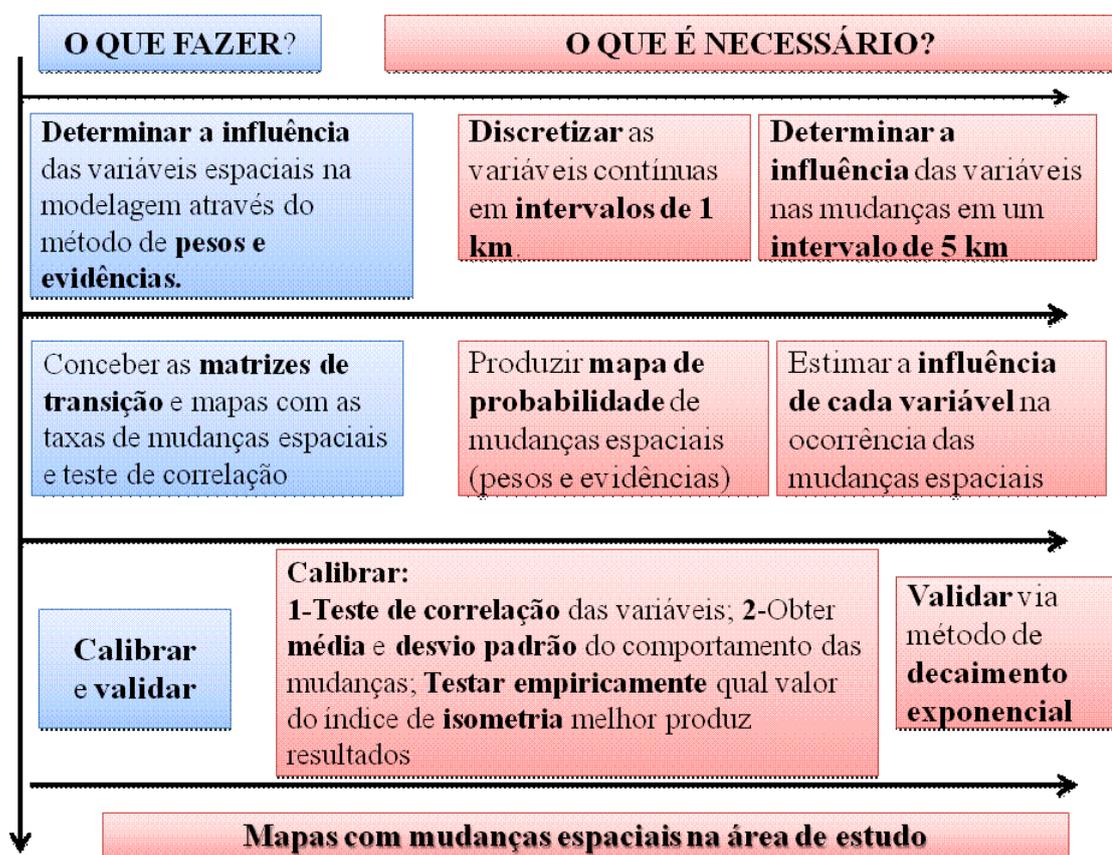


Figura 18: Fluxograma das atividades desenvolvidas na etapa de modelagem.

Adaptado de SOARES FILHO *et al.*, (2005).

As etapas realizadas no aplicativo DINAMICA consistem em:

- Criação de matrizes de transição onde são calculadas as taxas de mudanças baseadas nas mudanças por *pixel* calculado via tabulação cruzada;
- Cálculo das faixas de transição elaboradas para cada variável. Consiste no cálculo da influência de uma variável z , num espaço de coordenadas x,y usando-se o espaço euclidiano;
- Estabelecimento dos pesos de evidência: Através do método é estabelecido o peso W^+ (influência) das variáveis nas transições;
- Teste da dependência espacial: Seleção das variáveis via teste de correlação;
- Calibração do modelo inserindo dados como a média e variância, obtidos na análise do comportamento das mudanças entre os anos estudados. Buscou-se ainda, empiricamente, qual valor deve ser inserido como entrada no índice de isometria;
- Validação: Validar o modelo através do método de decaimento exponencial;
- Obtenção do horizonte temporal para criação de cenários: produção de cenários até 2020.

6.2.2.1 Criação de matrizes de transição

Para a realização desta etapa, o DINAMICA EGO possui a função *Determine transition Matrix*, onde como resultados, são descritas as taxas líquidas de mudanças baseadas nas mudanças por *pixel*, calculadas via tabulação cruzada.

6.2.2.2 Cálculo da influência das variáveis

- Discretização das variáveis contínuas em intervalos de 1 km: As variáveis relevo, rodovia, hidrologia, área desmatada e floresta são classificadas como discretas. Somente as variáveis vegetação e pedologia

sofreram processo de “discretização”. O processo consiste na criação de intervalos de 1 km em um espaço anteriormente contínuo, e que seu resultado é o “fatiamento” da área;

- Determinação da Influência das variáveis nas mudanças em um intervalo de 5 km: Para esta etapa é necessário o cálculo da influência via método de pesos e evidência.

6.2.2.3 Estabelecimento dos pesos de evidência

O método de pesos e evidências baseia-se no teorema da probabilidade bayesiana, fundamentada no Teorema de *Bayes* que determina a possibilidade de ocorrer um evento, dada a ocorrência prévia de uma evidência. A probabilidade bayesiana está relacionada a dois conceitos: a probabilidade a priori $P(D)$ e a probabilidade a posteriori $P(\bar{D}|B)$, (BOHAN-CARTER, 1994). Os pesos de evidências representam cada influência sobre uma variável na probabilidade espacial de transição $i \Rightarrow j$ e devem ser calculados conforme Equação 2.

Os valores obtidos pelo método permitem inferir a contribuição de cada uma das variáveis na ocorrência das transições. Valores positivos favorecem a ocorrência de um fenômeno enquanto valores negativos repelem o evento. Valores nulos não interferem.

$$O\{D|B\} = \frac{P\{D|B\}}{P\{\bar{D}|B\}} \quad \log\{D|B\} = \log\{D\} + W^+$$

Equação 2

Onde:

W^+ é o peso de evidência da ocorrência do evento D dado um padrão espacial B . A probabilidade a *posteriori* de uma transição $i \Rightarrow j$ dado um conjunto de dados espaciais (B, C, D, \dots, N) é expressa na Equação 3.

$$P\{i \rightarrow j(x, y) | B \cap C \cap D \dots \cap N\} = \frac{e^{\sum_N w^+}}{1 + e^{\sum_N w^+}}$$

Equação 3

Onde $P_{\{pixel\ floresta\ para\ pixel\ desmatado(x,y)\}}$ é a estimativa da ocorrência de uma transição floresta para desmatamento (e vice versa) dada a presença das variáveis $B,C,D...N$. W_{+n} é o peso de influência de uma variável N quanto à transição espacial

No processo de previsão das mudanças espaciais, o aplicativo utiliza para o método de formação de manchas um mecanismo de alocação denominado *patcher* que consiste em uma atividade de abertura de novas manchas de mudanças espaciais, isto é, uma célula P_{ij} onde i e j possuem o mesmo estado num tempo t , sofrem uma transição em um tempo $t+1$, ambas ou somente uma para um estado diferente do anterior.

Já para a os cartas de transição das manchas pré-existentes de uma determinada classe, o aplicativo utiliza a função *Expander*, que atua na expansão ou contração da superfície em questão. Essa transição P_{ij} se dá pela probabilidade de uma célula j possuir ao seu redor células do tipo i (Figura 19), dessa forma durante o processo de modelagem pode-se prever quais áreas continuarão sua trajetória de avanço em novas mudanças como as áreas que terão como trajetória a retração e até mesmo a aparição de novos estados em regiões com vizinhanças iguais (SOARES FILHO *et al.*, 2003).

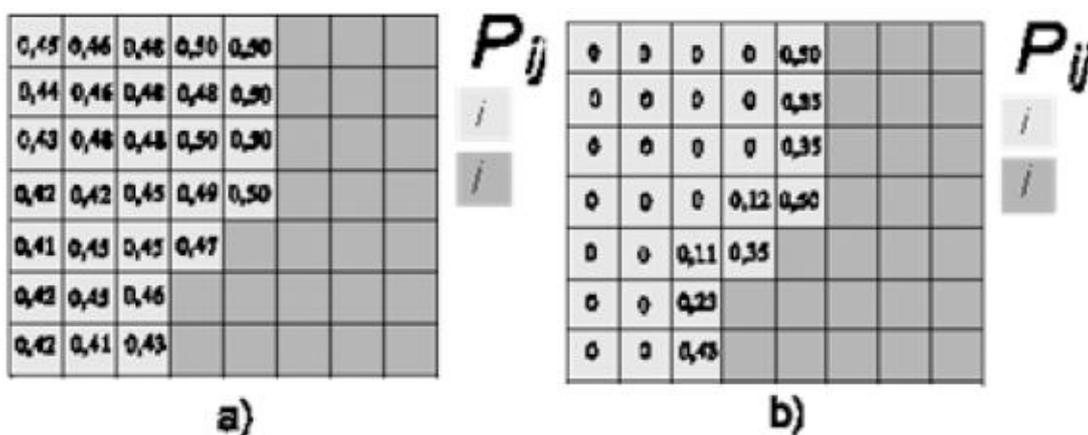


Figura 19: Mapas de transição.

Fonte: SOARES FILHO *et al.*,(2005).

6.2.2.4 Seleção das variáveis via teste de correlação

Para maior acurácia na modelagem foram selecionadas variáveis que em outros trabalhos forneceram resultados em estimativas de mudanças espaciais, e que podem ajudar a prever as mudanças espaciais na área de estudo. A análise estatística via método dos coeficientes de correlação é usada para dirimir o problema das variáveis redundantes com o mesmo poder de explicação. Essa fase no processo de modelagem consiste em uma das etapas de calibração do modelo.

No processo de modelagem usando o DINAMICA EGO é possível realizar o teste correlação das variáveis através dos testes de Cramer (V) e o *Joint Information Uncertainty* (incerteza da informação conjunta) (U), de modo que as variáveis ditas como tendo a mesma capacidade explicativa devem ser filtradas, podendo ser mescladas ou excluídas, permanecendo apenas uma com o mesmo poder explicativo.

Para este trabalho testou-se a correlação entre as variáveis escolhidas para a modelagem entre 2000 a 2009 usando o teste de Cramer, BONHAM-CARTER (1994), onde valores abaixo de 0.5 evidenciam a baixa correlação linear entre as variáveis (Equação 4).

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{T.M}}$$

Equação 4

Onde:

T são os totais marginais da matriz de tabulação cruzada entre dois mapas A e B;

X^2 é o coeficiente qui-quadrado;

M é o mínimo de (n-1, m-1), onde que n é igual ao número de linhas e m é o número de colunas da matriz de tabulação cruzada entre os mapas A e B.

6.2.2.5 Calibração do modelo:

A modelagem baseada em AC's é determinada pelos algoritmos *expander* e *patcher*. O primeiro modela a expansão/contração das manchas (neste caso desmatamento e áreas de floresta), enquanto o *Patcher* trata do surgimento de novas manchas em áreas anteriormente não alteradas. Para tanto, deve-se informar qual é a proporção da formação de novas manchas (*patcher*) e a proporção de manchas contíguas (*expander*) á áreas com mesmas características.

Para média e variância, obtiveram-se valores das manchas de áreas desmatadas e das áreas com floresta. Já o índice de isometria avalia a forma geométrica das manchas, variando de 0 (formas geométricas pontiagudas com grande perímetro) até 2 (formas geométricas redondas com perímetro reduzido) onde sua influência na modelagem fora testada de forma empírica, isto é, através de testes com valores indo de 0 a 2 para localizar qual valor no intervalo produziria melhores resultados, escolhendo-se o valores diferenciados para cada algoritmo (*patcher* e *expander*) e para cada tipo de transição (2→1 e vice versa). Usualmente seu cálculo se dá através da Equação 5:

$$Isometria = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}}$$

Equação 5

Onde A é a área do polígono e P é seu perímetro.

Quanto mais próximo de 1 for o valor do resultado, mais próximo de uma forma circular estará o polígono, e quanto mais próximo de 0, tem-se uma forma geométrica com cantos quadrados e mais alongado do que o primeiro caso.

Devido à heterogeneidade das manchas espaciais observadas na área de estudo optou-se testar heurísticamente (erro e acerto) quais os valores inseridos no indicador isometria produziram melhores resultados.

6.2.2.6 Validação via método de decaimento exponencial:

A validação é a avaliação dos resultados disponíveis por um modelo de

- A) Método de validação célula a célula (vizinhança 1 x 1);
- B) Método de validação 4 x 4;
- C) Método de validação 9 x 9;

O tipo de validação em janelas 1 x 1 somente considera como acerto situações onde uma célula $a_{1\ x,y}$ (modelado) possui o mesmo estado da célula $a_{1\ x,y}$ (real). Já uma validação em uma janela 11 x 11 significa que, se na imagem real uma célula dentre as 11 em uma janela for igual a qualquer célula na mesma janela 11 x 11 na imagem modelada, o modelo estará validado. A escolha dentre as diferentes resoluções para a validação devem ficar a critério do tipo de fenômeno analisado. Eventos de maior complexidade (como exemplo a modelagem urbana) onde várias transições ocorrem, uma resolução mais restritiva (1 x 1) deve ser considerada tendo-se em vista a gama de eventos analisados. Já em uma análise de fenômeno onde as mudanças são binárias (1 - 0, 0 - 1), a escolha por uma validação menos restritiva pode ser adotada.

$$Fw = \frac{\sum_{s=1}^{tw} \left[1 - \sum_{i=1}^p \frac{|a_{i1} - a_{i2}|}{2w^2} \right]_s}{tw}$$

Equação 5

Onde:

- Fw é o ajuste para a janela de tamanho $w \times w$;
- a_{i1} é o número de células pertencentes à classe i na cena 1 (imagem simulada) ;
- a_{i2} é o número de células pertencentes à classe i na cena 2 (imagem real) dentro da janela de amostragem;

- p refere-se ao número de diferentes classes encontradas na janela de amostragem;
- tw é o número total de janelas amostradas em uma cena para uma janela de tamanho $w \times w$.

No método similaridade *fuzzy*, a imagem inicial real é subtraída da imagem final simulado, para desta forma, identificar a diferença entre ambas. Nessa identificação considera-se como uma mesma área uma janela, onde esta (janela) pode possuir configurações entre 1x1, 3x3, 6x6... 11x11 *pixel's*.

Caso dentro dessa área (janela) houver um *pixel* com atributos idênticos ao da outra imagem, diz-se que as duas possuem características iguais. Se não houver, diz-se que as duas possuem características diferentes. No método similaridade *fuzzy* embora o *pixel* modelado não se encontre exatamente na mesma localização que o real numa resolução maior (3x3, 5x5...11x11) tal *pixel* poderá encontrar-se numa vizinhança próxima, tendendo desta forma, a validar a modelagem (SOARES FILHO *et al.*, 2005).

O uso de um índice de concordância por múltiplas resoluções para avaliação da qualidade de modelos dinâmicos justifica-se pela impossibilidade de se reproduzir situações passadas com total exatidão espacial devido à aleatoriedade inerente a alguns processos de transição das classes da paisagem, e seu valor (índice) tende a ser maior quanto maiores forem as janelas de amostragem (BENEDETTI, 2010).

Para duas cenas idênticas, um diagrama relacionando Fw e w irá fornecer uma linha reta. Mas se as cenas apresentam a mesma proporção de classes de uso do solo com diferentes padrões espaciais, esta linha irá gradualmente aumentando até que Fw alcance o valor 1. Quando isto acontecer, a janela de amostragem será idêntica à cena em análise. Entretanto, se existir um ajuste razoável de padrões espaciais, esta curva crescerá rapidamente de forma assintótica.

6.2.2.7 Geração das imagens com mudanças espaciais na área de estudo:

Após o término das etapas anteriores, juntamente com uma calibração/validação com índice de acerto superior a 50% de acerto, serão previstas as mudanças na área de estudo para os próximos 10 anos. O resultado será uma imagem com as alterações

(desmatamento – floresta e vice versa), considerando que não ocorrerá nenhuma mudança no comportamento das mudanças estudadas.

7. CAPÍTULO

APRESENTAÇÃO, ANÁLISE e DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão descritos os principais resultados obtidos na modelagem, tais como as taxas de conversão do uso do solo, seleção das variáveis, método de pesos e evidências, calibração, validação e modelagem dos eventos, além da discussão e comparação dos resultados com outros trabalhos.

7.1 DESCRIÇÃO DAS MUDANÇAS NA ÁREA DE ESTUDO

A análise dos eventos no intervalo de tempo proporcionou a descrição do comportamento das transições ocorridas ao passo anual na área de estudo.

7.1.1 Mudanças entre os anos de 2000 e 2001

Observaram-se, para o período, grandes conversões de áreas com floresta para áreas desmatadas a sudoeste da área de estudo, seguindo o contorno de uma vicinal anteriormente estabelecida. Há uma taxa de mudança líquida de 7,6% ao ano e uma mudança de células do estado 2 (floresta) para o estado 1 (desmatada) em praticamente uma região específica da área de estudo, conforme pode ser verificado na Figura 21 e Tabela 09.

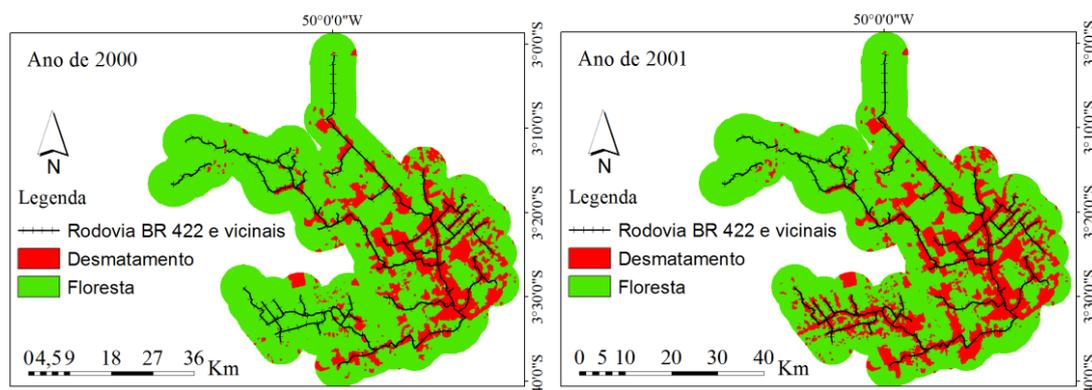


Figura 21: Mudanças espaciais entre 2000 a 2001.

Tabela 09: Taxas de mudanças espaciais entre 2000-2001.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição			Taxa líquida de desmatamento		
			1	2		1	2
1	54039	1		696	1		1,20 %
2	238172	2	18276		2	7,60 %	

Nesta modelagem testou-se a influência de cada variável na mudança do estado 2 (floresta) para o estado 1 (desmatado). As variáveis que mais determinam a ocorrência dos eventos para o intervalo de tempo e a sua área de abrangência estão na Tabela 10 e 11.

Tabela 10: Influência das variáveis na ocorrência do desmatamento.

Conversão Floresta para desmatamento	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influente até 500 metros
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Influente até 1 km. Após 4 km o desmatamento volta a ser relevante
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia
Relevo	Observado que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes entre 0 a 20 metros e áreas com altitude de 40 metros.

Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa de terras baixas (floresta primária) concentram maior parte do desmatamento
-----------	--

Tabela 11: Influência das variáveis na ocorrência da recuperação da floresta.

Conversão desmatamento → floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Não há influência significativa
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho e gleissolo háplico
Rodovia	Localiza-se recuperação do desmatamento a 2,4 e 5 km da rodovia.
Relevo	Recuperação ocorre em áreas com a altitude 0 e altitude 20m
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) aluvial e de terras baixas concentram maior parte da recuperação do desmate.

7.1.2 Mudanças entre os anos de 2001 e 2002

Praticamente não houve alteração no espaço uma vez que as taxas de transição registradas foram baixas e isso pode ser observado na Figura 22. A Tabela 12 descreve as taxas de conversão e as Tabelas 13 e 14, o comportamento do fenômeno perante as variáveis escolhidas para a modelagem.

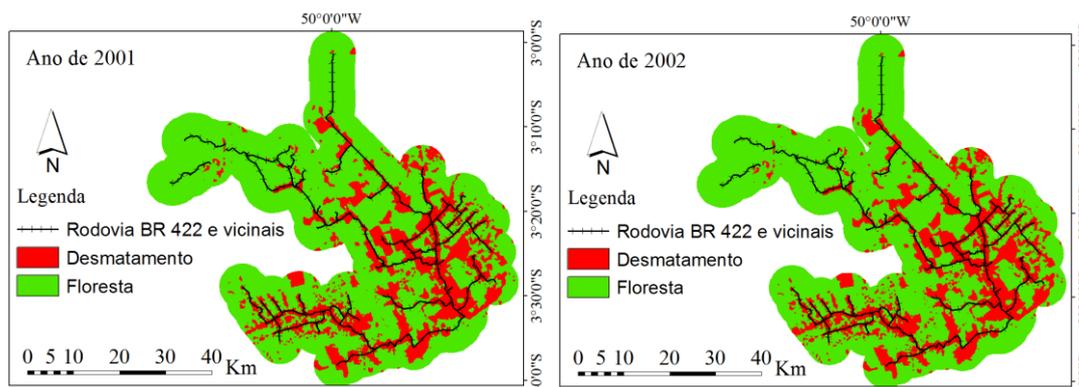


Figura 22: Mudanças espaciais entre 2001 a 2002.

Tabela 12: Taxas de mudanças espaciais entre 2001-2002.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1	2	Taxa líquida de mudanças	1	2
1	71638	1		2121	1		1,96%
2	220883	2	4327		2	2,96%	

Tabela 13: Influência das variáveis na ocorrência do desmatamento.

Conversão Floresta para desmatamento	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 250 metros
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Influente até 1 km; após entre 3 e 4 km o desmatamento volta a ser relevante
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho amarelo e latossolo vermelho amarelo

Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia
Relevo	Observado que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes entre 0 a 10 metros e áreas com altitude de 20 a 40 metros.
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram maior parte do desmatamento

Tabela 14: Influência das variáveis na ocorrência da recuperação da floresta.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Não há influência significativa
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho e gleissolo háplico
Rodovia	Localiza-se recuperação do desmatamento a 2,4 e 5 km da rodovia.
Relevo	Recuperação ocorre em áreas com a altitude 0 e altitude 20
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) aluvial e de terras baixas concentram maior parte da recuperação do desmate.

7.1.3 Mudanças entre os anos de 2002 e 2003

Nesse intervalo observou-se uma estabilização na taxa líquida de desmatamento e queda nas taxas de recuperação da floresta, fato esse descrito na Figura 23 e Tabela

15. A influência das variáveis nos processo floresta→desmatamento e desmatamento→floresta, pode ser observada nas Tabelas 16 e 17.

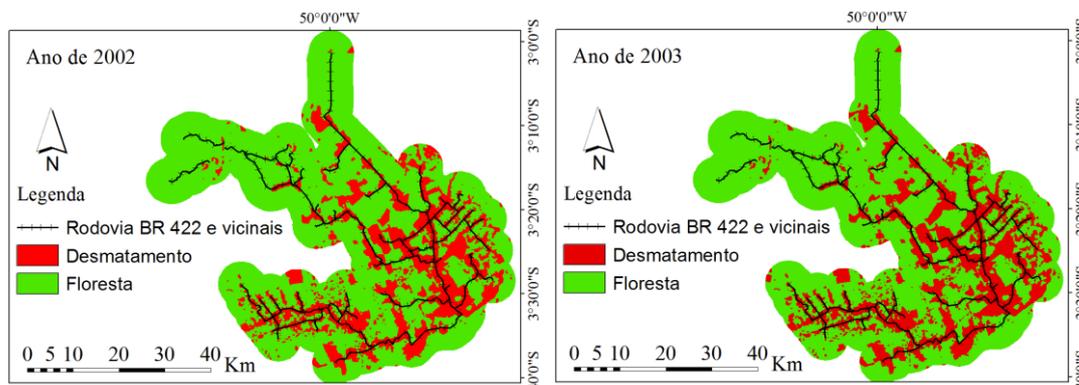


Figura 23: Evolução do desmatamento entre 2002 a 2003.

Tabela 15: Taxas de mudanças espaciais entre 2002-2003.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	Taxa líquida de mudanças	
			1	2
1	73911	1		0,10 %
2	219335	2	4643	2,12%

Tabela 16: Comportamento das variáveis perante a ocorrência do desmatamento.

Conversão Floresta para desmatamento			
Variável		Influência/ Distância	
Distância	para	áreas	Influência maior até 500 metros

desmatadas	
Distância para área de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Influente até 1 km; entre 3 e 4 km o desmatamento volta a ser relevante
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho amarelo e latossolo vermelho amarelo
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia
Relevo	Observado que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes entre 0 a 40 metros.
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram maior parte do desmatamento

Tabela 17: Influência das variáveis na ocorrência da recuperação da floresta.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Recuperação identificada a 4 km dos rios
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho amarelo
Rodovia	Não há influência significativa
Relevo	Não há influência significativa
Vegetação	Não há influência significativa

7.1.4 Mudanças entre os anos de 2003 e 2004

Observa-se a tendência dos intervalos anteriores, onde se verifica uma diminuição nas taxas líquidas de desmatamento e de nenhuma recuperação da área desmatada evidenciadas na Figura 24 e Tabela 18. A influência das variáveis estáticas na conversão para o desmatamento pode ser observada na Tabela 19.

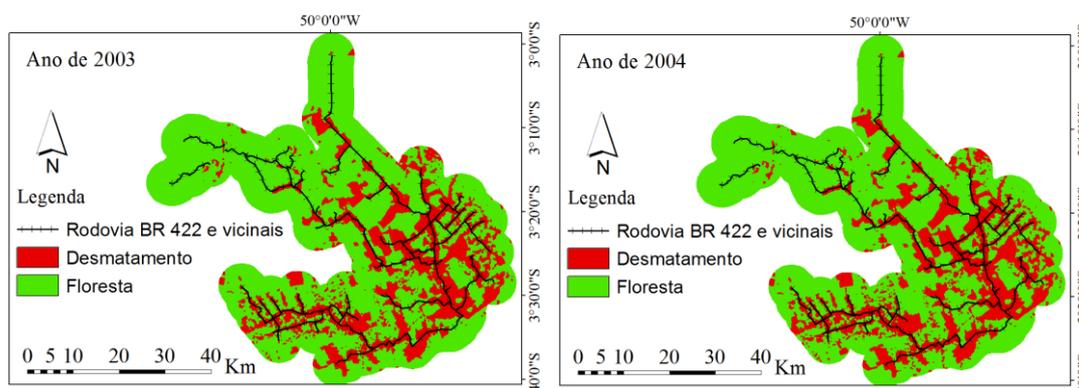


Figura 24: Evolução das mudanças espaciais entre 2003 a 2004.

Tabela 18: Taxas de mudanças espaciais entre 2003 e 2004.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1	2	Taxa líquida de mudanças	1	2
1	78484	1		--	1		--
2	214780	2	2927		2	1,36%	

Tabela 19: Comportamento das variáveis no intervalo observado.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância

Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 250 metros
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Desmatamento observado entre 2 e 3 km
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho amarelo
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia
Relevo	Observado que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes entre 0 a 20 metros e em área com altitude 40 metros
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram maior parte do desmatamento

7.1.5 Mudanças entre os anos de 2004 e 2005

Identificou-se para o intervalo de 2004 a 2005 uma diminuição da taxa de desmatamento para 0,84% em relação ao período anterior e uma recuperação da área desmatada. Visualmente tal fato é difícil de observar e somente com contagem das células o resultado é percebido. A Figura 25 e a Tabela 20 demonstram as mudanças espaciais ocorridas no intervalo 2004 a 2005. As Tabelas 21 e 22 expõem a abrangência das variáveis estáticas na ocorrência do fenômeno desmatamento → floresta e vice versa.

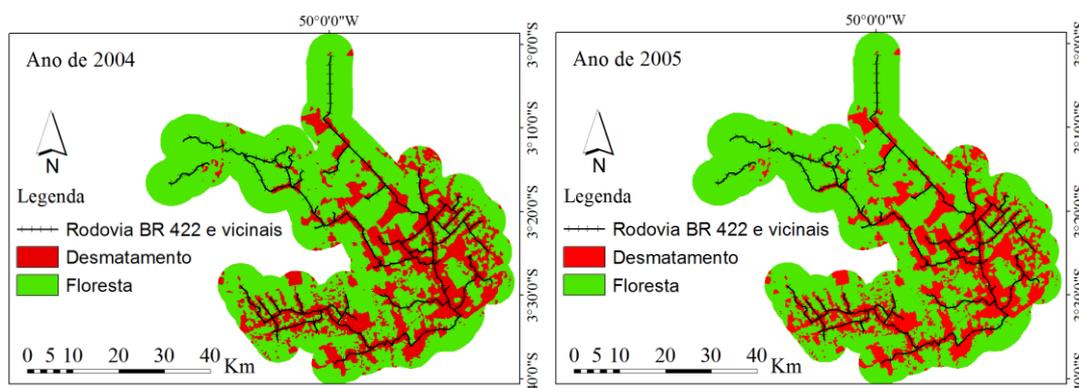


Figura 25: Evolução do desmatamento entre 2004 e 2005.

Tabela 20: Taxas de mudanças espaciais entre 2004 e 2005.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1	2	Taxa líquida de mudanças	1	2
1	81407	1		1252	1		1,54%
2	210564	2	1777		2	0,84%	

Tabela 21: Comportamento das variáveis no intervalo observado.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 500 metros
Distância para áreas com floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Desmatamento observado até 2 km de distância
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho amarelo
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia
Relevo	Observado que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes 10 metros e altitude 40 m
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram maior parte do desmatamento

Tabela 22: Comportamento das variáveis no intervalo observado.

Conversão floresta desmatamento	
Variável	Influência/ Distância

Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas com floresta	Recuperação observada até 250 metros
Hidrologia	Recuperação identificada a 3 km dos rios
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo argissolo vermelho amarelo e latossolo vermelho amarelo
Rodovia	Recuperação identificada até 1 km
Relevo	Recuperação identificada na altitude 20 m
Vegetação	Recuperação observada em florestas tipo ombrófila densa de terras baixas

7.1.6 Mudanças entre os anos de 2005 e 2006

Para o intervalo em questão a conversão de células de floresta para desmatamento aumenta e o processo de regeneração da floresta observado é nulo (Figura 26 e Tabela 23). A influência das variáveis é descrita nas Tabelas 24 e 25.

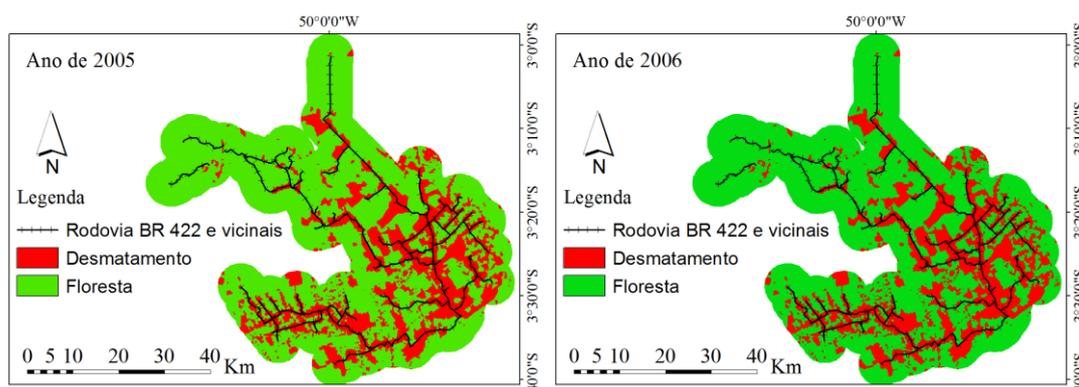


Figura 26: Evolução do desmatamento entre 2005 a 2006.

Tabela 23: Taxas de mudanças espaciais no período de 2005 a 2006.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1	2	Taxa líquida de mudanças	1	2
1	81932	1		-	1		-
2	210039	2	2556		2	1,22%	

Tabela 24: Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo de 2005 a 2006.

Conversão floresta desmatamento	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 250 metros
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Desmatamento observado até 1 km de distância e posteriormente a 4 km
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho amarelo
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia
Relevo	Observado que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes 0 a 40 m
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) e ombrófila concentram maior parte do desmatamento

Tabela 25: Comportamento das variáveis no período 2005-2006.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas com floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Não há influência significativa
Pedologia	Não há influência significativa
Rodovia	Não há influência significativa
Relevo	Não há influência significativa
Vegetação	Não há influência significativa

7.1.7 Mudanças entre anos de 2006 e 2007

Seguindo a mesma tendência observada nos dois intervalos anteriores, 2004-2005 e 2005-2006, a taxa de desmatamento permaneceu entre de 1% a 2% (Figura 27 e Tabela 26) e a taxa de recuperação de desmatamento para floresta manteve-se nula. A influência das variáveis estáticas está exposta nas Tabelas 27 e 28.

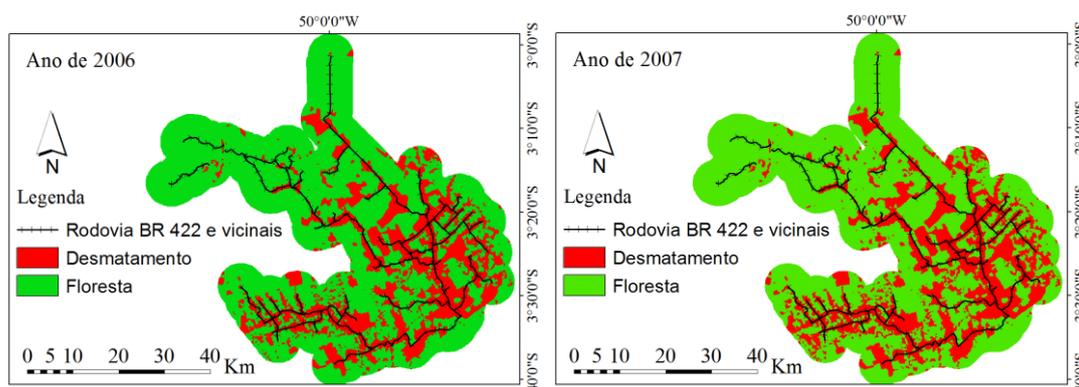


Figura 27: Evolução do desmatamento entre 2006 a 2007.

Tabela 26: Taxas de mudanças espaciais no período de 2006 a 2007

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1	2	Taxa líquida de mudanças	1	2
1	84522	1		-	1		-
2	208742	2	3076		2	1,47%	

Tabela 27: Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo 2006 a 2007.

Conversão floresta desmatamento	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 500 metros
Distância para áreas de floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Desmatamento observado a 4 km de Distância
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho amarelo
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia e posteriormente a 3 km de Distância
Relevo	Observa-se que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes 0 a altitude 20 m e altitude 40 m
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram todo do desmatamento

Tabela 28: Comportamento das variáveis no intervalo de 2006 a 2007.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa

1	87598	1		-	1		-
2	205666	2	1096		2	0,53%	

Tabela 30 - Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo de 2007 a 2008.

Conversão floresta desmatamento	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 250 metros.
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Hidrologia	Desmatamento observado a 1 km e a 4 km de Distância.
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho amarelo.
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia.
Relevo	Observa-se que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes 10 m a altitude 30 m.
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram todo o desmatamento

Tabela 31: Comportamento das variáveis no intervalo de 2007 a 2008.

Conversão Desmatamento Floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas com floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Não há influência significativa

Pedologia	Não há influência significativa
Rodovia	Não há influência significativa
Relevo	Não há influência significativa
Vegetação	Não há influência significativa

7.1.9 Mudanças entre os anos de 2008 e 2009

Na análise dos eventos observados nota-se um desvio no comportamento da ocorrência dos fenômenos espaciais, uma vez da ocorrência de grandes conversões desmatamento-floresta e floresta-desmatamento (Figura 29 e Tabela 32) quando em comparação com períodos anteriores. A influência das variáveis estáticas permaneceu da mesma forma dos anos anteriores (Tabelas 33 e 34).

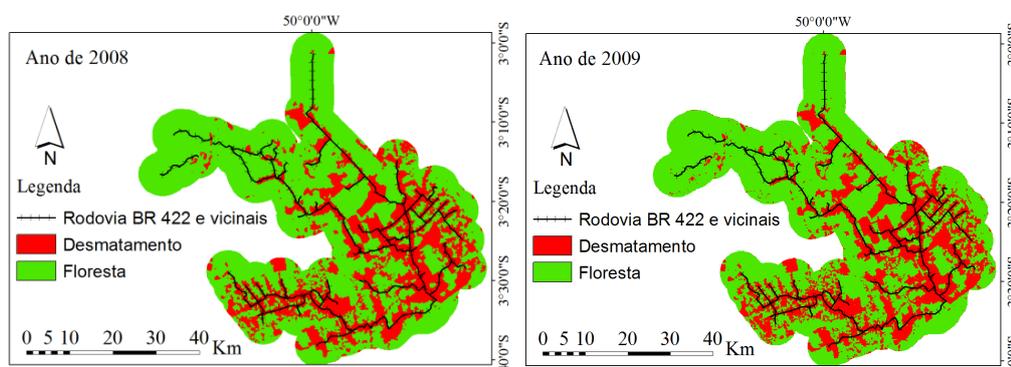


Figura 29: Evolução do desmatamento entre 2008 a 2009.

Tabela 32: Taxas de mudanças espaciais no período de 2008 a 2009

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1		2		Taxa líquida de mudanças	1		2	
1	88.694	1				5691	1				6,42%
2	204.566	2			12628		2			6,17%	

Tabela 33: Comportamento das variáveis sobre as mudanças espaciais no intervalo de 2008 a 2009.

Desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas de floresta	Sem influência
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 750 metros.
Hidrologia	Desmatamento observado me maior intensidade a 1, 3 e 4 km de distância.
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho amarelo.
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia.
Relevo	Observa-se que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes de 0 a 20 m e altitude 40 m.
Vegetação	Recuperação identificada em áreas com vegetação tipo ombrófila densa submontana e floresta de várzea

Tabela 34: Comportamento das variáveis sobre as mudanças espaciais entre os anos de 2008 a 2009.

Floresta desmatamento	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas de floresta	Recuperação identificada ate 250 m

Distância para áreas desmatadas	Sem influência
Hidrologia	Recuperação da vegetação até 1 Km de rios
Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho amarelo.
Rodovia	Recuperação da vegetação a 2 Km de rios
Relevo	Sem influência
Vegetação	Recuperação identificada em áreas com vegetação tipo ombrófila densa submontana e floresta de várzea

7.1.10 Mudanças entre os anos de 2000 e 2009

Neste item avalia-se o intervalo total de observação, de dez anos. Para este intervalo é explícita a acentuação do desmatamento na região sudoeste da área de estudo, onde se registrou a maior taxa de conversão floresta → desmatamento (7,6%) entre 2000 e 2001, para nos próximos anos (2002 a 2009) concentrar-se em áreas previamente desmatadas, consolidando assim o fenômeno de desmatamento com taxa média no período entre 2000 a 2009 de 5,02 % (4.725,57 Ha) ao ano (Figura 30, Tabelas 35 e 36).

A taxa de recuperação da floresta no intervalo de tempo possui média de 1,13 %, onde em 2009 nota-se uma recuperação maior da floresta. Em uma análise do conjunto de dados entre 2000 a 2009 nota-se que o ano de 2000 e o ano de 2009 possuem características de *outlier* (fora da curva), onde o primeiro ano da série (2000) apresenta valores elevados de desmatamento em comparação à série histórica. Já o ano de 2009, possui elevados valores de desmatamento e também de recuperação das áreas de floresta. O comportamento da influência das variáveis estáticas sobre as mudanças seguiu uma propensão, a qual se manteve constante durante os anos 2000-2009.

A ocorrência se deu em áreas de solo do tipo argiloso e de floresta ombrófila e próximas a rios e rodovias. Observa-se ainda que em relação ao relevo do terreno, as mudanças foram observadas em áreas de altitude 0 a 40m. As Tabelas 36 a 39

descrevem o comportamento das variáveis no período de 2000 a 2009.

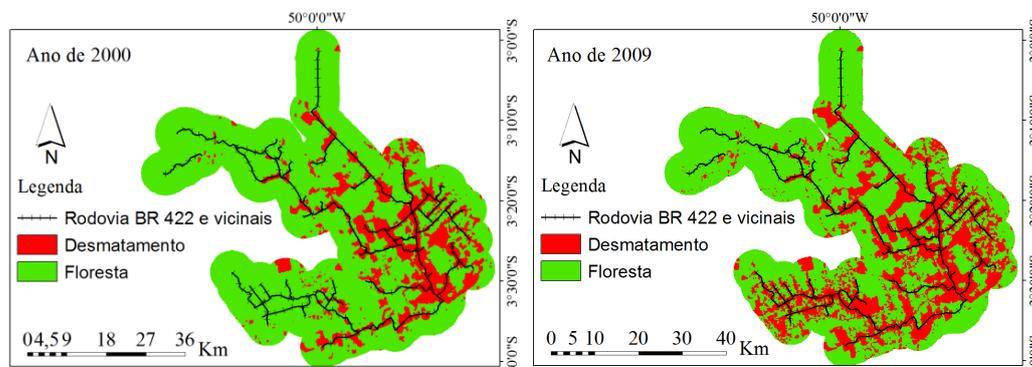


Figura 30: Evolução do desmatamento entre os anos de 2000 a 2009.

Tabela 35: Taxas de mudanças espaciais entre os anos de 2000 a 2009.

Células por categoria	Quantidade	Células por transição	1	2	Taxa líquida de mudanças	1	2	Média (2000 a 2008)
1	54033	1		1442	1		2,67%	0,69%
2	238138	2	35975		2	15,11%		2,41%

Tabela 36: Demonstrativo do comportamento das variáveis no intervalo de 2000 a 2009.

Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Influência maior até 750 metros.
Distância para áreas de florestas	Não há influência significativa
Hidrologia	Desmatamento observado me maior intensidade a 1, 2 e 4 km de distância.

Pedologia	Maior ocorrência de desmatamento em regiões com tipo Argissolo vermelho amarelo.
Rodovia	Observa-se maior taxa de conversão em áreas até 1 km da rodovia.
Relevo	Observa-se que o desmatamento é predominante em áreas com altitudes de 0 a 20m e altitude 40m.
Vegetação	Áreas com vegetação tipo ombrófila densa (floresta primária) concentram maior parte do desmatamento

Tabela 37: Comportamento das variáveis no intervalo de 2000 a 2009.

Conversão desmatamento floresta	
Variável	Influência/ Distância
Distância para áreas desmatadas	Não há influência significativa
Distância para áreas com floresta	Não há influência significativa
Hidrologia	Não há influência significativa
Pedologia	Recuperação da floresta identificada em áreas de solo argissolo vermelho amarelo e gleissolo háplico
Rodovia	Identificada a 2, 4 e 5 km da rodovia.
Relevo	Identificada recuperação nas altitudes 0 a 20m
Vegetação	Identificada recuperação em florestas tipo ombrófila densa aluvial e de terras baixas.

Tabela 38: Taxas líquidas de mudanças espaciais de 2000 a 2009.

Condição	Média	Variância
Floresta -Desmatamento	4,00%	5,02%

Desmatado- floresta	0,93%	1,13%
---------------------	-------	-------

Tabela 39: Descrição das mudanças espaciais ocorridas entre 2000 a 2009.

Unidade	Média de desmatamento	Variância	Incremento anual	Área total desmatada em 2008
ha	4.413,88	5.650,17	35.311,01	90.972,83

Observa-se no gráfico (Figura 31) a evolução dos eventos desmatamento e recuperação de floresta entre os anos de 2000 a 2009, em hectares. Inicialmente, o comportamento dos eventos é díspar, e estatisticamente o desmatamento observado no intervalo 2000 a 2001, pode ser considerado um *outlier*, isto é, uma observação relevantemente distante dos valores da média da amostra, de forma que a opção pela a sua inserção pode vir a prejudicar os resultados do modelo.

Como a modelagem em questão possui dados de uma extensão temporal com apenas 9 observações, a exclusão de uma observação reduziria o poder explicativo da amostra, porém, em vista da presença de um *outlier*, que pode afetar o resultado final do modelo gerado, será testado o índice de acerto com e sem o uso da observação referente ao ano de 2001.

Uma análise dos motivos que levaram ao grande desmatamento observado no ano de 2001, a posterior queda, e a oscilação entre subidas e decidas até uma expressiva alta no ano de 2009, demonstram que a explicação do comportamento de um fenômeno deve ser abrangente, considerando todas as variáveis envolvidas, assim como o peso de cada uma (variável) na ocorrência do fenômeno.

Possíveis fatores socioeconômicos, como a demanda por madeira, as constantes invasões de terras com considerado estoque de madeiras comerciais, a necessidade de aberturas de novas áreas de pastagem/agricultura, juntamente com a ausência do poder de polícia por parte do estado e a não aplicação da legislação ambiental, dentre outros fatores, podem ter tornado possível um elevado desmatamento, já que em 2002,

possivelmente em face ao alarde causado pelo desmatamento extremo em 2001, observa-se uma expressiva queda nas novas áreas desmatadas naquele ano.

Após 2003- onde nota-se um aumento menor das áreas desmatadas, os anos de 2004 até 2006 representaram um período de estagnação das taxas de desmatamento, (época de criação de uma unidade de conservação nas proximidades da área de estudo), para em 2007 ocorrer outro aumento das áreas desmatadas. O ano de 2008 representou uma queda nas taxas anuais de desmatamento, porém 2009 descreve uma brusca elevação nas taxas perda de floresta, indo de encontro a crescente pressão por parte do poder publico nas atividades de fiscalização.

Já o processo de recuperação da floresta permanece sem grandes oscilações até o ano de 2009, onde sua alta reflete as políticas publicas de recuperação de áreas degradadas. Analisando o comportamento dos eventos desmatamento e recuperação da floresta, fica evidente a importância e o poder de explicação das variáveis socioeconômicas, pois não foram observadas quaisquer alterações nos valores das variáveis biofísicas que pudessem explicar as oscilações observadas, porém não há como mensurar quantitativamente, nesta modelagem, o peso e como cada classe de variável (biofísica e socioeconômica) influencia no resultado final do modelo proposto.

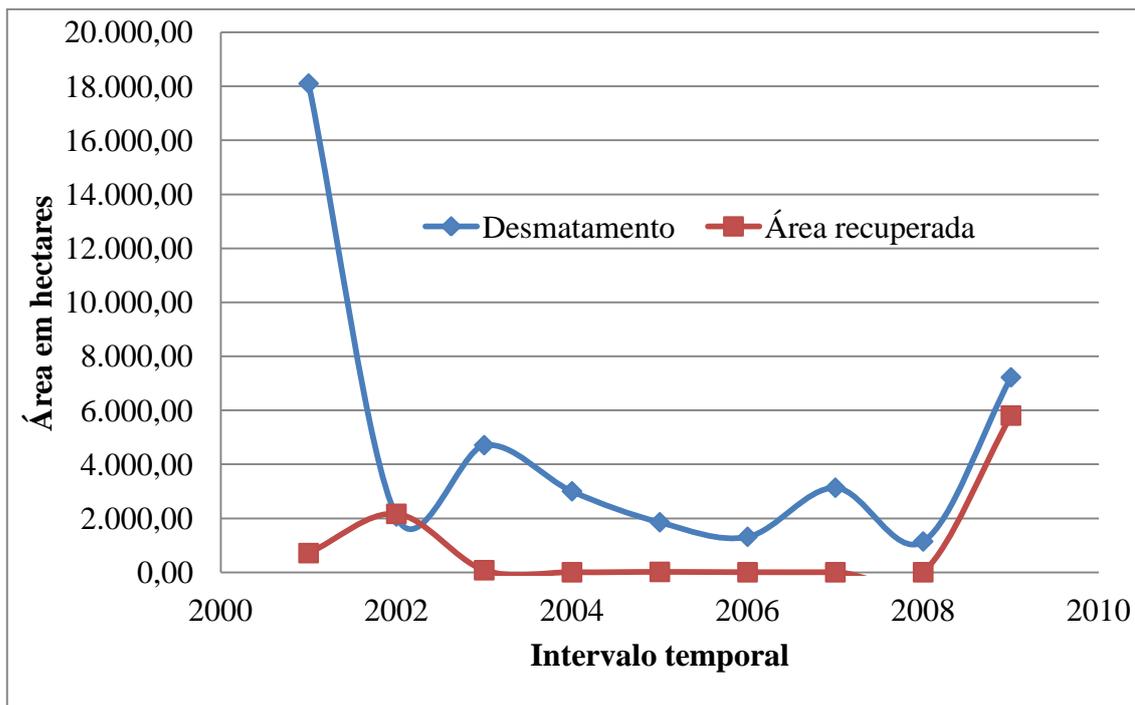


Figura 31: Evolução mudanças espaciais reais entre 2000 e 2009.

7.2 TESTE DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL VIA SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS

Verificou-se a correlação das variáveis em cada intervalo de tempo (2000-2001..... 2008-2009). O teste realizado com auxílio do DINAMICA EGO se propôs à analisar as variáveis estáticas usadas na modelagem, identificando forte correlação entre si. Embora não haja concordância a respeito de qual limiar deve ser usado como exclusão, adotou-se a indicação de SOARES FILHO (2003), que usa como linha de corte as variáveis com coeficiente de correlação até 0.5 no teste CRAMER. Valores superiores a 0.5 no teste CRAMER indicam forte evidência de correlação linear, fato esse que enseja a exclusão de uma das variáveis.

O resultado para o teste realizado não localizou valores de correlação das variáveis entre si superior a 0.5, o que enseja a permanência de todas variáveis, de modo que todas as variáveis estáticas possuem poder de explicação igual em todos os anos, isto é, os valores de correlação foram os mesmos para o intervalo de tempo da modelagem, de onde se conclui que as variáveis tiveram um comportamento similar no

período estudado.

7.3 A MODELAGEM

Utilizou-se o software DINAMICA EGO para gerar um modelo que considere todas as mudanças espaciais ocorridas no período de estudo. A Figura 32 descreve o procedimento do método de pesos e evidências (BOHAN-CARTER, 1994) com uma imagem com as regiões de maiores probabilidades para mudanças espaciais.

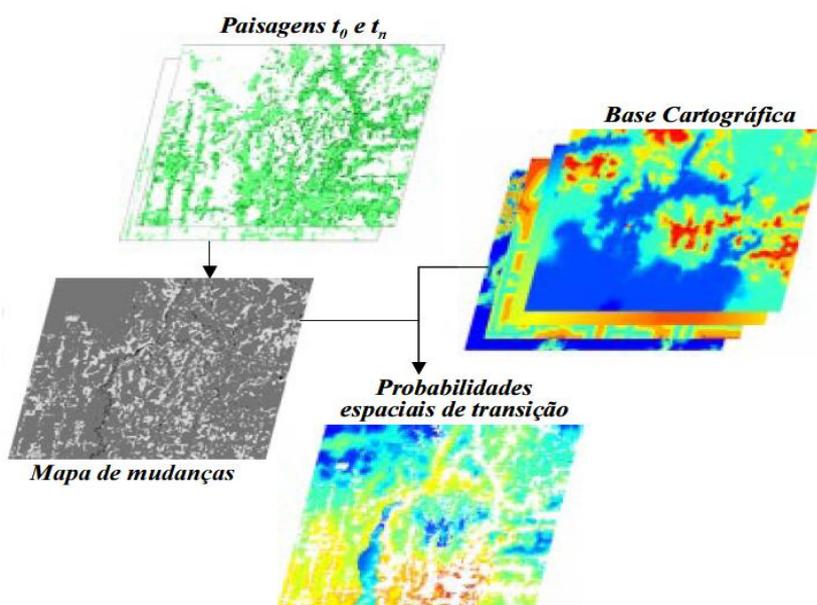


Figura 32: Produção de mapas de probabilidades de transição.

Fonte: SOARES FILHO *et al.*, (2005).

No modelo proposto foi considerado a influência das tendências de mudanças espaciais tanto da conversão de floresta para áreas de não floresta, como áreas desmatadas para áreas de vegetação, tendo como resultado as cartas de probabilidade que expõem a provável localização do acontecimento, via método de pesos e evidências, explicitando as áreas com maior tendência a mudanças tipo desmatamento (Figura 33), quanto à recuperação de florestas (Figura 34).

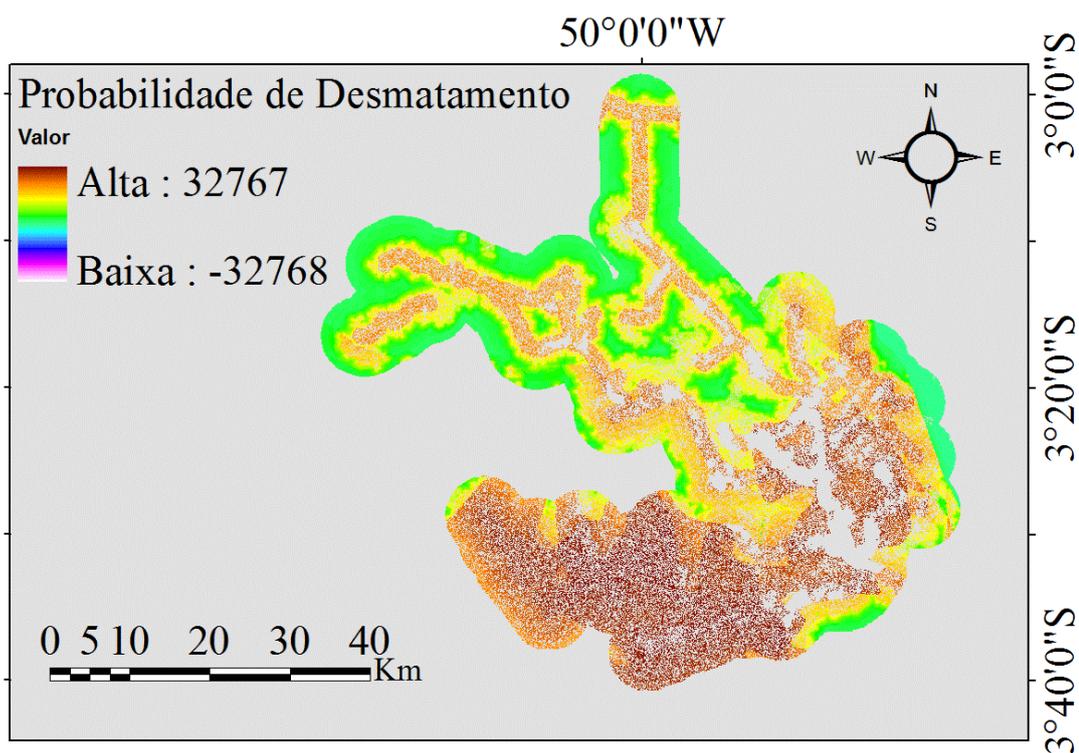


Figura 33: Probabilidade de desmatamento.

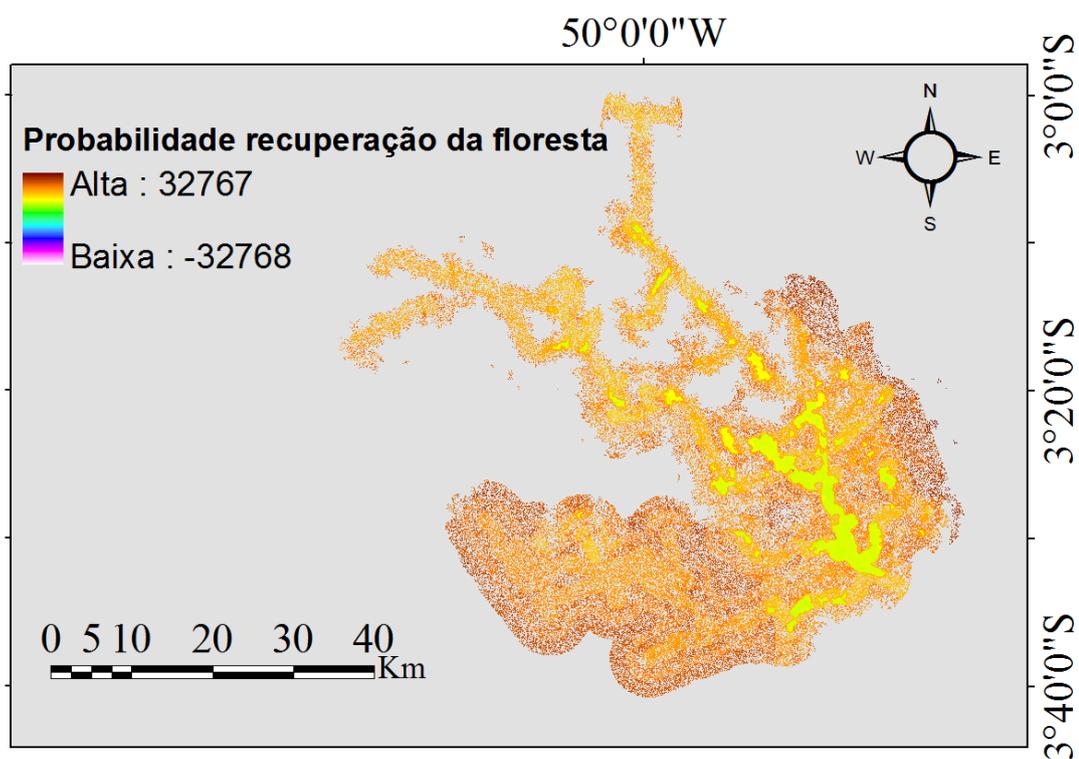


Figura 34: Probabilidade de recuperação da floresta.

7.4 DADOS DE ENTRADA PARA MODELAGEM

A obtenção dos dados utilizados como entrada na modelagem consistiu na análise da distribuição das manchas espaciais referente às transições desmatamento→floresta e floresta→desmatamento. Desta forma, buscou-se abstrair das imagens entre os anos de 2000 a 2009 (e 2001 a 2009), indicadores como média, variância e isometria do tamanho das manchas.

O uso da extensão *spatial analyst* do ARCGIS permitiu identificar um desmatamento médio entre o intervalo de 2000 a 2009 com 4.725,57 ha, e entre 2001 a 2009 de 3053,67 ha, distribuídos no espaço com 70 % das ocorrências em áreas anteriormente desmatadas (função *expander*) e o restante (30%), em áreas de não floresta (*patcher*) para ambos os intervalos.

A recuperação da floresta ocorreu com média anual entre 2000 a 2009 de 1417,67 ha e entre 2001 a 2009 com 1006,97 ha, sendo sua evolução espacial concentrada com 50% das observações em áreas de vizinhança previamente desmatadas e o restante em áreas com vizinhança de floresta. A Tabela 40 expõe as informações sobre o tamanho médio e variância do comportamento das mudanças espaciais observadas entre 2000 a 2009 e entre 2001 a 2009, além do índice de isometria utilizado neste trabalho.

Tabela 40: Parâmetros obtidos para os algoritmos *expander* e *patcher*.

	<i>Expander</i>			<i>Patcher</i>		
2000 -2009						
	Média	Variância	Isometria	Média	Variância	Isometria
Desmatamento	3.307,90	3.955	0,9	1.417	1.695	1
Recuperação floresta	487,20	553,93	1,2	487,20	553,93	1

2001 -2009						
	Média	Variância	Isometria	Média	Variância	Isometria
Desmatamento	2.137,57	1.855,11	0,9	916,10	795,05	1
Recuperação floresta	503,48	103,93	1,2	503,48	103,93	1

Observa-se na Figura 35 o desmatamento que efetivamente ocorreu na área de estudo até o ano de 2009, e na Figura 36 o desmatamento previsto para o ano de 2009 usando valores referentes ao intervalo 2000 a 2009. Na Figura 37 encontra-se o desmatamento previsto quando usado os valores referentes ao intervalo 2001 a 2009, onde se excluiu o ano de 2000 por considerá-lo um *outlier*.

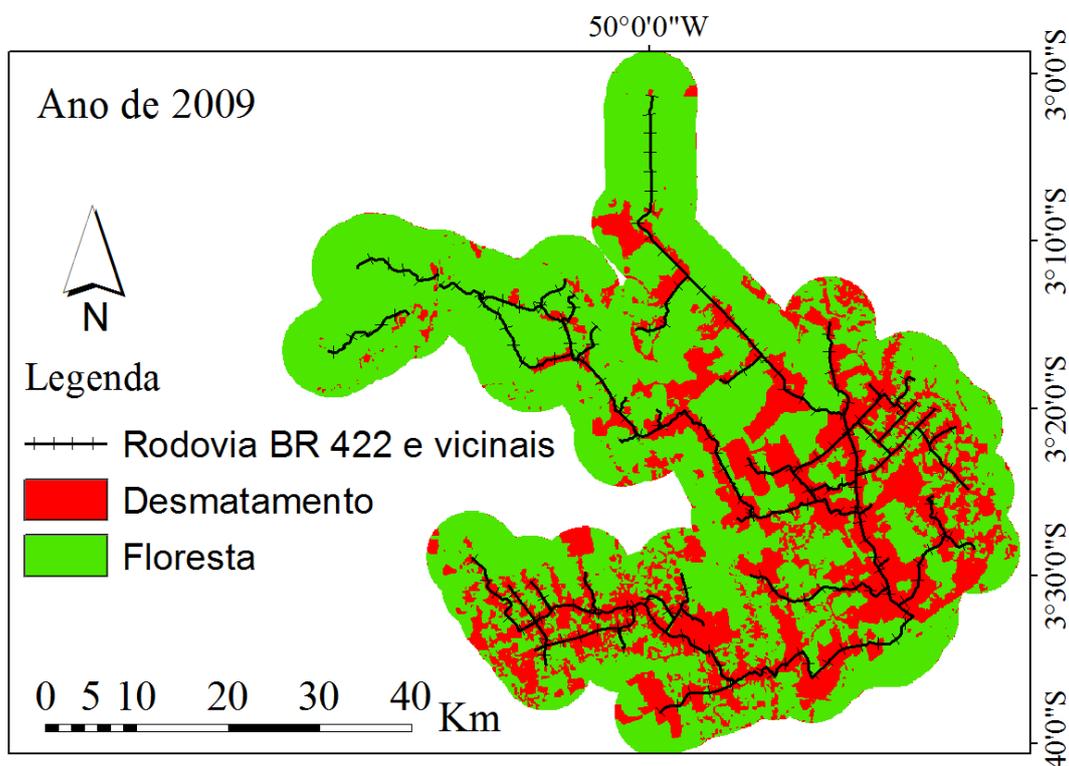


Figura 35: Desmatamento efetivamente ocorrido no em 2009.

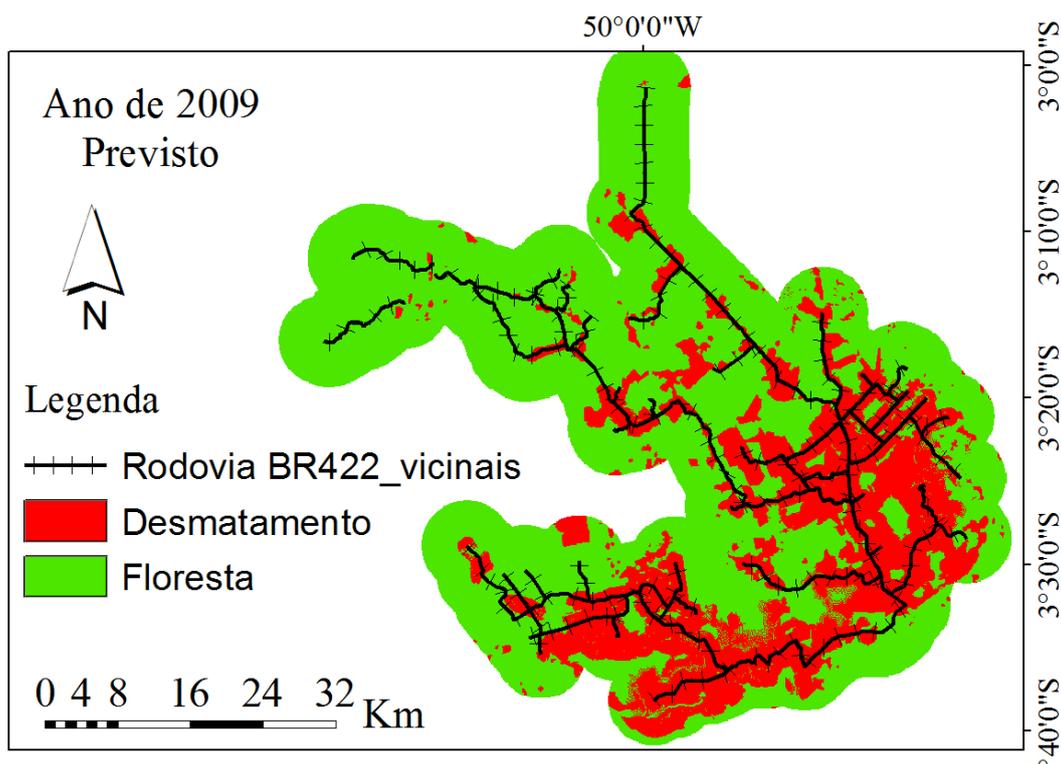


Figura 36: Desmatamento previsto para o ano de 2009 (Dados referente a 2000 - 2009)

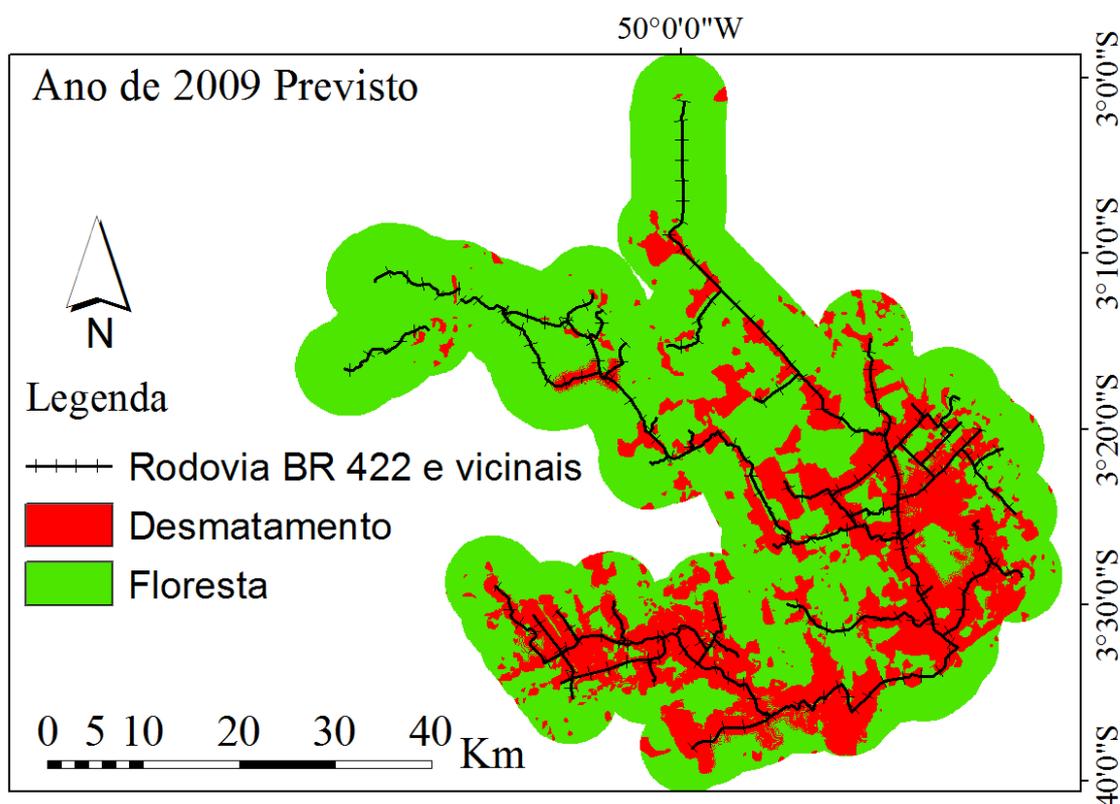


Figura 37: Mudanças previstas para 2009 (Dados referentes a 2001 a 2009)

7.5 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Após a concepção das imagens com as mudanças para 2009 usando tanto uma amostra com todas as observações adquiridas (2000-2009) quanto com a exclusão de 2001, observado como *outlier*, uma observação visual (validação qualitativa) levar a crer que a exclusão de 2001 favoreceu um resultado com maior acerto, porém, a Tabela 41 expõe os dados da validação quantitativa, onde é evidente que a não exclusão da observação torna o resultado com acerto maior, de forma que optou-se por manter a amostra com todas as observações.

Numa comparação *pixel a pixel*, isto é, janela 1 x 1, a margem de acerto obtida para o intervalo 2000 a 2009 foi de 46%. Já em uma janela 11 x 11, (onde se busca um *pixel* com coordenadas e estado iguais na imagem real e na imagem modelada), o acerto atingiu 91%, aproximando-se ao valor “ótimo” (1) = (100%) de acerto.

Tabela 41: Resultado do processo de validação.

2000 a 2009	
Quantidade de <i>pixel's</i> por janela	Acerto
1	46%
3	56%
5	69%
7	79%
9	86%
11	91%
2001 a 2009	
Quantidade de <i>pixel's</i> por janela	Acerto
1	22%
3	44%
5	65%

7	79%
9	87%
11	93%

Modelagem para o ano de 2020.

Estimou-se ainda as mudanças para o ano de 2020 com base na continuidade dos eventos, isto é, para a previsão em questão considerou-se que não ocorrerão alterações no comportamento das variáveis analisadas até 2020, permanecendo do jeito que está. A Figura 38 descreve as mudanças estimadas e a figura 39 e 40 expõem a evolução entre os anos de 2000 a 2020 das mudanças.

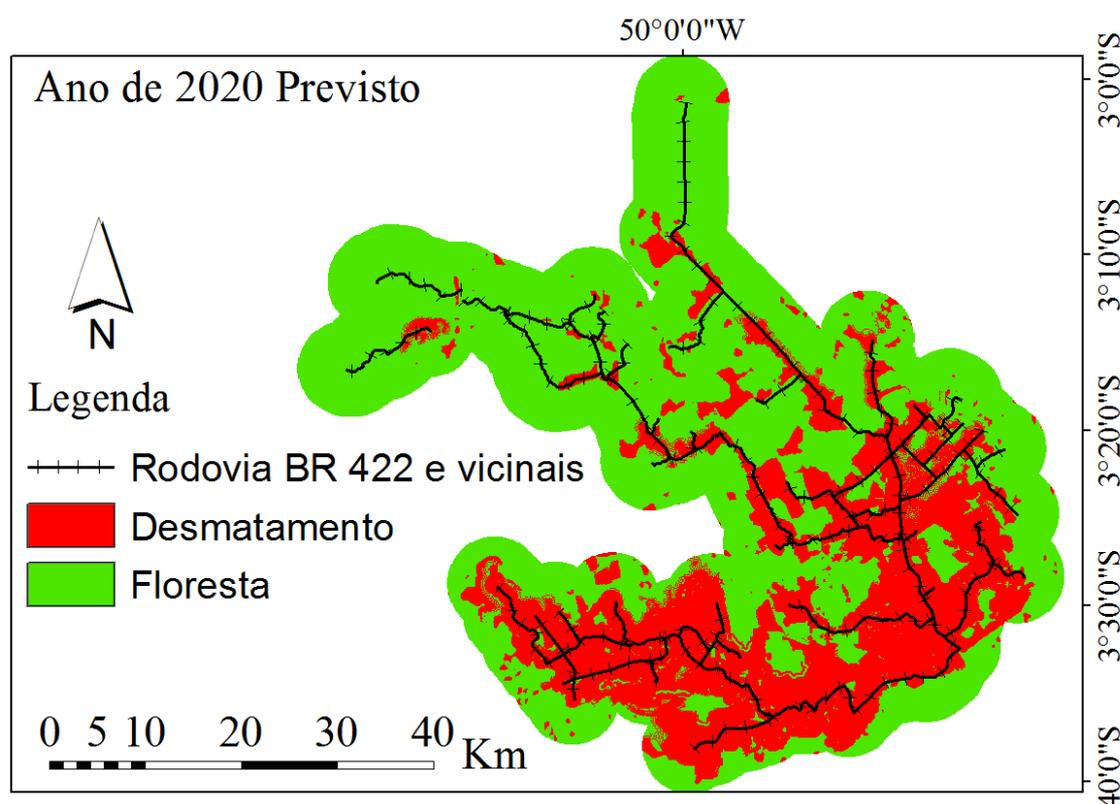


Figura 38: Mudanças estimadas para 2020.

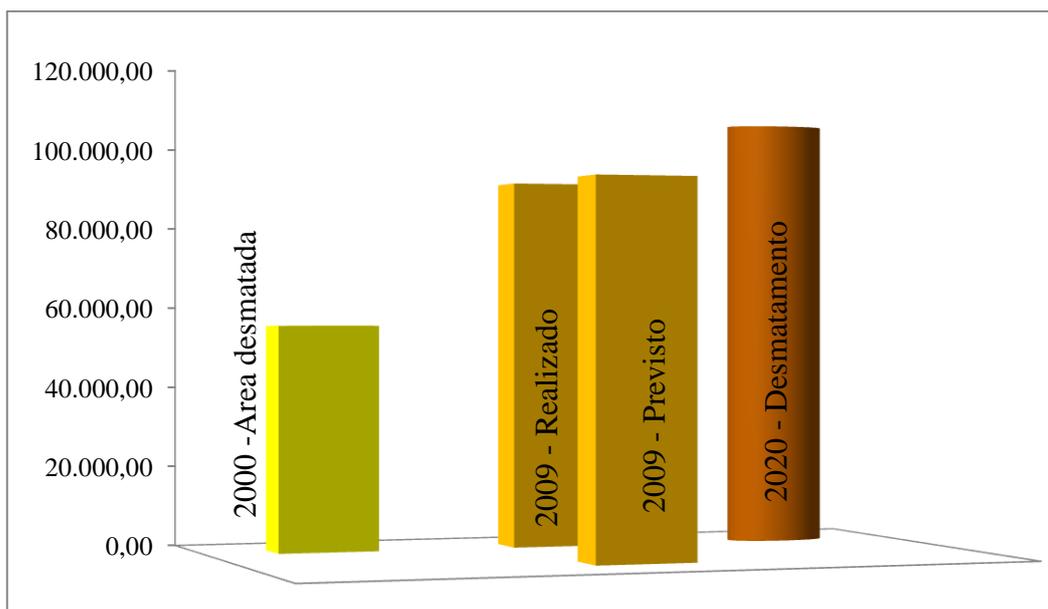


Figura 39: Desmatamento realizado (00-09) e efetivado (2020)

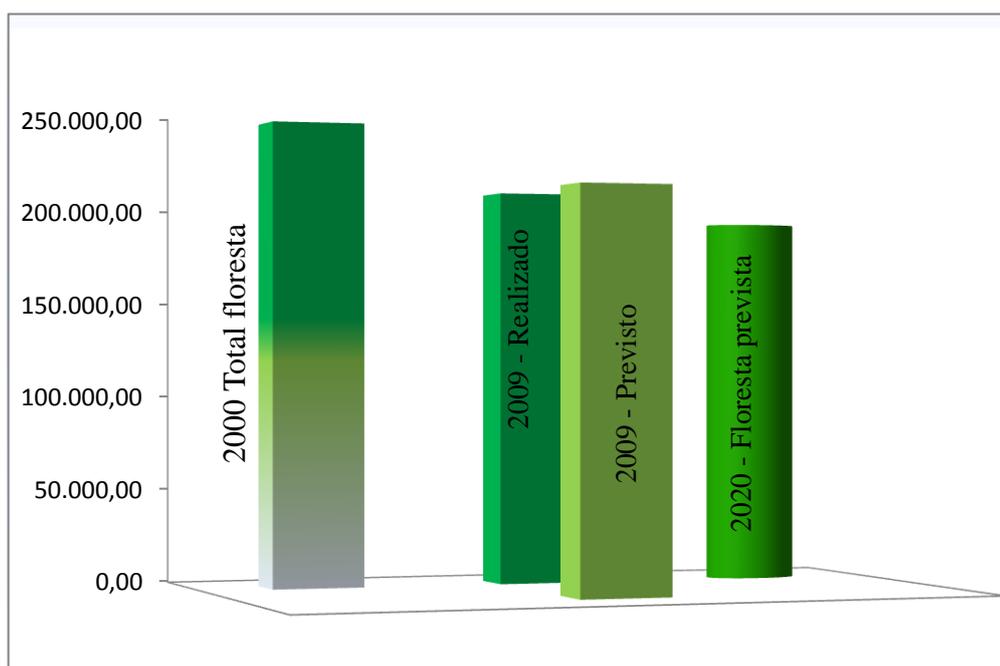


Figura 40 : Quantidade de floresta (00-09) e floresta prevista (2020)

7.6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DIFERENTES MODELOS BASEADOS EM AUTÔMATOS CELULARES

O processo de seleção das variáveis é uma das etapas cruciais de qualquer modelagem, uma vez que facilita a compreensão do fenômeno estudado, resultando em uma maior exatidão no esboço das mudanças espaciais. Os modelos empregados na antevisão das alterações do uso do solo baseados em Autômatos celulares possuem as premissas de que: a) O espaço deve ser composto por uma grade de células; b) Tal sistema deve ser discreto no espaço e tempo; c) Células vizinhas influenciam umas as outras; d) regras de transição – mudanças de estados, que possam ser aplicadas em toda a estrutura de grades. BATTY *et al* (1997).

DAMIÃO (2007) desenvolveu o modelo AMAZON PD no qual aplica a técnica de regressão logística adaptada para ambiente SIG, estipulando que o estado de cada *pixel* de uma matriz no formato *raster* é previsto em decorrência da influência das variáveis biofísicas. O autor utiliza amostras coletadas em diferentes períodos (1985, 1988, 1992, 1996, 2000 e 2004) da área de estudo de modo que o modelo possa apreender o comportamento da variável desmatamento para anos subsequentes. O autor encontrou dificuldades para correlacionar algumas variáveis (ex: Rodovias) ao evento desmatamento, devido ao fato do trabalho dispor de uma amostragem considerando um intervalo temporal de 19 anos, onde no ano de 1985 ainda não havia a presença das rodovias. A validação ocorreu por meio da comparação entre mudanças previstas e realizadas, estimando-se o acerto do modelo através do cálculo entre os falsos positivos e verdadeiros positivos. A metodologia de validação, chamada pelo autor de ajuste do modelo, pode ser explicada como o percentual resultante do somatório das predições corretas para as classes floresta e desmatamento dividido pelo total de células da máscara analisada, onde o resultado obtido foi de 84,12%.

O modelo proposto por PIJANOWSKI *et al* (2002) conhecido como *Land Transformation Model* (LTM) é baseado em ACs e usa para o cálculo da probabilidade das mudanças espaciais a técnica heurística de Redes Neurais Artificiais- (RNAs). Emprega como *inputs* atributos do terreno e dados sócio econômicos preparados em ambiente SIG com resolução espacial de 100 X 100 (1 ha) por *pixel*. O acerto do

modelo é de 70% quando aplicada a metodologia de validação por janelas de 11 X 11 (CONSTANZA,1989).

SOARES FILHO *et al* (2001), ao expor o modelo de mudanças espaciais baseado em ACs usou como entrada dados não espaciais (sócio econômicos) e espaciais (biofísicos - atributos do terreno), estimando as alterações no espaço e tempo para diversos cenários. Entretanto as variáveis utilizadas possuem agregação espacial em escala de micro bacia hidrográfica - resolução de 2 hectares por *pixel*, de forma que é inviável a aplicação de um modelo similar em regiões com extensões menores que ensejam maior desagregação das variáveis. Devido às características estocásticas do modelo, em alguns casos a validação em janelas de 11 x 11 *pixel's* o acerto é de 80%, índice inferior (90% em janelas 11 x 11) ao obtido neste trabalho usando como variáveis tão somente atributos do terreno (variáveis biofísicas) em uma resolução espacial de 1 hectare por *pixel*.

Os modelos apresentados acima usam, para a produção dos resultados, informações socioeconômicas e/ou atributos do terreno, fato esse que torna a modelagem mais restrita a regiões que dispõem dessas variáveis.

A tentativa de “ensinar” ao modelo o comportamento do desmatamento usando-se somente variáveis biofísicas por si só, reduz o sucesso dessa tarefa, uma vez que outros fatores certamente influenciam na ocorrência desse evento. Como exemplo, pode-se citar que o poder de policia ambiental exercido pelos órgãos competentes em 1985 era aquém do que vem ocorrendo atualmente.

O mesmo padrão pode ser observado quanto à demanda por recursos florestais, uma vez que nos anos 1985 era menos oneroso obter madeira do que nos dias atuais. Desta feita, deve-se buscar um intervalo temporal que seja pouco influenciado por variáveis socioeconômicas, no qual o comportamento das variáveis dependentes mantenham-se sem grandes oscilações no período estudado e infelizmente nem sempre isso é possível.

Diferente dos outros modelos baseados em ACs encontrados na literatura, o modelo proposto neste estudo considera que usar exclusivamente séries históricas referente às mudanças dos atributos do terreno é suficiente para explicar a dinâmica das

mudanças espaciais. Esta suposição é pouco comum em outros modelos baseados em ACs, mas possibilitou a produção de resultados com índice de acerto superior a 50%, mesmo quando executado em regiões com as restrições de disponibilidade de variáveis.

8. CAPÍTULO

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo encerra esta investigação, delimitando exatamente qual foi sua contribuição científica, apresentando as conclusões depreendidas a partir dos resultados obtidos em confronto aos objetivos gerais e específicos, bem como, sugestões e recomendações para futuros trabalhos.

As contribuições para o “estado da arte” deste trabalho não podem ser relacionadas diretamente ao ferramental aplicado, Autômatos Celulares, uma vez que o escopo está relacionado à previsão de eventos com ênfase nas mudanças espaciais como resultado da construção / implantação de rodovias na Amazônia, o que implica em tão somente executar o ferramental em questão.

O que pode ser depreendido desta pesquisa como aporte para o saber sobre os modelos de previsão espaço temporais usando AC's, refere-se à proposta de uma metodologia de avaliação quantitativa e qualitativa que mensure, ainda que com determinado grau de incerteza, natural em modelos de previsão de eventos, quais serão as mudanças espaciais e onde deverão ocorrer, com a implantação de um determinado traçado rodoviário. Assim, os resultados obtidos nessas estimativas, poderão ser usados numa avaliação comparativa, como apoio aos tomadores de decisão quanto a escolha entre diferentes traçados ou até mesmo a não realização de um determinado projeto viário que cruze uma área de floresta muito vulnerável.

Esta investigação conseguiu de fato sistematizar e apresentar um método para geração de estimativas de mudanças espaciais no entorno de rodovias na Amazônia, neste caso, na macro região do arco densamente povoado, tendo como estudo de caso a rodovia BR 422, através da técnica dos Autômatos Celulares, executado no pacote computacional DINAMICA EGO.

A adoção de um modelo baseado em autômatos celulares que use unicamente variáveis biofísicas mostrou-se promissor na previsão das alterações ocorridas no espaço / tempo na área de estudo. Embora, certamente tanto variáveis biofísicas (atributos do terreno) quanto socioeconômicas (agentes “forçantes”, como a demanda

por produtos florestais) sejam explicativas do desmatamento, nem sempre é possível obtê-las.

Deve-se ponderar que uma modelagem é tão somente uma abstração de um evento, e a ausência de dados socioeconômicos, acabou “empobrecendo” a capacidade de previsão das mudanças, resultando numa análise de média eficácia por não explicar na sua totalidade a ocorrência dos eventos estudados.

A etapa de obtenção das variáveis consistiu na coleta dos dados em arquivos tipo vetoriais (**shape file*) junto ao INPE para posterior conversão em *grid's* (**raster*) uma vez que a modelagem em AC's enseja dados discretos, atributos esses, ausentes em arquivos vetoriais (contínuos).

A validação quantitativa via análise *pixel a pixel* (janela 1 x 1) atingiu um índice de acerto de 46%, fato esse que inviabilizaria a modelagem tendo em vista a hipótese levantada. Porém, uma validação mais flexível foi adotada tendo em vista as restrições encontradas e a escolha se deu pelo método de validação 3 x 3, que resultou em um modelo com 56 % de acerto. Assim, o produto gerado, mapa de desmatamento futuro, pode ser usado por planejadores visando uma análise sistêmica acerca das implicações ao meio natural em decorrência da construção/pavimentação de rodovias.

8.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos são aceitáveis quantitativa e qualitativamente, e dentro da hipótese inicial, atingem valores de acerto superiores a 50% (janela 3x3), tornando viável a adoção da modelagem prevista para a estimativa das mudanças espaço temporais como resultado da implantação/pavimentação de rodovias na Amazônia, usando tão somente variáveis biofísicas, secundárias e por isso mesmo de baixo custo.

É necessário observar que o modelo, embora tenha produzido resultados com índice de acerto em 90 % (janela de validação 11 x 11), ainda sim possui restrições a serem descritas, como:

- Restrições ligadas à obtenção de variáveis; usou-se como variáveis explicativas do evento somente dados biofísicos, pois as variáveis socioeconômicas não estão disponíveis anualmente, além de possuírem

elevado nível de agregação (dados disponíveis apenas em escala municipal);

- Restrições na modelagem: Devido a restrições computacionais, durante a transformação dos arquivos vetoriais em *raster*, as informações em uma área de 107,98 por 95,29 metros transformou-se somente em um *pixel*, implicando numa agregação de dados e perda de informações espaciais.

Tendo-se em vista as restrições citadas e os resultados obtidos, o modelo proposto atingiu o objetivo de prever as mudanças espaciais ao redor das rodovias com acerto superior a 50 %, usando como variáveis somente atributos do terreno, viabilizando assim o seu uso para fins de estimativa de quais mudanças ocorreriam com a implantação de uma rodovia, atendendo assim a resolução CONAMA 01/86. Porém, ao aplicar o referido modelo, deve-se atentar para as seguintes questões:

- Quando aplicado na estimativa das mudanças futuras **sem** o empreendimento, os valores das variáveis - neste caso desmatamento e recuperação da floresta, devem ser obtidos através da estatística descritiva da região que receberá a rodovia (média, variância e isometria) sendo o último testado empiricamente;
- Em cenários que busquem estimar as mudanças **com** empreendimento, deve-se buscar dados (média, variância e isometria) de regiões com características biofísicas e socioeconômicas similares.

8.2 SUGESTÕES

No transcurso da investigação apareceram outras perspectivas, que embora não tenham sido exploradas por fugirem do escopo estabelecido para este trabalho, tornaram-se indicações de diferentes caminhos a trilhar, como por exemplo, aplicar novas abordagens com o uso de técnicas diferentes para geração de estimativa de mudança futura, ou usar a mesma técnica (Dinâmica Espacial / AC's) aplicando-se em outras áreas, macro e micro regiões amazônicas.

Adicionalmente, ressalta-se que as sugestões apresentadas, podem também ser descritas como críticas que podem e devem melhorar/subsidiar trabalhos futuros. A

seguir, algumas das principais sugestões advindas do desenvolvimento desta dissertação:

- Propõe-se o desenvolvimento de um método para a determinação dos pesos e evidências, através de outras técnicas, talvez por outros ferramentais estatísticos (paramétricos e não paramétricos) ou, por exemplo, o conexionismo através de Redes Neurais Artificiais - RNAs;
- Propõe-se investigar em trabalhos futuros a concepção de ferramentas para “especializar” (desagregar) os dados não espaciais, contribuindo para uma análise mais “rica” dos eventos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. P. D. (2003). Curso de introdução à modelagem dinâmica espacial *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- ALENCAR, A. A. C.; SOLORZANO, L. A.; NEPSTAD, D. C. (2004). Modeling Forest Understory Fires in Eastern Amazonian Landscape. *Ecological applications*, 14(4) Supplement, pp S139-S149. Ecological Society of America. Nova York, EUA.
- ALMEIDA, C. M. ; MONTEIRO, A. M. V. ; CÂMARA, G. (2005). Modelos de simulação e prognósticos de mudanças de uso do solo urbano: instrumento para o subsídio de ações e políticas públicas urbanas. *XI Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós Graduação e pesquisa em planejamento urbano e regional – ANPUR*. Salvador, Bahia, Brasil.
- ALVES, D. (1999). An analysis of the geographical patterns of deforestation in Brazilian Amazonia - the 1991-1996 period. *Conferência sobre Padrões e Processos de Uso da Terra e Mudança em Florestas na Amazônia*. University of Florida, Gainesville, Flórida EUA.
- ALVES, D. S. (2002). Space-time Dynamics of Deforestation in Brazilian Amazônia. *International Journal of Remote Sensing*.
- AMOR, D.; CHRISTENSEN, N. (2008). Forecasting deforestation from the impact of road investments in the Mayan Forest. *Nicholas School of the Environment, Duke University, Durham, NC, USA*.
- BARBOSA, C.C.F. (1997). *Álgebra de cartas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento*. Dissertação de mestrado em Sensoriamento remoto. Instituto Nacional de pesquisas espaciais. São José dos campos, SP.

- BARRETO, G. A. (1998). *Redes neurais não-supervisionadas para processamento de sequências temporais*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.
- BARROSO, A. (2006). *Autômatos Celulares, introdução e uma aplicação ao modelo de Ising*. Disponível em: <<http://mega.ist.utl.pt/~amoba/NTM.pdf>>. Acesso em: 01 de maio de 2011.
- BATTY, M., COUCLELIS, H., EICHEN, M., (1997). Urban systems as cellular automata. *Environmental and Planning*.
- BECKER, B. (2001). É possível identificar modelos para projetar cenários? *Revisão das Políticas de Ocupação da Amazônia*. Número 12, Setembro 2001, p.135-159.
- BENEDETTI, A.C.P. (2010). *Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul*. Tese de doutorado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal área de concentração em manejo florestal da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS).
- BOHAN-CARTER, G. (1994). Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS. *Pergamon*, New York, USA.
- BRANDÃO JR. A.O.; SOUZA JR. C.M.; RIBEIRO, J.G.F.; SALES, M.H.R. (2007) *Desmatamento e estradas não oficiais da Amazônia*. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais. Florianópolis: INPE, p. 2357-2364.
- BRASIL, GABINETE DA CASA CIVIL, SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA-SIPAM (2009). *Reflexos e tendências do desmatamento no Sul do Estado do Amazonas*.

BRASIL, MINISTÉRIO PÚBLICO DA UNIÃO (2004) DEFICIÊNCIAS EM ESTUDOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS: SÍNTESE DE UMA EXPERIÊNCIA. *Escola superior do Ministério Público da União*. Brasília, DF.

BRASIL, UNIVERSIDADE FEDERAL DA AMAZÔNIA (2009). *Estudo de Impacto Ambiental – EIA: Obras de reconstrução/pavimentação da rodovia BR-319/AM, no segmento entre os km 250,0 e km 655,7*. Manaus, Amazonas. 6 Vols. + Anexos.

BRIASSOULLIS, H. (2000). *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches Department of Geography University of the Aegean Lesvos, Greece* <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm> Acessado em 21/10/2009, às 11:00hrs.

BRYN, L. M. (2008). *Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

BURROUGH, P. (1998). Dynamic modelling and geocomputation. *Geocomputation: A primer*. P.Longley, M. Batty and McDonnel. Londres, Inglaterra.

CAMARA, G.; CARVALHO, M. S. (2002). Curso de introdução à modelagem dinâmica espacial XI *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap5_análise_espacial_de_eventos.pdf. Acessado em 18/04/2010 às 13h. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo.

CÂMARA, G.;VALERIANO, D.M.;SOARES, J.V (2006). *Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia legal* Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo.

CARVALHO, L. M. T. (2005). *Sistemas de informação geográfica e sensoriamento remoto dos recursos florestais*. UFLA/FAEPE Lavras, p 109.

CAVALCANTE, F. C.; ROCHA, M. G. (2004). Migração e inserção espacial na Amazônia no âmbito da implantação dos grandes projetos: o caso da UHE- Tucuruí. *VIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Latino Americano de Pós-Graduação* – Universidade do Vale do Paraíba.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT (2009). *Classificação geral das rodovias no estado do Pará*.

CONSTANZA, R. (1989). Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. *Ecological Modelling*, v. 47, p. 199-215.

CROSTA, A. P. (1993). *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Editora Rev. Campinas, SP: IG/UNICAMP.

DAMIÃO, D. P. (2007). *Uso de técnicas multivariadas para a predição de desmatamento na Amazônia : O modelo “AMAZON –PD”*, Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília D.F, 180 paginas.

DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E. ; AULICINO, L.C.M. (2003). *Procedimento metodológico para padronizar e atualizar o banco de dados do Projeto Prodes Digital INPE São José dos Campos, SP*.

AGUIAR, A.P.D,(2006) *Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade intra regional*. Tese de dotourado, INPE,São José dos Campos, SP.

FERREIRA, L.V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S (2005). O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos avançados, volume 19 numero 53*. São Paulo.

FESPSP (2009). *Relatório de impacto ambiental (RIMA) – Desenvolvimento rodoviário S/A*. Secretaria de Transportes, São Paulo SP.

FLORENZANO, T.G (2002). *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo, SP, Editora oficina de textos, 97 paginas.

GARCIA, R. A., SOARES FILHO, B. S. & SWAYER, D (2007). Socioeconomic Dimensions, Migration, and Deforestation: an Integrated Model of Territorial Organization for the Brazilian Amazon. *Ecological Indicators*.

GEIST, H.J; LAMBIN, E.F. (2001). *What drivers tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub national case study evidence*.

GEOMA. Projeto Científico e Institucional Versão 10 (2002). Disponível em: <http://www.geoma.lncc.br/pdfs/versao10.pdf>. Acesso em: 19/10/2009 às 09:00h.

HERTZ, J.; KROGH, A. & PALMER, R. G. (1991). “*Introduction to the theory of neural computation*”, Addison-Wesley Publishing Company.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA –IBGE (2005). Ministério de Ciência e Tecnologia. Brasília, D.F., Brasil.

LAMBIN, E.F. (1994). Modelling Deforestation Process. *A review, Trees series B: Research Report*. European Commission, Luxembourg.

- LAURANCE, W.; COCHRANE, M.A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S. E FERNANDES, T (2001). *The Future of the Brazilian Amazon.Science*, v. 291, n. 5503, p. 438 – 439, 2001.
- LESSCHEN, J.P.; VERBURG, P.H.; STAAL S.J. (2005). Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. *LUCCreport series N.7 LUCF Focus 3 Office Department of Environmental Sciences: Wageningen University Wageningen Holland.*
- LI, X; YEH, A.G.O. (2002). Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International journal geographical information science*, vol. 16.Inglaterra, Reino Unido.
- LISBOA, M.V. (2002). *Contribuição para tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados-* Dissertação de mestrado Universidade de São Carlos-USP São Carlos, S.P. Brasil.
- LOBER, R.; WILSON, R.L. (1988). A 55 North Wales coastal Asaph to Aber: route location. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, England v. 84, part 1, p.895-937.
- MALAFAIA, R. M. S. (2004). Passivo Ambiental: Mensuração, Responsabilidade, Evidenciação e Obras Rodoviárias – *IX Simpósio Nacional de Auditoria em Obras Públicas.*
- MARGULIS, S. (2003). Quem são os agentes dos desmatamentos na Amazônia e por que eles desmatam? - *Banco Mundial*

- MARTTUNEN, M.; HÄMÄLÄINEN R. P. (1995). Decision analysis interviews in Environmental Impact Assessment. *European journal of operational research*, v.87, p.551-563.
- NOVO, E. M. L. M. (1989). *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. Editora Edgard Blucher. São Paulo, Brasil.
- PÁDUA, F. L. C. (2001). *Autômatos Celulares: teoria e aplicações*. Disponível em: <http://www.lsi.cefetmg.br/~cardeal/Publications/AutomatosCelulares.pdf>>. Acesso em: 01 jun.2011.
- PALAZZI, L. ; FONSECA FILHO, P. H., KUPLICH, T. M. (2009). A dinâmica do desmatamento próximo de rodovias em duas cidades da Amazônia: Cruzeiro do Sul e Rio Branco, Estado do Acre, no período de 1985 a 2003. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal R.N. Brasil.
- PERZ, S. G.; SOUZA JR, C.; ARIMA, E.; CALDAS, M.; BRANDÃO JR., A.; SOUZA, K.; WALKER, M. (2005). O dilema das estradas não oficiais na Amazônia. *Ciência Hoje*.
- PIJANOWSKI, B.C.; SHELLITO, B.; PITHADIA, S.; KONSTATINOS, A. (2002). Forecasting and assessing the impact of urban sprawl in coastal watersheds along eastern Lake Michigan Lakes& Reservoirs: *Research and Management*: 271–285 Michigan, USA.
- RIBEIRO, C.; ALMEIDA, O.; AMARAL RIBEIRO, S.; TONELLO, K.; LIMA, K.(2006) Expansão da pecuária de bovinos e desafios de sustentabilidade da atividade na Amazônia Legal. III *Workshop Brasil - Japão em Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável*.

SECRETARIA DE ESTADO DE TRANSPORTES DO PARÁ-SETRAN (2009).
http://www.setran.pa.gov.br/modal_rodoviario/rodovias-listagem.php - Acessado às
10:00 hrs de 30/03/2010.

SOARES FILHO, B.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G. C.; VERA DIAZ, M.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L. e VOLL, E. (2004). Simulating the Response of Land-Cover Changes to Road Paving and Governance Along a Major Amazon Highway: The Santarém-Cuiabá Corridor. *Global Change Biology*, vol. 10, n. 7.

SOARES FILHO, B.S.; ARAUJO, A. A.; CERQUEIRA G.C. (2001). DINAMICA – Um software para simulação de dinâmica de paisagens -*Anais do II Workshop em Tratamento de Imagens*, NPDI/DCC/UFMG, Belo Horizonte, M.G., Brasil.

SOARES FILHO, B.S.; CERQUEIRA, G.C., ARAÚJO, W.L., VOLL, A. ELIANE, D (2003). *Modelagem de dinâmica de paisagem: Concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em Autômatos Celulares*. Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

SOARES FILHO, B.S.S.; NEPSTAD, D.C.; CURRAN, L.; CERQUEIRA, G.C.; GARCIA, R.A.; RAMOS, C.A.; VOLL, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. ; MACGRATH, D. (2005). Cenários de desmatamento para Amazônia. *Estudos avançados 19 (54)* Projeto LBA, Fundação Gordon e Betty Moore e Capes.

THÉRY, H. (2002). Novas fronteiras na Amazônia. *École Normale Supérieure IRD Paris*.

TAVARES, D.L.(2010) *Um simulador de Tráfego Urbano baseado em Autômatos Celulares*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

TOBLER, W. R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region.
Economic Geography 46: 234–40. Detroit, EUA

WOLFRAM, S.(1983) Universality and complexity in cellular automata. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 10 (1-2). New York, EUA.