



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas

ERISON ROSA DE OLIVEIRA BARROS

**MODELAGEM DAS TENDÊNCIAS DE MUDANÇA DA TERRA COMO
SUPORTE AO CONTROLE TERRITORIAL DE FAIXAS DE DOMÍNIO: UM
ESTUDO APLICADO EM PERNAMBUCO ÀS RODOVIAS BR-408, BR-104 E BR-
101/PE**

Recife
2022

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Barros, Erison Rosa de Oliveira.

Modelagem das tendências de mudança da terra como suporte ao controle territorial de faixas de domínio: um estudo aplicado em Pernambuco às rodovias BR-408, BR-104 E BR- 101/PE / Erison Rosa de Oliveira Barros. - Recife, 2022.

291f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

Orientação: Maurício de Oliveira Andrade.

Inclui referências e apêndices.

1. Ocupações irregulares; 2. Faixas de domínio de rodovias;
3. Land Change Modeler. Autômatos Celulares. I. Andrade, Maurício de Oliveira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ERISON ROSA DE OLIVEIRA BARROS

**MODELAGEM DAS TENDÊNCIAS DE MUDANÇA DA TERRA COMO
SUPORTE AO CONTROLE TERRITORIAL DE FAIXAS DE DOMÍNIO: UM
ESTUDO APLICADO EM PERNAMBUCO ÀS RODOVIAS BR-408, BR-104 E BR-
101/PE**

Tese de Doutorado apresentada ao programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC)
da Universidade Federal de Pernambuco
(UFPE), como requisito para o cumprimento de
Qualificação.

Aprovada em: ____/____/____,

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência Prof. Dra. Viviane Adriano Falcão. Universidade Federal
de Pernambuco (Examinadora Interna)

participação por videoconferência Prof. Dr. Silas Nogueira de Melo
Universidade Estadual do Maranhão (Examinador Externo)

participação por videoconferência Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Júnior
Universidade Federal de Pernambuco (Examinador Externo)

participação por videoconferência Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves
Universidade Federal de Pernambuco (Examinador Externo)

participação por videoconferência Prof. Dr. Simone Sayuri Sato
Universidade Federal de Pernambuco (Examinadora Externa).

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais por sempre me apoiarem para seguir em frente e a minha esposa pelo
companheirismo constante ao longo de mais esse desafio.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor Supremo do Universo, que generosamente me concedeu as condições para chegar até onde cheguei.

Aqui na terra o meu agradecimento só poderia ser para minha família: minha mãe Maria Rejane, meu pai Joubert, minha irmã, minha esposa Paula Roberta e ao meu primo Rodrigo Cabral e esposa.

Sei que é clichê, mas sem eles não teria chegado até aqui. Serei imensamente grato por cada momento em que pensei em desistir e eles me apoiaram para continuar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Maurício de Oliveira Andrade, por toda orientação, a possibilidade de construção de uma pesquisa compartilhada, o conhecimento repassado e, sobretudo por acreditar em mim.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Cartográfica por incentivar minha dedicação a esse doutorado. Em especial meus chefe Professor Cezário pela compreensão da importância da minha dedicação ao doutorado e a pesquisa. Sou grato também aos meus colegas de turma e do departamento pelas constantes trocas de conhecimento e experiências, fundamentais para o andamento desta tese.

Aos colegas do DNIT agradeço pelos enormes aprendizados na área de desapropriação e faixa de domínio, responsáveis pelo meu interesse, o qual resultou esta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e seu corpo de docentes, por todo o suporte durante esse tempo em que lá estive.

RESUMO

Esta tese propõe um modelo para estudar as ocupações irregulares sobre as faixas de domínio de rodovias, a partir da sucessão de estados do uso e cobertura da solo do MapBiomass, a partir da agregação e desagregação de dados socioeconômicos, de infraestrutura e ambientais das áreas internas das faixas e marginais a rodovias. Com uma abordagem que se utiliza de técnicas aplicadas no monitoramento do desmatamento, mas que ainda não foram utilizadas para estudar o fenômeno das ocupações irregulares das faixas de domínio de rodovias. A pesquisa se utilizou de recortes espaço temporais que abrangem as rodovias BR-408, BR-104 e BR-101 em trechos que cortam o Estado de Pernambuco, no período dos anos de 2000, 2010 e 2018. Os modelos dinâmicos de simulação foram baseados na modelagem “*Land Change Modeler (LCM)*” via autômatos celulares, que permite mostrar o mapa de potencial de transição e resultados da simulação (projetado). Para o desenvolvimento do modelo adotou-se plugin do QGIS denominado de *MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation)*. Os resultados do modelo proposto nas rodovias se mostraram-se satisfatórios quando comparados com o levantamento cadastral das ocupações irregulares realizados em 2018 pelo Programa PROFAIXA do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. A metodologia de modelagem proposta para as ocupações irregulares sobre a faixa de domínio das rodovias possibilita criar cenários capazes de antecipar as ocupações irregulares (construções) nesses espaços. A contribuição da tese situa-se na criação de modelos para apoiar na proposição de políticas públicas e ações para fiscalizar de forma mais efetiva as áreas suscetíveis a ocupações irregulares.

Palavra-Chave: Ocupações irregulares. Faixas de Domínio de rodovias. *Land Change Modeler*. Autômatos Celulares.

ABSTRACT

This thesis proposes a model to study the irregular occupations on the domain strips of highways, based on the succession of states of land use and land cover of MapBiomas, from the aggregation and disaggregation of socioeconomic, infrastructure and environmental data of the internal areas of the strips and marginal areas of highways. With an approach that uses techniques applied in monitoring deforestation, but that have not yet been used to study the phenomenon of irregular occupations of the domain strips of highways. The research used space-time clippings that cover the highways BR-408, BR-104 and BR-101 in sections that cut through the state of Pernambuco, in the period of the years 2000, 2010 and 2018. The dynamic simulation models were based on the "Land Change Modeler (LCM)" modeling via cellular automata, which allows showing the potential transition map and simulation results (projected). For the development of the model we adopted a QGIS plugin called MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation). The results of the proposed model on the highways proved satisfactory when compared to the cadastral survey of irregular occupations conducted in 2018 by the PROFAIXA Program of the National Department of Transportation Infrastructure - DNIT. The modeling methodology proposed for irregular occupations on the domain strip of highways makes it possible to create scenarios capable of anticipating irregular occupations (constructions) in these spaces. The contribution of the thesis lies in the creation of models to support the proposition of public policies and actions to supervise more effectively the areas susceptible to irregular occupations.

Keywords: Irregular occupations. Road frontage roads. Land Change Modeler. Cellular Automata.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha do Tempo dos Normativos brasileiros relacionados à Faixa de Domínio.....	33
Figura 2 - Ilustração com as faixas de domínio e Áreas Non Aedificandi.....	37
Figura 3 - Classificação das vias segundo o grau de acesso e mobilidade.....	39
Figura 4 - Métodos de Referenciamento Linear Absolutos	45
Figura 5 - Métodos de Referenciamento Linear Relativos.....	45
Figura 6 - Métodos de referenciamento Linear Interpolativos.....	46
Figura 7 - Principais bases rodoviárias em estruturação no âmbito do CGPLAN - DNIT	57
Figura 8 - Sistema básico de espacialização de dados no âmbito do CGPLAN - DNIT.....	58
Figura 9 - Relações entre impulsores de mudanças e o uso e cobertura do solo.....	64
Figura 10 - Fluxograma de Trabalho do MapBiomias	65
Figura 11 - Configuração de Dados Espaciais	78
Figura 12 - Configuração de dados Temporais	78
Figura 13 - Domínio espaço-temporal da análise espacial.....	79
Figura 14 - Discretização da área de estudo no plano celular	85
Figura 15 - Matriz de Probabilidade e Diagrama de Transição.....	89
Figura 16 - Fluxograma de Desenvolvimento e aplicação de um modelo de Simulação.....	93
Figura 17 - Abstração da paisagem em um modelo espacial de mudanças, usando-se uma estrutura <i>raster</i>	94
Figura 18 - Ambientes do LCM.....	100
Figura 19 - Abordagens e Tipos de Cenários	101
Figura 20 - Comparação entre Cenários x Tendências.....	102
Figura 21 - Fluxograma do Processo de Análise de Mudanças, Modelos de treinamento e Validação no LCM.....	106
Figura 22 - Exemplo de modelos da paisagem tipo ‘mosaico’ e ‘binário’	108
Figura 23 - Exemplo de espacialização dos Pesos de Evidências e valores de Probabilidade	113
Figura 24 - Comparação das funções de alocação de transições <i>patcher</i> e <i>expander</i>	115
Figura 25 - Situações de comparação de células, considerando o conceito de <i>fuzziness of location</i>	119
Figura 26 – Localização das Áreas de Estudo.....	121
Figura 27 - Fluxograma Metodológico	123
Figura 28- Categorias de representação usuais em SIG.....	124
Figura 29 - Representação esquemática do princípio do mapeamento desimétrico.....	128

Figura 30 - Coincidência espacial - sobreposição de planos de informação de mesma resolução..	130
Figura 31 - Modelagem espaço-temporal das Ocupações Irregulares.....	131
Figura 32 Qrcode de acesso aos Dados do Resumo da BR-408/PE.....	136
Figura 33 - Qrcode de Acesso a análise exploratória dos Dados da BR-408.....	136
Figura 34 - Mapa de Cobertura e Ocupação do Solo de 2000, 2010 e 2018 da BR-408/PE.....	138
Figura 35 - Correlação das Principais Variáveis do Modelo.....	142
Figura 36 - Etapas para construção de um modelo de uso do solo da BR-104	150
Figura 37 - Normalização e rasterização dos dados descritivos.....	151
Figura 38 - Faixas do IVS	152
Figura 39 -Análise Exploratória dos dados Socioeconômicos - BR-104.....	154
Figura 40 - Mapa de Potencial de Transição 2000 a 2010	158
Figura 41 - LULC das Margens da Rodovia da BR-104/PE dos anos 2000, 2010 e 2018.	160
Figura 42 - Infográfico de Transição para os anos de 2000, 2010 e 2018.	163
Figura 43 - Gráfico de Perda de Intensidade e de área do LULC da BR-104/PE	164
Figura 44 - Sankey das mudanças LULC.....	164
Figura 45 - Gráfico de perdas e ganhos das classes de uso e cobertura da terra em ha	166
Figura 46 - Gráfico de Intensidade de Mudança da BR-104/PE	167
Figura 47 - Gráficos de Cobertura do Solo dos Anos 200,2010 e 2018.....	169
Figura 48 - Qrcode de acesso aos Dados do Resumo da BR-101/PE	171
Figura 49 - Qrcode de Acesso à análise exploratória dos Dados da BR-101/PE	171
Figura 50 - Cenários de Uso e Cobertura da Terra - Margens da BR-101/PE	174
Figura 51 - Análise e Visualização de Mapas na WEB	179
Figura 52 - Frequência das Ocupações em Relação às Classes de Cobertura da Terra	180
Figura 53 – Análise do Moran's I Univariado Global.....	181
Figura 54 - Visualizações lado a lado do Moran's I univariado local.....	182
Figura 55 - Resultado da Significância Bivariate Moran's I	183
Figura 56 -Scatterplot e Visualização Moran's I Bivariado Local	184
Figura 57 - Dinâmica do padrão de uso e cobertura do solo na BR-101/PE.....	186
Figura 58 - Mapa de Mudanças de Pixel.....	188
Figura 59 - Parâmetros da Modelagem do Potencial de Transição	189
Figura 60 - Validação dos Modelos para a BR-101	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Projetos de Rodovias _____	40
Tabela 2 - Largura da faixa de domínio em casos especiais de melhoramentos de estradas _____	40
Tabela 3 - Tipos de cobertura da terra e tipos associados de uso do solo _____	53
Tabela 4 - Variáveis utilizadas para os Anos de 2000 e 2010 para BR-408/PE. _____	140
Tabela 5 - Distribuição das Células, por Classes de Uso e cobertura da Terra, seguindo situação de ocupação para o Ano de 2000 e 2010. _____	141
Tabela 6 - Matriz de Transição LCC BR-408/PE _____	142
Tabela 7 - Índice <i>Kappa</i> e o correspondente desempenho da classificação. _____	145
Tabela 8 - Validação dos modelos _____	146
Tabela 9 - Conteúdo e fonte de dados para o LCM BR-104/PE _____	149
Tabela 10 - Distribuição das Células, por Classes de Uso e cobertura da Terra, seguindo situação de ocupação para o Ano de 2000 e 2010. _____	156
Tabela 11 - Matriz de Transição para os Anos de 2000 e 2010 para áreas da BR-104/PE _____	156
Tabela 12 - A cobertura de área da LULC, porcentagem, e taxa de mudanças nas margens da BR-104/PE entre 2000, 2010, e 2018. _____	161
Tabela 13 - Conteúdo e fontes de dados para o LCM na BR-101/PE _____	175
Tabela 14 Distribuição das Células, por Classes de Uso e cobertura da Terra, seguindo situação de ocupação para o Ano de 2000 e 2010 _____	185
Tabela 15 - Matriz de Transição para os Anos de 2000 e 2010 para BR-101/PE _____	185
Tabela 16 - Relatório de mudanças do Pixel no Tempo 2010 a 2018 _____	187

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADA	Área Diretamente Afetada
AID	Área de Influência Direta
AII	Área de Influência Indireta
AASHTO -	American Association of State Highway and Transportation Officials
CA MARKOV	Cadeia de Markov
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
Erro! Fonte de referência não encontrada.	Departamentos de Estrada de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DNITGeo	Setor de Geotecnologias Aplicadas
EIA	Estudos de Impacto Ambiental
EL	Elemento linear
GPS	<i>Global Positioning System</i> - Sistema de Posicionamento Global
IDE-DNIT	Infraestrutura de Dados Espaciais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
LCM	<i>Land Change Modeler</i>
LUCCM	<i>Land Use and Land Cover Change Modeling</i>
LULC	<i>Land Use and Land Cover</i>
MnDOT	<i>Minnesota Department of Transportation</i>
MRL	Método de referenciamento linear
OTL	Objeto territorial legal
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PRF	Polícia Rodoviária Federal
PROFAIXA	Programa Federal de Faixas de Domínio
SNV	Sistema Nacional de Viação
SRE	Sistema Rodoviário Estadual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	24
1.2 Hipótese	29
1.3 Objetivos	29
1.3.1 Objetivo Geral	29
1.3.2 Objetivos Específicos.....	29
1.4 Estrutura da Tese	30
2. FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL DO OBJETO ESTUDADO	32
2.1 Definição sobre a Faixa de Domínio	32
2.2 Aspectos Técnicos e Legais da Faixa de Domínio.....	34
3. GESTÃO TERRITORIAL DAS FAIXAS DE DOMÍNIO RODOVIÁRIO	56
3.1 Gestão da Malha Rodoviária	56
3.2 Aquisição de conhecimento sobre o fenômeno da ocupação irregular	59
3.3 Mudança no Uso da solo e Mudança na Cobertura do Solo.....	60
3.4 Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Solo no Brasil.....	64
3.5 Uso e Ocupação irregular da Faixa de Domínio	66
3.6 Modelagem do Uso do solo e mudança da cobertura da terra	68
4. MODELOS DINÂMICOS DE USO E OCUPAÇÃO DO TERRITÓRIO	71
4.1 Conceitualização	71
4.2 Modelos de Simulação das Mudanças do Uso e Cobertura do Solo.....	77
4.3 Autômatos Celulares	80
4.4 Cadeias de Markov	86
4.5 Matriz de Transição.....	89
4.6 Análise de Correlação de Mapas de Classes	91
4.7 Modelos de Simulação: Compressão dos Padrões e Configuração	92
4.8 Modelos de Simulação: Regras de Transição	95
5. IDENTIFICAÇÃO DO MODELO PARA SIMULAÇÃO.....	98
5.1 Land Change Modeler (LCM) For Ecological Sustainability	104
5.2 Análises Métricas da Paisagem	108

5.3 Análise Estatística	109
5.4 Métodos de Parametrização, Calibração, Simulação e Validação.	111
5.4.1 Parametrização.....	111
5.4.2 Calibração	113
5.4.3 Simulação	116
5.2.4 Validação	117
6. MATERIAIS E MÉTODOS	120
6.1 Desenvolvimento metodológico	120
6.2 A Unidade Territorial de Análise	123
6.3 Grade Estatística.....	129
6.4 Modelagem de uso e cobertura da terra	132
6.5 Dados Geoespaciais.....	133
6.6 Variáveis utilizadas nos modelos	133
6.7 Análise de Mudança de uso e Cobertura.	134
7. RESULTADOS E DISCURSÕES.....	135
7.1 Modelo LCM para Rodovia BR-408/PE.....	135
7.1.1 Abordagem Metodológica.....	136
7.1.2 Resultados da Abordagem Metodológica	141
7.2 Modelo LCM para Rodovia BR-104/PE.....	148
7.2.1 Abordagem Metodológica.....	149
7.2.2 Método de Desagregação Espacial	151
7.2.3 Análise Exploratória dos dados	153
7.2.4 Modelo LCM para estudar o comportamento das Ocupações irregulares da Faixa de Domínio da BR-104/PE	154
7.2.5 Classificação e Detecção de mudanças de Uso e Cobertura da Terra.....	155
7.2.6 Matriz de Transição	156
7.2.7 Calibração e Validação	159
7.2.8 Análise da Mudança da Cobertura do Uso do Solo.....	159
7.2.9 Resultados e discussões sobre a BR-104/PE	161
7.3 Modelo LCM para Rodovia BR-101/PE.....	171
7.3.1 Abordagem Metodológica da BR-101/PE.....	172
7.3.2 Detecção de mudanças no Uso e Cobertura da Terra	184
7.3.3 Validação dos Modelos da BR-101/PE	190

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	191
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197
APÊNDICES	220

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é ainda predominantemente rodoviário, com uma malha total de 1.720.700 km de rodovias, sendo 213.452 km de extensão pavimentada (CNT, 2019). Sabe-se que, a construção de rodovias está diretamente ligada à modificação da paisagem, mas além da modificação física, ocorrem também impactos socioeconômicos na região que abriga essa infraestrutura (BERTUSSI e ELLERY JUNIOR, 2012). Ademais, por se tratar de infraestrutura facilitadora da mobilidade, proporciona expansão da fronteira agrícola e funciona como indicador de pressão antrópica principalmente sobre suas faixas lindeiras (PRADO *et al.*, 2012). As infraestruturas de transportes e a construção de novas rodovias são fatores que consolidam áreas já agricultadas e permitem a expansão da agricultura para novas áreas, por atuarem como vias de escoamento da produção (BARNI, 2012; BORGES e FERREIRA, 2011; SOUTHWORTH *et al.*, 2011; GERALDO OLIVEIRA *et al.*, 2011). Entretanto, os maiores impactos causados pelas rodovias ocorrem justamente durante o período de operação, no qual, o mau gerenciamento das áreas ou a falta de planejamento territorial facilita o surgimento de ocupações irregulares nas suas margens. (CERRI, 1993; AYALA, 2002; MACEDO *et al.*, 2003).

Diante disso, a necessidade do conhecimento dos territórios ocupados por essas infraestruturas se torna essencial para a gestão territorial das margens das rodovias. No entanto, essa gestão se torna onerosa visto que demanda a atuação sobre grandes extensões territoriais, que em tese deveriam estar delimitadas e identificadas por cercas. No Brasil essas faixas marginais em grande parte da sua extensão se encontram em situação de ocupações irregulares e em mal estado de conservação. As situações irregulares consistem na ocupação dessas áreas por comunidades ou negócios que avançam ou até ocupam esses territórios sem a permissão das autoridades competentes.

O desenvolvimento econômico impulsionado por uma rodovia tende a estimular o crescimento populacional no seu entorno, impulsionando o uso/ocupação das áreas marginais de forma não planejada por populações, principalmente de baixo poder socioeconômico.

Nas últimas décadas, estudos sobre as mudanças do uso e cobertura do solo demonstram crescente complexidade. A razão é que abrangem várias áreas do saber e

procuram compreender questões extremamente intrínsecas aos fenômenos que envolvem atores e variáveis do meio físico, ambiental e socioeconômico (IBISCH *et al.*, 2016; THEOBALD, 2010). Um crescente número de estudos tem explorado variáveis explicativas para as taxas de conversão do uso do solo com o objetivo de quantificar e prever padrões futuros de uso e cobertura do solo (NÓBREGA *et al.*, 2019).

A influência das infraestruturas de transporte rodoviário na dinâmica das mudanças da paisagem tem sido amplamente investigada, a exemplo dos trabalhos de Lima *et al.* (2013), Nóbrega *et al.* (2012), Spellerberg (1998) e Trombulak e Frissell (2001). No entanto, esses estudos focam prioritariamente nos impactos econômicos e sociais sobre uma determinada região ou localidade.

É fato que a integração logística condiciona a emancipação econômica e social de um país. Entretanto, o impacto negativo das rodovias na composição da cobertura e uso do solo precisa ser mais estudada. Trabalhos como os de Erickson (1994); Green *et al.* (1994); Lo e Yang, (2002) e Webster *et al.* (1990) mostram a dificuldade de compreender a dinâmica das paisagens e quais são os fatores que estão interconectados a essas mudanças. Assim, o estudo dos impactos dessas rodovias requer a necessidade da interdisciplinaridade para entender a complexa relação entre transporte, crescimento, mudanças econômicas e o planejamento urbano e regional. Para isso, é necessário estudar os impactos causados pela valorização econômica das terras no aumento da densidade populacional ao redor dos territórios lindeiros a essas infraestruturas; nas desapropriações dos imóveis lindeiros e no interesse da população em ocupar as margens das rodovias para exploração econômica e habitacional.

Diante desse contexto de impactos positivos e negativos relacionados às rodovias, parte-se do ponto de destacar a responsabilidade assumida por parte dos que fazem a gestão dessas rodovias. O problema é que não se trata apenas de implantar novas infraestruturas rodoviárias, mas também de mantê-las em condições adequadas de uso, conservação e ocupação das margens.

A crescente diversificação das atividades econômicas e sociais ao longo das rodovias, a expansão e o adensamento das áreas ocupadas associadas à demanda por terras, acrescentam um caráter dinâmico às ocupações irregulares das faixas de domínio. Os tipos de uso e ocupação do solo nas áreas lindeiras às rodovias parecem exercer papel

determinante na tipologia e na intensidade dessas ocupações irregulares. Como ressalva, Maricato (2003) destaca que a irregularidade e ilegalidade como forma de ocupação não resulta de uma atitude de confronto à legislação, mas da falta de condições econômicas de acesso à terra e à moradia pelas populações marginalizadas.

Nos estudos ambientais, as terras lindeiras às rodovias caracterizam-se como espaços suscetíveis a sofrer alterações como consequência da sua implantação, manutenção e operação ao longo de sua vida útil. Essa preocupação está expressa nos escopos dos Estudos de Impacto Ambiental – EIA e dos Relatórios de Impacto Ambiental – Rima, nos quais se estudam: Área Diretamente Afetada – ADA, Área de Influência Indireta – AII e Área de Influência Direta – AID.

Então, estudar os impactos sociais e da estrutura fundiária de uma região causada pela implementação de uma infraestrutura de transporte é desafiador. Isso se deve ao fato de que o território, segundo Santos (2000), é um dado essencial da condição da vida cotidiana. Embora contenha subjetividades, o território é uma realidade objetiva, um produto social (Santos, 1979b), dotado de uma diversidade de variáveis, quantitativas e qualitativas que, vinculadas ao mesmo, oferecem subsídios para a compreensão dos diferentes territórios que o compõem. Então, estudar as rodovias como uma infraestrutura de transporte sem levar em consideração o uso e ocupação do solo é deixar de contribuir para o planejamento de ações políticas no âmbito da qualidade de vida das pessoas que vivem em suas margens.

Nesse contexto, sem conhecer as dimensões dos problemas, não há como planejar e agir de forma integrada. Por isso, reconhecer o território é a primeira ação a ser tomada. O diagnóstico e mapeamento das áreas ocupadas passam a serem ferramentas imprescindíveis para o planejamento e gestão dessas áreas. Tal processo, acima de tudo, requer ações planejadas de curto, médio e longo prazos, de forma continuada, integrada e transversalizada, envolvendo diretamente os órgãos competentes de todos os níveis institucionais que atuam sobre o território.

Diante de todo esse contexto, a gestão das faixas de domínio se mostra onerosa para o poder público. Com efeito, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, principal órgão executor da política federal de infraestrutura de transportes terrestres tem enfrentado problemas para exercer a fiscalização das faixas de domínio das rodovias

que se encontram sob sua jurisdição, o que tem resultado na consolidação das ocupações e do uso irregular dessas áreas (BATISTA, 2019). Em 2009, o DNIT emitiu a Instrução de Serviço DG/0001/2009, demonstrando a preocupação da autarquia com as ocupações irregulares e turbações das faixas de domínio, fatos recorrentes e generalizados ao longo das rodovias federais, que representam violação da Lei e concretizam riscos ao patrimônio público e ao trânsito e tráfego interestaduais (DNIT, 2009).

Dessa maneira, reconhece-se a importância de que o uso e ocupação irregular das faixas de domínio é um problema instalado nas diversas rodovias federais do país, concedidas ou sob a administração do poder público. Na prática, percebe-se é o crescimento de ocupações irregulares nas áreas lindeiras às rodovias federais brasileiras, principalmente nas regiões urbanas, em decorrência da baixa capacidade de fiscalização do Estado (BATISTA, 2019).

Segundo Martins (2002), como causa indireta, ocorre uma situação típica de desenvolvimento desigual e excludente, onde um processo urbano-industrial acelerado ocasiona, em poucas décadas, uma forte concentração de população nas grandes cidades, acarretando graves problemas de degradação ambiental, que se evidenciam especialmente no meio ambiente urbano. O estilo de desenvolvimento é a causa que tem levado a essa situação de degradação e piora na qualidade de vida, principalmente no caso da população de baixa renda. Diante disso, porções de terra onde o Estado não consegue monitorar de forma eficiente, ficam à mercê de ocupações irregulares, como é o caso das faixas de domínio das rodovias.

Nos últimos anos, tem ocorrido expansão habitacional sem planejamento dos grandes centros urbanos ao longo das rodovias. Associa-se a isso a pouca consciência socioeconômica e ecológica dos governos municipais e da população. Esse contexto aliado à falta de políticas públicas principalmente de habitação popular tem colocado em risco por ocupações irregulares, a segurança de motoristas e pedestres que estão inseridos em faixas territoriais de competência federal ou dos estados.

As ciências sociais mostram que os fenômenos que caracterizam a segregação urbana revelam uma estreita relação com a vulnerabilidade social, a infraestrutura e as condições ambientais, como relatado nas obras de Nolan *et al.* (2014) ; Salverda *et al.*, (2014), Tarsi (2016) e Musterd *et al* (2017). Entende-se então, que existem tipos (classes)

de populações mais propícias à ação de ocupação irregular, assim como, existem locais mais suscetíveis à ocupação irregular. Esses dois referenciais têm em comum a localização em que vivem e suas relações com o território. Estas relações são facilmente extraídas das características do território (tipo de uso e cobertura do solo).

Genovez *et al.*, (2002) reforçam essa argumentação quando relatam que o crescimento desordenado dos bairros periféricos, além das favelas e das casas em áreas irregulares, como nas proximidades de cursos d'água e faixas de domínio de rodovias e de linhas de transmissão, é causado por uma população composta por pessoas com baixos salários, com poucas condições de renda e que não possuem outra opção a não ser residir em locais com pouca infraestrutura, o que caracteriza a segregação urbana.

Essa atração que terrenos de boa acessibilidade, de alto valor econômico e pouco fiscalizados exercem nas camadas populacionais mais pobres, também pode influenciar na atratividade da ocupação das faixas de domínio das rodovias. Essas extensas regiões que muitas vezes estão localizadas próximas a aglomerados urbanos, áreas agrícolas de grande potencial econômico e que apresentam grande fragilidade de infraestrutura vão criar uma estreita relação com as classes economicamente fragilizadas. Ao mesmo tempo, a necessidade de mão-de-obra de baixa remuneração para atender às necessidades de uma determinada região, aliada à necessidade de emprego dessas massas populacionais cria um ambiente propício à perpetuação dessa lógica.

A persistência das desigualdades sociais é um forte indicador da necessidade de novas propostas de políticas públicas que minimizem essa tendência (TEAGUE e WILSON, 1995). Desconsiderar a influência do território no fenômeno urbano tem sido uma postura comum no planejamento das políticas públicas no Brasil (SANTOS, 1985). Entretanto, nenhuma proposta política pode tornar-se estratégica e efetiva ignorando a dinâmica territorial (SANTOS, 2001b), porque o processo de exclusão/inclusão social manifesta-se territorialmente (KOGA, 2001).

Embora contenha subjetividades, o território é uma realidade objetiva, um produto social (SANTOS, 1979b), dotado de uma diversidade de variáveis, quantitativas e qualitativas que, vinculadas ao mesmo, oferecem subsídios para a compreensão dos diferentes territórios que o compõe. Dessa forma, a significativa contribuição do território

no planejamento de ações políticas remete à possibilidade de compreender os problemas urbanos na sua totalidade e nas suas frações.

O uso e cobertura do solo associado a dados secundários de pesquisas censitárias ou amostrais e indicadores podem apresentar um retrato das características de uma determinada região, como por exemplo, a vulnerabilidade social e a pobreza. Diante disso, a espacialização da pobreza torna-se um elemento fundamental para entender os seus desdobramentos nas localidades, pois, segundo Ávila (2013), é fundamental conhecer e entender as relações que as múltiplas dimensões da pobreza assumem no espaço, para, entre outros aspectos, colaborar com a elaboração de políticas públicas mais consistentes.

Segundo Genovez *et al.* (2002), a utilização de técnicas de análise espacial apresenta potencial para identificar essas diferenças e similaridades, por meio da aplicação e análise de medidas de autocorrelação espacial global e local, fornecendo a delimitação de *clusters* de exclusão/inclusão social significativos para os territórios.

O uso de técnicas de modelagem dinâmica a partir de dados sociais, econômicos e ambientais associados a dados geoespaciais de uso e ocupação do solo podem responder por que certas áreas ao longo de rodovias são mais suscetíveis à ocupação irregular do que outras.

A partir da revisão da literatura verificou-se que alguns pesquisadores estudaram especificamente a relação das alterações da cobertura e uso do solo com questões relacionadas ao território, como por exemplo, desmatamento, queimadas e crescimento da malha urbana e etc. Já em estudos que tem relação com os transportes, os pesquisadores enfatizavam as modificações e adensamentos das malhas pertencentes aos sistemas de transportes e terminais logísticos.

A pesquisa utilizou o *Land Change Modeler* (LCM) For *Ecological Sustainability* denominado de Modelo de Simulação da Paisagem para Sustentabilidade Ecológica cuja simulação baseia-se nas regras de transição segundo o paradigma dos automatos celulares, o que significa que a paisagem é representada por uma grade regular com células discretas que podem alterar seus estados (classes de cobertura do solo) segundo regras de transição estabelecidas pela Cadeia de Markov no período de 2000 a 2018. A partir da parametrização por pesos de evidencia das mudanças ocorridas na cobertura do solo na

margem das rodovias no período de 2000 a 2010, destinada a calcular mapas de probabilidade de transição entre classe de cobertura do solo.

Com o conhecimento sobre o LCM dos terrenos marginais é possível entender a dinâmica das ocupações por meio de mapa de probabilidade de transição em comparação com os dados de ocupação de 2018. A definição dos parâmetros do modelo podem permitir entender como ocorre as situações propícias à irregularidade das ocupações sobre as faixas de domínio. Essa caracterização pode fornecer ainda subsídios para suporte à formulação e implantação de políticas públicas de combate a esse tipo de ocupação, pois com ações estratégicas é possível localizar espacialmente as áreas marginais às rodovias que concentram esses segmentos populacionais mais propícios a ocupações irregulares.

A relevância da Tese emerge da necessidade da proposição de uma metodologia para a identificação das variáveis estatisticamente determinantes, que considerando heterogeneidades socioeconômicas, possam prever tendências de ocupações irregulares de faixas de domínio e serem úteis para subsidiar a elaboração de políticas públicas de enfrentamento do problema pelas entidades responsáveis.

Para isso, foi proposto estudar e modelar o comportamento do uso e cobertura da terra nas margens das rodovias federais BR-408, BR-104 e BR-101, todas no Estado de Pernambuco, no sentido de prever as tendências de futuras ocupações irregulares sobre suas faixas de domínio. A escolha dessas rodovias deve-se ao fato da disponibilidade dos levantamentos cadastrais georreferenciados de suas faixas de domínio, realizados no ano de 2018, para atender ao Programa Federal de Faixas de Domínio (ProFaixa).

A inexistência por parte do DNIT de um sistema de gestão territorial que contemple a definição dos limites físicos ou legais das faixas de domínio de rodovias em leito natural ou vias federais implantadas. Isso se dá, pela inexistência de projeto geométrico que defina as dimensões da faixa de domínio da via ou por haver diferença entre a largura da faixa de domínio prevista no projeto geométrico e aquela efetivamente verificada em campo, em decorrência de diversos fatores.

Então existência desse levantamento georreferenciado das ocupações para o ano de 2018 com a possibilidade de extração da cobertura do ano e de anos anteriores, associado a técnicas desagregação espacial de dados socioeconômicos, infraestrutura e meio ambiente.

Possibilita a validação de um modelo dinâmico de uso e cobertura da terra que tente explicar quais classes de cobertura do solo são mais favoráveis a este tipo de ocupação.

1.1 Justificativa

A gestão territorial de áreas de grandes extensões precisa levar em consideração diversos fatores, tais como, os entornos sociais, políticos, econômicos e, principalmente ambientais. Quando estão em jogo investimentos de alto valor, como é caso das rodovias, todas as decisões tomadas para a gestão territorial devem ser bem estruturadas.

Faixa de domínio é definida como a base física sobre a qual se assenta uma rodovia, constituída pelas pistas de rolamento, canteiros, obras de arte, acostamentos, sinalização e faixas laterais de segurança, até o alinhamento das cercas que separam a estrada dos imóveis marginais ou da faixa do recuo (DNER, 1997). Conforme o Art. 50 do Código de Trânsito Brasileiro (CTB), o uso das faixas laterais de domínio e das áreas adjacentes às estradas e rodovias obedecerá às condições de segurança do trânsito estabelecidas pelo órgão ou entidade com circunscrição sobre a via.

Com a globalização, as cidades têm se tornado cada vez mais atraentes para todos os extratos da sociedade humana por causa de suas vantagens econômicas e políticas estratégicas, oportunidades de emprego e disponibilidade de infraestruturas e instalações relevantes. A urbanização exerce um processo antropogênico em cadeia no ambiente natural e é indiscutivelmente o principal contribuinte para a transição global do uso do solo.

A urbanização global tem produzido efeitos negativos tremendos sobre as mudanças nas paisagens em muitas cidades de países em desenvolvimento (RIMAL *et al.*, 2018), como é o caso do Brasil. As coberturas do solo incluem paisagens físicas e humanas (por exemplo, vegetação, rochas, corpos d'água, terras aráveis e infraestruturas de transporte). O uso do solos, por outro lado, envolve atividades humanas no terreno, incluindo agricultura, mineração, desenvolvimento comercial e industrial, etc. As modificações da cobertura do solo são motivadas por fatores sociais, econômicos e ambientais. As mudanças no uso do solo são impulsionadas por diversas combinações de fatores que podem levar a um aumento sobre a pressão de ocupação de áreas pouco fiscalizadas, motivada primordialmente pela falta de recursos por parte da população que vive no entorno dessas áreas. Dentre essas mudanças da cobertura do solo podem-se destacar as ocupações

irregulares sobre áreas de risco, ocupações irregulares sobre as faixas de domínio de linhas de transmissão e em especial as ocupações irregulares sobre faixas de domínio de rodovias.

Os modelos de mudança da cobertura do solo são simplificações da realidade que oferecem um importante meio de prever a futura cobertura da terra para uso do solo. Técnicas de sensoriamento remoto podem ajudar a gestão da terra e o acompanhamento das dinâmicas de mudanças no longo prazo (EBENEZER *et al.*, 2018 e BHATTACHARYA *et al.*, 2020).

A modelagem dinâmica da cobertura ganhou impulso nas últimas décadas devido à ampla disponibilização de dados de sensoriamento remoto e ao desenvolvimento e popularização de plataformas de geoprocessamento. Os modelos dinâmicos tornaram-se mais sofisticados com a implementação de abordagens utilizando autômatos celulares, lógica *fuzzy* e inteligência artificial, como redes neurais, sistemas multi-agentes (PAEGELOW e CAMACHO, 2008) e algoritmos genéticos. A modelagem dinâmica permite simular fenômenos, tornando-se um campo de pesquisa promissor, que vem recebendo especial atenção por parte de pesquisadores de diversas áreas. A importância da simulação advém de sua capacidade de multiplicar a nossa imaginação individual, permitindo que grupos de pessoas compartilhem, através de uma experiência comum, modelos mentais de certa realidade, independentemente de sua complexidade (LÉVY, 1998).

Estudos do uso do terra e cobertura da terra do inglês *Land Use and Land Cover* (LULC) são essenciais para a compreensão de muitos fenômenos atualmente observados, especialmente sobre as mudanças climáticas (LI *et al.*, 2017; TASSER, LEITINGER, e TAPPEINER, 2017), biológica (MOREIRA *et al.*, 2012; SONG e DENG, 2017), perturbações ambientais (KIM *et al.*, 2017), fragmentação da paisagem (NURWANDA, ZAIN, e RUSTIADI, 2016), impactos humanos na saúde (PATZ e OLSON, 2017), crescimento das áreas urbanas (DU & HUANG, 2017), geologia e mineração (ASAMOAH *et al.*, 2017, BASOMMI *et al.*, 2016), hidrologia e bacias hidrográficas (DURASAMY *et al.*, 2018), agricultura (EJARO e ABDULLAHI, 2013), silvicultura e vida selvagem (HASSAN, 2016; KHAN *et al.*, 2016), evolução urbana e geografia regional (OKOLI *et al.*, 2016), mudanças climáticas e ecologia ambiental (WENG, 2016), entre outros.

Os modelos de transição *Land Use Land Cover* (LULC), por outro lado, tipicamente tentam prever quando e com que frequência essas mudanças irão ocorrer. Modelos de Previsão da terra como o CA MARKOV do IDRISI, CLUE-S/Dyna-CLUE DYNAMICS EGO, e *Land Change Modeler* vêm sendo usados pelos pesquisadores em todo o mundo para várias finalidades.

Vários modelos de previsão espaço-temporal, tais como o modelo de cadeia de Markov (MC), o modelo de conversão do uso do solo e seus efeitos (CLUE), foram desenvolvidos nos últimos anos para prever o LULC e suas detecções de mudança (ALAM *et al.*, 2021). Entre as várias abordagens de modelagem dinâmica espaço-temporal, o modelo CA tem sido frequentemente utilizado para a análise da mudança do uso do solo.

Os modelos simplificam de forma útil o complexo conjunto de forças socioeconômicas e biofísicas que influenciam a taxa e os padrões espaciais de mudança ocupação do solo e permitem a estimativa dos impactos de mudanças na cobertura do uso do solo (VERBURG, 2012).

A literatura pesquisada identifica o uso de modelos dinâmicos para diversas atividades de alteração do uso solo, mas quase não contempla o estudo da dinâmica de cobertura como possível fator as ocupações irregulares. Alguns autores enfatizaram o comportamento da influencias de rodovias na dinâmica econômica e social dos territórios cortados pelas mesmas.

Nesta tese pretende-se investigar as ocupações irregulares às margens das rodovias por intermédio da dinâmica da cobertura do solo por meio da identificação das principais tendências de mudanças ao longo do histórico recente de transformações da paisagem e da simulação de mudanças futuras nas rodovias estudadas e já citadas para validação da metodologia.

A pesquisa que embasa esta Tese procura apresentar uma metodologia para estudar o comportamento espacial das ocupações irregulares baseado nas dinâmicas de uso e cobertura do solo para um período estudado, baseado em técnicas de desagregação espacial, com a intenção de avaliar se se dados explicam a ocorrência das ocupações irregulares sobre a faixa de domínio.

Para isso, a pesquisa se compromete em avaliar apenas os dados secundários oficiais numa escala superior à que foi disponibilizada por instituições governamentais,

contabilizada em uma zona fonte (unidade territorial de maior área e nível de agregação) para uma zona alvo (unidade territorial de menor área e nível de agregação), o que pode ou não envolver a utilização de dados auxiliares com a intenção dos mesmos darem subsídios às políticas públicas de monitoramento das ocupações irregulares.

Estes estudos pretendem investigar a correlação entre os dados relativos à ocupação do solo e outros fatores que afetam a distribuição da população. Geist e Lambin (2001) apontam que as atividades humanas que interferem no uso e cobertura da terra são reflexos de fatores sociais e econômicos (crescimento dos mercados, efeitos do processo de urbanização e industrialização), tecnológicos (mecanização do campo e aumento da produtividade), culturais (valores, crenças, simbolismos), políticos e demográficos (pressão de aumento, densidade, ciclo de vida da população). A ecologia da paisagem enfatiza a interação entre os padrões espaciais e processos ecológicos, isto é, as causas e consequências da heterogeneidade espacial em várias escalas (TURNER e GARDEN 2015).

Nesse sentido, a investigação contribui para necessidade da gestão eficiente dessas áreas, utilizando a modelagem da dinâmica espacial para projetar cenários baseados em dados socioeconômicos e ambientais e de mudança do uso solo em escala regional ou local. A pesquisa procura estudar potenciais cenários de mudanças do uso usando a modelagem da dinâmica espacial, identificando as áreas de alto risco e vulneráveis a ocupações irregulares sobre as faixas de domínio.

A proposta da metodologia de análise das ocupações irregulares pode ajudar ao DNIT a atender em parte ao Decreto nº 8.376/2014 que transferiu ao DNIT a responsabilidade de administração patrimonial dos imóveis da União correspondentes:

- Às faixas de domínio das rodovias federais integrantes do Sistema Nacional de Viação (SNV), enquanto necessários ou vinculados às atividades do DNIT;
- Às áreas que vierem a ser desapropriadas pelo DNIT, em nome da União, para implantação de rodovias; e
- Às áreas efetivamente utilizadas ou necessárias para o funcionamento das sedes das unidades locais e superintendências regionais do DNIT. (“Programa Federal de Faixas de Domínio - PROFAIXA”)

As ocupações humanas no entorno das rodovias têm causado mudanças substanciais na cobertura e uso do solo. Esse padrão de ocupação tem sido impulsionado principalmente pelo desenvolvimento econômico e social que as rodovias trazem para realidade local destas regiões. Essas infraestruturas vêm induzindo a expansão urbana para áreas suscetíveis, tornando tais locais mais vulneráveis às ocupações irregulares. Os resultados desta tese podem demonstrar que é possível monitorar de forma inteligente, o entorno das regiões vulneráveis a partir do uso de políticas públicas que melhorem os índices e indicadores associados às iminências dessas ocupações.

A pesquisa busca encontrar as relações espaço-temporais que motivam as ocupações irregulares, a partir de dados de cobertura do solo e variáveis ou indicadores fornecidos por instituições públicas. Esses achados podem ajudar com a crescente demanda por integração de instrumentos de planejamento do uso do solo e os interesses privados dos setores da construção civil e imobiliário. Essas relações podem ainda ajudar na tomada de decisão sobre as revisões dos planos diretores municipais e na elaboração das leis de uso e ocupação do solo.

Espera-se, portanto, mostrar que é essencial o fortalecimento de políticas públicas e do processo de planejamento, integrando os governos federais, estaduais e locais, com ações da sociedade civil, para que haja uma tendência de declínio das ocupações irregulares sobre o território das faixas de domínio. Os resultados deste estudo fornecem informações valiosas na escala local sobre o desenvolvimento urbano e o deslocamento de populações que ocupam as faixas de domínio das rodovias estudadas, por meio da simulação da dinâmica espacial dos padrões de uso e ocupação da terra fornecida pela pesquisa.

Diante da problemática e justificativa exposta, esta Tese busca preencher a lacuna científica do desenvolvimento e aplicação de modelos dinâmicos oriundos das geotecnologias para previsão de ocupações irregulares em faixas de domínio rodoviárias, considerando variáveis socioeconômicas e de uso do solo e cobertura da terra.

1.2 Hipótese

O controle e gestão estratégica das faixas de domínio rodoviárias podem ser apoiados mais eficientemente a partir da classificação de segmentos rodoviários por indicadores de suscetibilidade a ocupações irregulares modelados pelas tendências de mudanças simuladas no uso e cobertura ocupação da terra (LUCC).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver metodologia para modelar e validar o comportamento das ocupações irregulares das faixas de domínio rodoviárias, a partir da compreensão da dinâmica do uso e cobertura do solo nas áreas lindeiras, buscando com isso melhor prever e monitorar essas ocupações marginais e subsidiar ações estratégicas com prioridade nas áreas mais sensíveis ao fenômeno.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar fatores críticos que produzem a iminência de ocupações irregulares;
- Construir cenários futuros baseados nos fatores identificados na pesquisa e validá-los com os dados reais;
- Desenvolver uma metodologia de análise espacial que considere as especificidades dos dados geoespaciais das margens das rodovias que atendam às necessidades das ações de monitoramento das faixas de domínio;
- Avaliar conjuntamente os mapas de cobertura do solo, as matrizes de transição, pesos de evidências e os mapas de probabilidade de transição para elucidar as modificações de cobertura do solo para classe ocupação Irregular.
- Sugerir mecanismos como segmentação da rodovia baseado nos fatores de ocorrência de invasão de faixa de domínio

1.4 Estrutura da Tese

A presente tese está estruturada em seis capítulos:

O **primeiro capítulo** citado anteriormente constitui-se da identificação do problema com a apresentação da problemática, justificativa, hipóteses e objetivos.

O **segundo capítulo** estuda os aspectos legais e técnicos das faixas de domínio de rodovias, oferecendo primeiramente um arcabouço sobre a interpretação das leis, decretos e manuais, no sentido estrito da palavra no conhecimento jurídico, técnico e científico. A partir disso, são discutidos os aspectos sobre a delimitação da faixa de domínio sobre o viés do espaço geográfico.

O **terceiro capítulo** mostra o que representa a gestão territorial das faixas de domínio. De início, propõe-se uma discussão sobre como acontece a gestão da malha rodoviária do Brasil, pontuando como acontece a normalização e normatização do Sistema Nacional de Viação – SNV, apresentando suas conquistas e limitações, destacando o Sistema de Referencia Linear- SRL, adotado no Brasil e nos Estados Unidos. Dessa forma o capítulo introduz o conceito de mudança no uso do solo e mudança na cobertura do solo. Na última parte do capítulo se caracteriza o que se entende por ocupação irregular sobre a faixa de domínio.

O **quarto capítulo** apresenta toda a conceitualização sobre modelos dinâmicos de uso e cobertura da terra, abordando as teorias que estão por trás desse tipo de modelagem, como os Autômatos Celulares – CA, assim como a compressão dos padrões e configuração dos modelos. Em seguida é apresentada a formulação matemática e a sistemática das regras de transição/mudanças e metodologia.

No **quinto capítulo** é apresentado o modelador de mudança da terra do Inglês “*Land Change Modeler (LCM)*”, como instrumento para estudar o comportamento do uso e cobertura do território lindeiro à rodovia. Procurando entender por que algumas classes de cobertura são mais propícias a se tornarem ocupações irregulares em estágios futuros da

dinâmica e ocupação do território. Na última sessão do capítulo é demonstrado como o modelo LCM é parametrizado, calibrado, simulado e validado.

No **sexto capítulo** é apresentado as particularidades das metodologias que serão aplicadas nas rodovias estudadas. Abordados os dados e os métodos de parametrização (categorização) das possíveis variáveis que influenciam na mudança de classe, a partir de conceitos e indícios presentes na literatura sobre a calibração e validação do modelo LCM. Buscando com isso, propor métodos de identificação de variáveis correlacionadas a mudança de cobertura da terra sobre a ótica das ocupações irregulares, possibilitando um arcabouço científico para criar mapas síntese de riscos de ocupação (susceptibilidade a ocupações irregulares) baseados na transição, na tipologia da variável e na localização dos usos dos territórios lindeiros às rodovias.

O **capítulo seis** consiste na estruturação metodológica das etapas referentes à modelagem em LCM do uso e cobertura da terra das três rodovias (BR-408/PE, BR-104/PE e BR-101/PE), que inclui a unidade de espaço, a definição das bases de dados disponíveis utilizadas e a identificação das técnicas de desagregação da unidade espacial para agregação em outra unidade de interesse (Grade Estatística)/Pixel ou divisão política. Em seguida é a apresentada análise exploratória dos dados sobre a ótica clássica e espacial do fenômeno num instante de tempo. Por fim é aplicado a modelagem LCM nas variáveis com significância estatística para o fenômeno, sobre diferentes abordagens de parametrização, calibração e validação do modelo.

No **capítulo sete** são apresentados os resultados e conclusões da proposta metodológica adotada para as três rodovias, visando o aperfeiçoamento da metodologia para futuras aplicações a outras rodovias. E nas considerações finais são apresentados as perspectivas futuras do aperfeiçoamento desta metodologia.

2. FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL DO OBJETO ESTUDADO

As infraestruturas rodoviárias no Brasil carecem de adequada manutenção, dentre as quais incluem-se as faixas de domínio das rodovias. Essas por sua vez, representam um espaço que abrange toda a infraestrutura instalada de uma rodovia, suas obras complementares e sua faixa de proteção.

A Faixas de domínio representam espaços de segurança reservados com a finalidade de que aqueles que estão em volta da rodovia não interajam com sua operação, bem como, para que a rodovia não interfira nas atividades dos habitantes lindeiros (OLIVEIRA, 2018). Normalmente é cercada para evitar o trânsito de animais de grande porte. Além disso, faz-se essa reserva prevendo uma possível obra de ampliação da rodovia, como duplicação ou implantação de terceiras faixas. No entanto, na prática, após a construção de rodovias no Brasil, normalmente, as faixas laterais remanescentes de no mínimo 30 até 80 metros de largura (BRASIL, 2008), têm recebido pouca ou nenhuma atenção por parte do poder público pela falta de gestão, planejamento e manutenção.

Assim, no Brasil, ao longo de décadas, as faixas de domínio, patrimônio público fundamental à segura operação rodoviária, têm sido objeto de ocupações irregulares, públicas e privadas, das mais variadas formas, desde a implantação de acessos (interseções) às propriedades adjacentes, até a construção de edificações para uso industrial, comercial e habitacional.

2.1 Definição sobre a Faixa de Domínio

A Lei nº 9.503 de 23 de setembro de 1997, que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro – CTB traz a seguinte definição para faixa de domínio no seu artigo 50:

“superfície lindeira às vias rurais, delimitada por lei específica e sob responsabilidade do órgão ou entidade de trânsito competente com circunscrição sobre a via” (BRASIL, 1997).

Já o manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais - IPR-706 estabelece o seguinte conceito de faixa de domínio:

“área compreendendo a rodovia e suas instalações correlatas e faixas adjacentes legalmente delimitadas, de propriedade ou sob domínio ou de posse do órgão rodoviário e sobre a qual se estende sua jurisdição. Deve ser prevista com largura suficiente para conter as instalações necessárias aos serviços de controle da operação da rodovia e permitir sua conservação, proteção e futura expansão” (BRASIL, 1999).

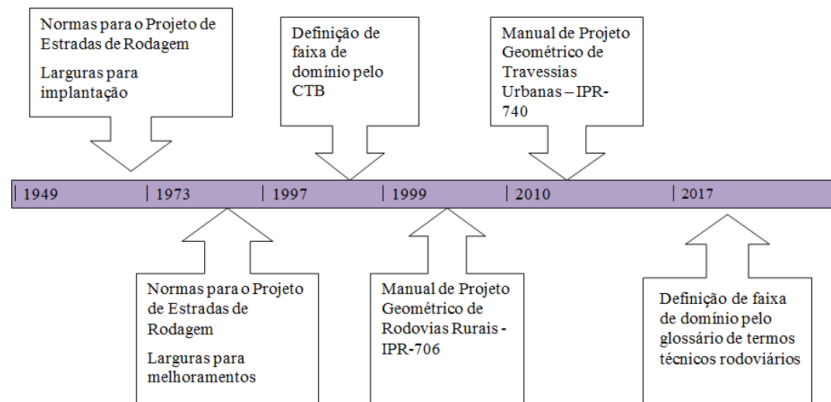
Além desses, outro normativo técnico que define o termo de Faixa de Domínio é o Glossário de Termos Rodoviários do DNIT, que a conceitua como:

“base física sobre a qual assenta uma rodovia, constituída pelas pistas de rolamento, canteiros, obras de arte, acostamentos, sinalização e faixa lateral de segurança, até o alinhamento das cercas que separam a estrada dos imóveis marginais ou da faixa do recuo” (DNIT, 2017).

Essas áreas são usadas para segurança ou para possíveis obras como alargamentos e duplicações da rodovia. Dentro da faixa de domínio é proibido todo tipo de comércio, construções e fixação de placas que não sejam as de orientação do tráfego. Além dela, existe uma faixa não edificante de 15 metros, na qual os proprietários lindeiros não podem construir.

Segundo Batista (2019), o termo faixa de domínio é abordado em sete normativos ao longo dos anos, conforme linha do tempo elaborada pelo autor. (Figura 1)

Figura 1 - Linha do Tempo dos Normativos brasileiros relacionados à Faixa de Domínio.



Fonte: Batista (2019)

A área *non aedificandi* é contígua à faixa de domínio e está disposta atualmente na Lei Federal de Parcelamento do Solo Urbano (Lei 6.766/79), no seu art. 4º, a saber:

Art. 4º. Os loteamentos deverão atender, pelo menos, aos seguintes requisitos: (...) III - ao longo das águas correntes e dormentes e das faixas de domínio público das rodovias e ferrovias, será obrigatória a reserva de uma faixa não-edificável de 15 (quinze) metros de cada lado, salvo maiores exigências da legislação específica;

As faixas de domínio das rodovias são necessariamente bens públicos (de uso comum do povo, nos termos do Art. 99 do CC/02) e, como tais, não são passíveis de usucapião, por força, sobretudo, do disposto nos artigos 183, § 3º, e 191, parágrafo único, ambos da Constituição Federal. Para a construção de novas rodovias é necessário desapropriar para estabelecer a faixa de domínio. Uma indenização será devida, porque haverá perda da propriedade. Além disso, nessa área só se pode fazer o que for permitido pelos órgãos/entidades estatais pertinentes, caso contrário será invasão de área pública, insuscetível, por exemplo, de ensejar direito possessório contra o Estado.

2.2 Aspectos Técnicos e Legais da Faixa de Domínio.

Os projetos de rodovias federais são desenvolvidos com base no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais – IPR 706 (BRASIL, 1999) e no Manual de Projetos Geométricos de Travessias Urbanas (BRASIL, 2010a). A faixa de domínio é definida conforme a classe funcional e o relevo em que a rodovia se enquadra. Esses normativos foram desenvolvidos com base, principalmente, nas diretrizes de projetos norte-americanos da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO. Publicado em 1999, o principal manual Brasileiro (IPR 706) até o presente não foi atualizado. Vale ressaltar que o IPR 706, explicita apenas a largura da faixa de domínio para melhorias em estradas já existentes. Para novas estradas o normativo de referência é a “Normas para Projetos de Estradas de Rodagem”, publicado em 1949, reeditada em 1973.

O IPR 71 é uma instrução ambiental que objetiva o tratamento paisagístico e ambiental das faixas de domínio e lindeiras das rodovias federais, mediante a implantação de arborização adequada, de forma a harmonizar o campo visual e colaborar para que a rodovia se integre na paisagem e transmita conforto e segurança aos usuários (BRASIL, 2005a). Essa mesma instrução destaca ações ambientais relativas à travessia de uma rodovia em zona urbana. Destaca ainda, as preocupações ambientais presentes nos casos de travessias urbanas, que consistem na mitigação ou eliminação das adversidades geradas pelo conflito espaço viário versus espaço urbano, caracterizadas pelos seguintes impactos: modificações no uso e ocupação do solo; segregação urbana; intrusão visual; poluição atmosférica e sonora e vibração. (BRASIL, 2005a). Com isso de forma resumida, a instrução fala das distorções no uso e ocupação do solo que dizem respeito aos impactos causados por novos usos e ocupações implantados sem planejamento ao longo da rodovia.

Também é possível citar o Manual de Ordenamento do Uso do Solo nas Faixas de Domínio e Lindeiras de Rodovias Federais do DNIT, que menciona o impacto negativo do processo de favelização, ou ocupação desordenada das Faixas de Domínio ou lindeiras, que ocorre na implantação e /ou durante a operação rodoviária (BRASIL, 2005).

A legislação do DNIT acompanha diversos documentos que realizam uma abordagem completa da estrutura de funcionamento do órgão e de que forma esse deve operar e funcionar perante as obrigatoriedades impostas. A Lei Nº 10.233/2001 trata da criação do DNIT que, de acordo com o artigo 79 dessa mesma Lei, estabelece o órgão como pessoa

jurídica voltada ao Direito Público, submetida ao regime autárquico vinculado ao Ministério dos Transportes.

No aspecto jurídico sobre a temática das faixas de domínio, o Artigo 99 do Código Civil, descreve que existem no Brasil três tipos de bens públicos: bens públicos de uso comum, bens públicos de uso especial e bens públicos dominiais. Os bens públicos de uso comum são de utilização da população, usados livremente e sem necessidade de autorização do poder público como, por exemplo, praças e rua e avenidas. Os bens públicos de uso especial são destinados às funções públicas, com utilização restrita e não podem ser utilizados livremente pela comunidade como, por exemplo, os edifícios onde se instalam órgãos públicos. Por fim, os bens públicos dominiais são patrimônio de pessoas jurídicas de direito público, como objeto de direito pessoal ou real de cada uma dessas entidades e utilizados para fins econômicos, como é o caso de imóveis públicos desocupados, sem destinação pública específica (BRASIL, 2002). Nesse conceito, as faixas de domínio são consideradas bens públicos de uso especial, pois apesar de públicas não podem ser ocupadas sem autorização. A Figura 2 ilustra graficamente o que representa uma faixa de domínio.

Figura 2 - Ilustração com as faixas de domínio e Áreas Non Aedificandi



Fonte: <https://www.daer.rs.gov.br/faixa-de-dominio>

As *Áreas Non Aedificandi*, diferentemente das Faixas de Domínio, são as faixas de terra com largura de 15 (quinze) metros, contadas a partir da linha que define a faixa de domínio da rodovia (ALEPE LEGIS, 2020). Segundo o Mendes (2001), as Faixas de Domínio são consideradas áreas de terras determinadas legalmente por decreto de Utilidade Pública para uso rodoviário, sendo ou não desapropriadas, cujos limites são estabelecidos em conformidade com a necessidade prevista no projeto de engenharia rodoviária. Quando o Estado decide abrir determinado espaço para a construção de uma rodovia, o faz mediante a publicação de um Decreto de Utilidade Pública, que declarará aquele trecho como sendo de utilidade pública e no qual estará prevista a largura máxima da faixa de domínio (OLIVEIRA, 2009).

Com isso, a faixa de domínio é parte integrante do espaço viário, cujo objetivo é o de garantir a continuidade das funções operacionais, o alargamento de pista e o aumento da segurança rodoviária. Seja qual for a classe da rodovia, sua segurança está relacionada à sua faixa de domínio, a qual deve ser dotada de uma área marginal de escape, sem obstáculos físicos e irregularidades do terreno lateral. Dessa forma, a área adjacente à rodovia ficará

preparada para a invasão de veículos desgovernados, por ocasião da necessidade de uma manobra brusca, uma falha mecânica ou ocasionada pelo motorista usuário da via (REZENDE, 2007).

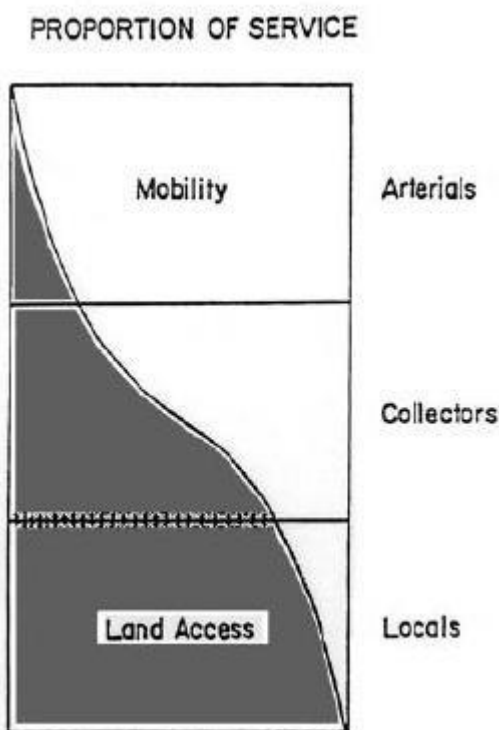
No Brasil ao longo de décadas, as faixas de domínio, patrimônio público fundamental à segura operação rodoviária, têm sido objeto de ocupações irregulares, públicas e privadas, das mais variadas formas. Desde a implantação de acessos (interseções) às propriedades adjacentes, até a construção de edificações para uso industrial, comercial e habitacional. Ao longo das rodovias no Brasil, é comum encontrar muitas vezes, moradias, estabelecimentos comerciais, placas e acesso irregulares que comprometem a segurança dos motoristas e a implantação de obras de requalificação e ordenamento.

Aspectos Técnicos da Delimitação das Faixas de Domínio.

Nos Estados Unidos, o estabelecimento da largura das faixas de domínio deve abranger a pista construída, a drenagem e a manutenção adequadas de uma rodovia, sendo uma parte muito importante do projeto de engenharia. Uma largura apropriada e ampla permite a construção de declives suaves, resultando em maior segurança para o motorista e proporcionando uma manutenção mais fácil e econômica (AASHTO, 2001).

Para a definição da faixa de domínio para a AASHTO, um fator significativo é a definição da categoria funcional de uma rodovia. Aliada a isso, tem-se o papel duplo que a rede rodoviária desempenha no fornecimento (1) de acesso à propriedade e (2) Mobilidade de viagem (Figura 3), sendo assim, o grau de acesso e o nível de mobilidade determinam a classificação da rodovia, o que se reflete na definição da Faixa de Domínio.

Figura 3 - Classificação das vias segundo o grau de acesso e mobilidade



Fonte: AASTHO (2001).

Ainda segundo a AASTHO (2001), para fins de projeto, a previsão da população é essencial. Isto porque, a largura da Faixa de Domínio para o desenvolvimento completo de uma via, é influenciada pelas demandas de tráfego e uso do solo, além do relevo, custo de desapropriação, projetos de interseção e possibilidade de expansão, devendo conter as medidas necessárias para vários elementos transversais como: pista principal canteiros, pistas auxiliares, bordas, “clear zones”, instalações de drenagem e, quando necessário muros de arrimo.

No Brasil, o documento que estabelece os critérios para definição da largura das faixas de domínio foi publicado em 19 de janeiro de 1949, reeditado em 1973, denominado de “Normas para o Projeto de Estradas de Rodagem”. Essa referência técnica, ainda vigente, dispõe que nas zonas rurais, a largura mínima da faixa de domínio será de 10 m, a partir das cristas dos cortes ou dos pés dos aterros e não podem ser inferiores ao estabelecido na Tabela 1 (BRASIL, 1973).

Tabela 1 - Parâmetros de Projetos de Rodovias

Classes	Largura Total da Faixa de Domínio		
	Relevo Plano (m)	Relevo Ondulado (m)	Relevo Montanhoso (m)
I	60	70	80
II	30	40	50
III	30	40	50

Fonte: Adaptado, Brasil (1973).

Esse normativo prevê, especificamente para os trechos urbanos ou com grande potencial de urbanização em futuro próximo, que sempre que possível economicamente, a Faixa de Domínio deverá ter largura suficiente para a construção de duas vias marginais para atender ao tráfego local, sendo uma de cada lado e fisicamente separada da pista de rolamento principal (BRASIL, 1973).

O normativo ainda relata o acréscimo de áreas para a construção das obras necessárias à eliminação das interferências de tráfego nos cruzamentos e entroncamentos com outras estradas. Além disso, o normativo estabelece como excepcionalidade, nas situações de elevado custo dos terrenos ou imóveis a desapropriar, abrangidos pela faixa de domínio em projetos de melhoramento de rodovias, que pode a largura ser reduzida até os mínimos previstos na Tabela 2, desde que justificada a redução em cada caso (BRASIL, 1973).

Tabela 2 - Largura da faixa de domínio em casos especiais de melhoramentos de estradas

Número de faixas de tráfego	Largura da FD em Zonas urbanas ou proximamente urbanas (m)	Largura da FD em Zonas rurais (m)
2	20	30
4	40	60

Fonte: Adaptado, Brasil (1973)

Apesar das importantes ponderações a respeito da determinação da largura da faixa de domínio em contextos urbanos, o normativo em referência, segundo Batista (2019) não especifica e mensura os critérios para delimitação dessas larguras, aparentemente deixando margem para flexibilização nas dimensões.

Um dos grandes desafios do DNIT é o mapeamento da Faixa de Domínio de toda

extensão das Rodovias Federais, assim como, disponibilizar dados e informações organizadas de acesso público como: projeto geométrico, delimitação espacial da faixa de domínio da rodovia, documentos de desapropriação, avaliação do imóvel que originou a faixa de domínio e registro imobiliário.

O exemplo mínimo a se alcançar seria parecido com o Sistema de Gestão de Terras do Departamento de Transporte de Minnesota que possui uma unidade de Mapeamento que realiza a manutenção e o desenvolvimento de mapas de faixa de domínio do Estado de Minnesota (MnDOT, 2019). O Departamento de Transporte de Minnesota disponibiliza para a sociedade um Sistema de Informação de Terras que apresenta todas as infraestruturas geodésicas, topográficas e cartográficas necessárias para reconstituição dos limites das faixas de domínio e dos imóveis lindeiros às rodovias como: Rede Geodésica; Ferramentas e tecnologias de Pesquisa; Fotografias Aéreas da área, assim como pesquisas de terras públicas nos Estados Unidos (MnDOT, 2019).

No setor rodoviário, a atividade de cadastro e integração das informações é tarefa contínua, podendo ser realizada com a utilização de Sistemas de Referenciamento Linear (SRL) e/ou de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). No Brasil, assim como no Estado de Minnesota é adotado um Sistema Referência Linear - SRL, do inglês *Liner Referencing System* (LRS), que permite a espacialização de forma dinâmica das informações (KIEL *et al.*, 1999; PAPTAEODOROU *et al.*, 2008).

Um Sistema de Referência Linear (SRL) é um sistema em que os recursos (pontos ou segmentos) são localizados por uma medida ao longo de um elemento linear. O SRL pode ser usado para referenciar eventos para qualquer rede de recursos lineares, por exemplo, estradas, ferrovias, rios, tubulações, linhas elétricas e telefônicas, redes de água e esgoto. Um evento é definido no SRL por um ID de rota e uma medida. Uma rota é um caminho na rede, geralmente composto de mais recursos no mapa de entrada. Os eventos podem ser pontos ou linhas (segmentos) (GRASS, 2019).

Os SRL são baseados na determinação unidimensional de um ponto desconhecido considerando uma referência, direção e distância conhecidas. Os SIG são baseados em geometrias bidimensionais e apresentam conceitos, algoritmos e modelos de dados próprios, sendo ferramentas indispensáveis no desenvolvimento dos processos de transportes. SRL e SIG são complementares tendo suas vantagens e desvantagens

particulares. O desafio por décadas tem sido desenvolver práticas e modelos de dados genéricos para SRL.

Os SRL são utilizados para descrever e localizar objetos ao longo das rotas das redes de transportes, muito antes do uso de tecnologias de SIG e da existência de computadores, tendo sua origem nos primórdios da civilização (BARNARD, 2008; PAULSON, 2005). Esse sistema está baseado na determinação linear ou unidimensional de um ponto de interesse com relação a um ponto de referência, seguindo uma direção e distância conhecidas ao longo de uma dada via (DEMIREL, 2002).

O Sistema de Referência Linear (SRL) é o que constitui o Sistema Nacional de Viação – SNV, no Brasil, instituído pela Lei 12.379, de 6 de janeiro de 2011. O SNV é constituído pela infraestrutura física e operacional dos vários modos de transporte de pessoas e bens, sob jurisdição dos diferentes entes da Federação. Compreende os subsistemas: Rodoviário, Ferroviário, Aquaviário e Aeroviário (BRASIL, 2011).

Os departamentos de transportes utilizam dados espaciais para localizar ou descrever eventos em um sistema de transportes. Qualquer feição ou evento de transporte pode estar associado a um ou mais dados de referência espacial, de dimensão linear (1D) ou superior (2D ou 3D), e um ou mais métodos de medição (por exemplo, fotogrametria ou GPS). As feições ou eventos estão associados a diferentes ordens de medida, isto é, medidas diretamente de acordo com os parâmetros do sistema ou medidas em relação a um ou mais elementos de referência (FEKPE *et al.*, 2003).

O termo referenciamento linear surgiu a partir de aplicações de engenharia onde era preferível localizar um ponto ao longo de uma feição linear (estradas), fazendo referência a algum local bem definido, ao invés de usar os sistemas de coordenadas geográficas clássicos. A determinação da localização através de referenciamento linear difere dos tradicionais sistemas de referência geodésicos e cartográficos porque a entidade de base utilizada para a medição não é o elipsoide terrestre, mas sim uma feição linear ou um conjunto de feições lineares organizadas em uma rede (CURTIN, NICOARA e ARIFIN, 2007).

Pode-se destacar a utilização comum de três elementos básicos para o referenciamento linear das informações: a identificação de um ponto conhecido (sendo marcos de referência, placas de sinalização, interseções, etc.); uma direção (por exemplo,

da cidade A até a cidade B); e uma medida a partir de um ponto de referência.

Lewis (2000, p. 97) afirma que 70% dos dados de um departamento de transportes (por exemplo, pontes, acidentes, etc.) estão vinculados a uma localização geoespacial. De fato, a importância da espacialização das informações de transporte é atestada em trabalhos posteriores, como Butler (2008) e FHWA (2014b). Lewis afirma ainda que SRL é a principal maneira de identificar a localização desses dados e que a localização é o elemento crucial para a integração desses dados. O autor complementa que o SRL está baseado em um deslocamento unidimensional em uma rede predefinida, salientando que, em princípio, é um dos casos mais simples, ainda que na prática possa ser espacialmente e analiticamente complexo.

A criação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE e as diversas exigências previstas nos dados/informações gerados pelos órgãos públicos federais têm impulsionado recentes ações no setor de transportes. Como principal ação pode-se citar a iniciativa do Plano Estratégico de Geoinformações do Sistema Transportes (PEGEO), programa coordenado pelo Ministério dos Transportes, incluindo a estruturação da Infraestrutura de Dados Espaciais do Setor de Transportes (IDE-T) (BRASIL, 2013)

Esforços nesse sentido também são desenvolvidos no DNIT, mais especificamente pelo seu Setor de Geotecnologias Aplicadas (DNITGeo) (BORGES e FAZAN, 2017; DNIT, 2017). O DNITGeo tem como objetivos elaborar, estruturar e manter a base de dados geográficos do DNIT, incluindo o desenvolvimento e gestão do cadastro georreferenciado do Sistema Federal de Viação, bem como desenvolver a sua própria Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE-DNIT), além de outras incumbências (estudos e projetos, faixa de domínio, fiscalização de contratos referentes a dados geoespaciais e mapas multimodais).

O SNV foi constituído pela Lei nº12.379/2011 (BRASIL, 2011) e é composto pelo Sistema Federal de Viação (SFV) e pelos sistemas de viação dos estados, do Distrito Federal e dos municípios. O SFV é construído por quatro subsistemas: rodoviário, ferroviário, aquaviário e aeroviário. A administração da infraestrutura do SFV, sob a jurisdição do Ministério dos Transportes, é delegada ao DNIT através da Lei Federal nº 10.233/2001 (BRASIL, 2001). Entre as diversas atribuições do DNIT na área rodoviária cabe destaque ao estabelecimento de padrões, normas e especificações técnicas para

programas e projetos rodoviários como também o desenvolvimento e gestão de cadastro do SNV.

O Sistema Rodoviário Estadual (SRE) relaciona as rodovias divididas por trechos, com dados como: código, descrição do local do trecho, quilômetro inicial e final, extensão (em km), classe da rodovia, situação física, tipo de revestimento, identificação de trecho coincidente e concessão rodoviária. Este conjunto de informações rodoviárias interdependentes é estabelecido seguindo os padrões definidos através do Roteiro Básico para Sistemas Rodoviários Estaduais (DNIT, 2006).

A normativa DNIT (2006) não prevê a forma de aquisição das informações, inventário de dados, nem a indicação de um sistema (tipo SRL) que possibilite a integração das informações constantes no SRE com as demais informações de infraestrutura viária tais como: dispositivos de sinalização; drenagem e segurança; obras de arte especiais; acidentes rodoviários, eventuais bloqueios de pista, volume de tráfego, etc. Com relação à precisão nas medições da malha rodoviária a serem cadastradas no SRE, a normativa DNIT (2006) especifica que as extensões e localizações dos trechos rodoviários devam ser expressas em quilômetros, com resolução numérica de 0,1 km (100 metros). Já os dados relativos às obras e projetos rodoviários devem possuir uma resolução submétrica. A precisão não é especificada, mas fica definida implicitamente pelas resoluções numéricas acima, apesar de estar relacionada com a técnica empregada para aquisição das informações e não apenas ao arredondamento destes valores.

Elemento linear (EL) é o termo geral que abrange tudo o que pode ser medido utilizando referenciamento linear. Isso inclui feições previstas a série de normativas ISO 191nn, geometrias e topologias lineares. O método de referenciamento linear (MRL) é a forma e unidade de medida em que as medições são realizadas ao longo de um elemento linear. Existem inúmeros MRL em uso hoje, porém a normativa agrupa estes métodos em três tipos: absolutos, relativos e interpolativos.

Em MRL absolutos a medição de distância é realizada a partir do início do elemento linear em uma única direção, utilizando uma determinada unidade de medida, podendo ser milhas (milhagem), quilômetros (quilometragem), metros (metragem) ou múltiplos de 100 m (hectometragem), como o caso dos mais comuns (Figura 4).

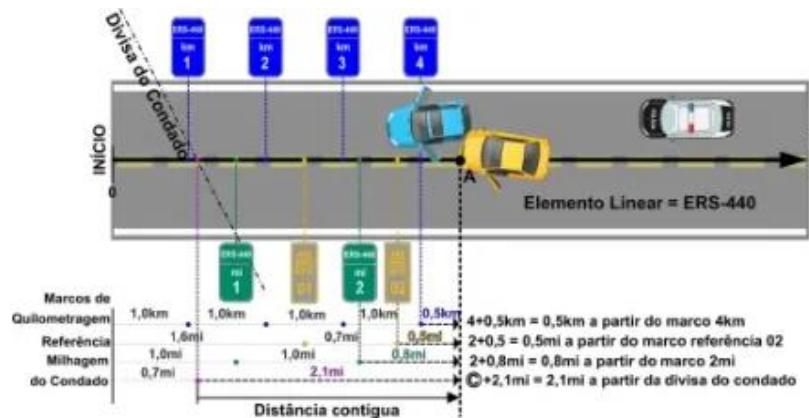
Figura 4 - Métodos de Referenciamento Linear Absolutos



Fonte: Adaptada de Scarponcini (2002) e ISO (2012a)

Em MRL relativos, a medição de distância é realizada a partir de um ponto de referência conhecido sendo que este ponto não precisa estar no início do elemento linear. Os principais tipos são: marco de milhagem, marco de quilometragem, marco de referência, milhagem na região, cruzamento e seção de controle (Figura 5).

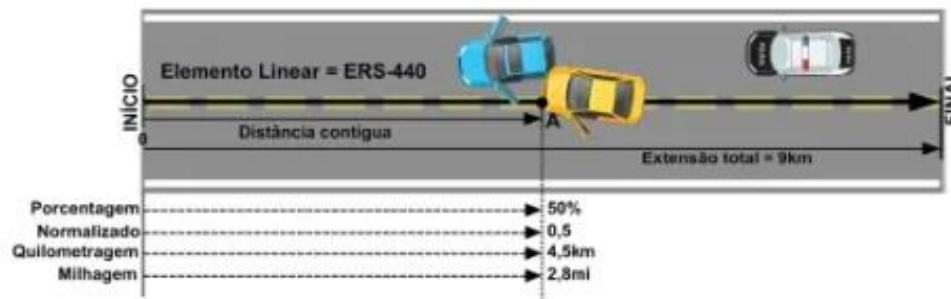
Figura 5 - Métodos de Referenciamento Linear Relativos



Fonte: Adaptada de Scarponcini (2002) e ISO (2012a)

Em MRL interpolativos, a distância é medida como uma fração do comprimento total do elemento linear. Como principais tipos podem-se citar porcentagem e o tipo normalizado ou fracionário. Como exemplo destes métodos a partir da mesma ocorrência dos exemplos anteriores para a utilização de um MRL interpolativo de porcentagem a distância medida a partir do início do elemento linear até o acidente (Figura 6).

Figura 6 - Métodos de referenciamento Linear Interpolativos



Fonte: Adaptada de Scarponcini (2002) e ISO (2012a)

A expressão de localização proposta por Scarponcini (2002) é denominada na normativa ISO 19148 como “expressão de posição” (para consistência com a ISO 19133:2005 (ISO, 2005)), que trata de um método formal para descrever a localização de um evento. A expressão de posição fornece o contexto para a expressão de distância, incluindo o MRL utilizado, bem como o elemento linear ao longo do qual a distância é medida:

Equação 1

$$\lambda = (\mu, \varepsilon, \delta)$$

Onde λ é uma expressão de posição composta por um MRL (μ) um elemento linear (ε) e uma expressão de distância (δ) cuja sintaxe e a semântica são indicadas por (μ). A normativa ISO 19148 introduz ainda a inclusão de um quarto parâmetro opcional: um valor adicional de deslocamento medido perpendicularmente ao objeto linear.

Para atender à necessidade de gestão de suas infraestruturas, o DNIT nos últimos anos vem introduzindo nas suas ações a componente geoespacial, com a implementação de um setor na estrutura organizacional, o DNITGeo, vinculado à CGPLAN (Coordenação Geral de Planejamento e Programação de Investimentos) que tem como objetivos elaborar, estruturar e manter a base de dados geográficos do DNIT. O setor atua principalmente na produção de informações cartográficas, mediante a contratação de empresas especializadas na caracterização topográfica das infraestruturas de transportes.

O DNITGeo atua de forma transversal dentro da Autarquia, atendendo às suas diversas áreas, no fornecimento de dados geográficos sobre infraestrutura de transportes do

Brasil. Uma de suas ações é dar suporte da espacialização da base cadastral das faixas de domínio nas rodovias sobre responsabilidade administrativa do DNIT.

Uma das grandes dificuldades ainda do DNIT e dos DER estaduais é o cadastro territorial, imobiliário e das infraestruturas, contidas no interior das suas faixas de domínio. Para isso, o conhecimento do seu território (extensão e largura da faixa de domínio) é essencial. Entretanto, a medição da malha rodoviária de alguns estados foi realizada utilizando-se principalmente métodos de levantamento com medições à trena e a odômetros de carros. As divisões dos trechos da rede rodoviária foram materializadas em campo através da implantação de marcos de concreto amarrados à quilometragem do SRE da época, sem a determinação de coordenadas planimétricas (DAER, 1998).

Um grande problema é a falta de definições e especificações nas normativas vigentes com relação à precisão posicional das medições, quanto à forma de aquisição das informações e sistema de integração. A maioria dos dados existentes nos DERs estaduais ainda está em formato analógico (em papel), tais como, cartas topográficas, projetos de engenharia, diversos mapas históricos, croquis, fotografias, etc. Para que esses dados possam ser utilizados em um banco de dados, devem ser realizados procedimentos de digitalização, vetorização, conversão, criação de atributos e padronização.

Vale salientar, que segundo Druzina *et al.* (2019), no Brasil, os incipientes programas relacionados à estruturação de dados geoespaciais no setor de Transportes, IDE-T e IDE-DNIT, ainda não apresentam propostas concretas para a padronização do cadastro rodoviário, nem a indicação da utilização de SRL. Diante disso, temas recorrentes sobre a malha rodoviária que necessitam de uma identificação posicional, como por exemplo: localização das ocupações irregulares de Faixa de Domínio, acidentes de trânsito e danos nas vias têm seu resgate de dados históricos e manutenção de dados vigentes prejudicados pela complexidade das maneiras de pensar a cerca da localização, uma vez que precisam criar transformações entre as referências. Essa situação impede muitas vezes o cruzamento de dados entre eventos, dificultando assim, o entendimento das correlações espaciais dos mesmos.

A realidade do cadastro rodoviário federal e dos estados abordada nesta tese, demonstra a grande necessidade da integração das diversas informações existentes nos órgãos rodoviários com as instituições oficiais geradoras de dados espacializados. No

Brasil existe uma série de sistemas cadastrais de terras que podem ajudar aos órgãos rodoviários a fiscalizar as ocupações irregulares da faixa de domínio. Exemplo disso são as bases cartográficas cadastrais georreferenciais do INCRA, do IBGE, e de alguns órgãos do Estado e das Prefeituras Municipais.

Um grande problema encontrado nas integrações dessas bases com as bases rodoviárias é a definição da unidade básica territorial. Essa definição perpassa não só a questão conceitual, mas também a questão estrutural do cadastro, e deve sempre ser discutida em relação ao contexto que se insere, visando uma melhor gestão, eficiência e segurança geométrica. Brandão (2003) apresenta uma proposta para a adoção da parcela como unidade cadastral no Brasil, a partir das seguintes características: continuidade espacial, unicidade dominial, mesma situação jurídica, mesma situação administrativa, mesmo uso. Por outro lado, o documento “Cadastro 2014” (KAUFMANN e STEUDLER, 2017), criado a partir de um grupo de estudiosos dos sistemas cadastrais no mundo, a Comissão 07 da FIG, introduz um conceito diferente de parcela, o conceito de objeto territorial, onde definem:

- a) Parcela: porção de terra com limites definidos, sobre a qual se aplica o direito de propriedade a um indivíduo ou pessoa jurídica.
- b) Objeto territorial legal (OTL): porção de terra com condições homogêneas em seus limites. Um objeto territorial legal é descrito pelo conteúdo legal de um direito ou restrição e pelos limites nos quais esses direitos e restrições se aplicam. Como exemplos de objetos territoriais legais, podem-se citar as parcelas de propriedade privada, áreas onde existam direitos tradicionais, unidades administrativas, áreas para proteção de água, proteção da natureza e proteção contra ruídos; zoneamento de uso ou as áreas onde a exploração dos recursos naturais é permitida. Um objeto territorial físico pode ser uma parcela do território coberto por rochas, água, madeira, uma rua ou qualquer outra característica não legal.

Como exemplo, Costa, Carneiro e Silva (2016) citam que no Brasil os OTL podem ser representados por:

- a) Terrenos de Marinha: Art. 51, §14, da Lei de 15/11/1831 e Artigo 13 do

Código de Águas – Decreto nº 24.643/1934;

b) Terrenos Reservados: artigo 14 do Código de Águas e artigo 31 do Código de Águas combinado com o inciso III do artigo 20 da Constituição Federal;

c) Servidão: artigos 1.378 a 1.389 do Código Civil;

d) Reserva Legal: Lei nº 4.771/1965, artigo 1º, §2º, III e artigo 16, §2º;

e) Área de Preservação Permanente: artigo 1º, §2º, II e artigo 3º, §1º, do Código Florestal;

f) Direitos de Mineração: Artigo 176 da Constituição Federal; Decreto-Lei nº 227, de 1967 do Código de Minas;

g) Restrições Aeronáuticas: Código Brasileiro de Aeronáutica, Lei nº 7.565, de 1986, artigos 43 a 46;

h) Restrições Urbanísticas: Artigo 182 da Constituição Federal; Lei nº 10.257/2001 do Estatuto das Cidades.

Dentro dessa classificação proposta pelos autores, as faixas de domínio se caracterizam como OTL de servidão.

O mapeamento das ocupações irregulares localizadas em faixa de domínio/áreas remanescentes ao longo das rodovias e o cadastramento e monitoramento dos domicílios e famílias nelas localizados, têm o objetivo de fornecer subsídios para a elaboração de projetos relativos à remoção, reassentamento e consolidação das áreas ocupadas, pois constituem atividades constantes da gestão territorial da rodovia. Complementam as ações de gestão territorial, a proposição de novos modelos e procedimentos de fiscalização para evitar ampliações e novas invasões nessas áreas (FREITAS *et. al*, 2019).

As falhas na identificação da referência de origem do estaqueamento original do eixo da rodovia comprometem a definição da posição de eventos como, por exemplo, a ocupação irregular de faixas de domínio. Além disso, não há em toda extensão da rodovia demarcação da largura da faixa de domínio. Assim, o limite da faixa não é materializado no território a partir de marcos, principalmente nas áreas urbanas.

Para caracterização desse limite no território se torna fundamental a sua materialização. A reconstrução deste limite se faz a partir de uma locação topográfica

conceituada na NBR 13.133/21. A norma estabelece a fixação de condições mínimas exigíveis à execução de atividades relacionadas ao levantamento topográfico, que busca, em suma, a obtenção do conhecimento geral da porção de terra, como: relevos, limites, confrontações, localização e área, amarrações, posicionamentos; fornecimento de informações do terreno a serem utilizadas e os estudos preliminares das projeções topográficas; e informações acerca do terreno para a geração de projetos executivos.

Segundo Mendes (2017), essas condições mínimas exigidas devem obrigatoriamente ser compatíveis às medidas de ângulos e desníveis, respeitando as tolerâncias por meio dos desvios e possíveis erros compostos na concepção das medidas, buscando a seleção de métodos e processos mais assertivos para obter os resultados de compatibilização de destinos de levantamento, de forma a assegurar que os erros compostos nessas medições não ultrapassem os limites aceitáveis e nem comprometam a segurança do estudo. A caracterização do estudo, segundo a própria NBR, dá conta do emprego de documentações complementares, tal qual descritas abaixo:

- a) Decreto 89.137 – Instruções reguladoras das Normas Técnicas de Cartografia Nacional;
- b) NBR 5425 – Guia de inspeção por amostragem do controle e certificação de qualidade;
- c) NBR 8196 – Emprego de escalas em desenho técnico;
- d) NBR 8402 – Execução de caracteres de escrita de desenho técnico;
- e) NBR 8403 – Aplicação de linhas de desenho;
- f) NBR 10647 – Desenho Técnico – Normas Gerais.

A conceituação do levantamento cadastral dessa faixa contempla os aspectos físicos e de domínio das propriedades atingidas, englobando informações relacionadas ao levantamento planimétrico-cadastral, por meio da representação individual de identificação dos proprietários, assim como, as benfeitorias e culturas existentes dentro de uma faixa de domínio, dentre outras informações relevantes.

De acordo com o DNIT (2006), os procedimentos de levantamento topográfico para essas faixas passam, inicialmente, pela implantação da rede de apoio, sendo esse de uso oficial do IBGE devendo ser apresentada por meio do sistema de projeção Local Transversa

de Mercator (LTM), devendo essa estar devidamente referenciada com os sistemas poligonais de apoio para estabelecimento das referências de precisão ao longo do caminamento dos processos. O processo inicial se dá na implantação das coordenadas tridimensionais de forma macro num ponto de partida, realizadas pelo transporte de marcos oficiais do IBGE ou outros por meio de aparelhos de georreferenciamento espacial e posicionamento por satélite.

A legislação técnica oferece métodos e equipamentos, recursos esses que bem selecionados fornecem resultados satisfatórios para os fins aos quais se destinam. Dessa maneira, o profissional indicado para executar uma tarefa ligada às questões de demarcação de terras, deve observar no conjunto as questões econômicas, sociais e jurídicas, a qual a situação está inserida.

Segundo Mendes (2017), a escolha da metodologia a ser utilizada deve ser criteriosa para que forneça dados topocartográficos que deixem o mínimo de imprecisões. Nos processos de desapropriações não existe uma norma técnica específica, nem um padrão a ser seguido, tendo o técnico indicado total liberdade de escolha da metodologia, das tolerâncias métricas e do grau de confiabilidade do resultado obtido.

Uso/Ocupação do solo versus Cobertura do solo

Os termos uso/ocupação e cobertura do solo não são sinônimos. A literatura chama a atenção para suas diferenças e sua utilização adequada em estudos de uso e mudança da cobertura do solo.

O uso do solo é uma preocupação de cientistas sociais como economistas, geógrafos, antropólogos, planejadores e outros. Embora o termo seja comumente empregado de modo singular, o uso e a ocupação do solo possui distintas definições que se completam. De acordo com Rocha (2012), a ocupação do solo dá-se pela identificação espacial dos aspectos físicos qualitativos, analisando as propriedades topográficas, agrícolas e geológicas da superfície terrestre, e classificando-a quanto à sua utilidade. O termo cobertura da terra refere-se às ciências naturais, denotam o estado físico da terra. Abrange, por exemplo, a quantidade e tipo de superfície de vegetação, água e materiais da

terra. O uso do solo é “o destino que o Homem dá a terra” (TURNER e MEYER, 1994) quando identificado certo valor no espaço territorial.

Para Skole (1994), o “uso do solo é o emprego humano de certa cobertura da terra, o meio pelo qual a atividade humana apropria-se dos resultados da produção primária líquida (“*Net Primary Production*” - NPP), conforme determinado por um complexo de fatores socioeconômicos.”

FAO/IIASA (1993) afirmam que “uso do solo diz respeito à finalidade para a qual a terra é usada pela população humana local e pode ser definido como as atividades humanas que estão diretamente relacionadas a terra, fazendo uso de seus recursos ou tendo um impacto sobre eles.”

Para BRIASSOULIS (2000), a mudança de uso do solo “... significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo....” (“Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano ...”). Segundo JONES e CLARK (1997), ela pode envolver: “conversão de um uso em outro, ou modificação de um certo tipo de uso, tais como, mudanças de áreas residenciais de alto para baixo padrão (sem alteração física ou quantitativa dos edifícios)”.

O *Geographical Sciences Committee* (2014) destaca a questão importante que é a diferenciação entre o processo de mudança do uso solo e o processo de mudança da cobertura do solo. Essas dinâmicas são inter-relacionadas, porém diferentes. Nesse contexto, os sistemas do sensoriamento remoto unicamente conseguem mensurar a cobertura do solo e não o uso do solo. Portanto, a modelagem considera o uso do solo como elemento de análise.

A partir da revisão da literatura ficou claro que o uso e a cobertura da terra não são equivalentes embora possam se sobrepor. A distinção é representada esquematicamente na Tabela 3 adaptado da obra de Briassoulis (2019).

Tabela 3 - Tipos de cobertura da terra e tipos associados de uso do solo

Tipo de Cobertura de Solo	Tipo de Uso do solo
Floresta	Floresta Natural Produção de madeira Lazer Uso misto - produção de madeira e recreação.
Pradarias	Área natural Pastagens Lazer Uso de misturadores - pastagens e recreação
Terras Agrícolas	Terras agrícolas - culturas anuais Pomares, bosques - culturas perenes Recreação, turismo Usos mistos lavoura
Terras Construídas (ocupadas)	Cidade Vila sítio arqueológico Área industrial Residencial Área comercial Transporte Uso misto

Fonte: Adaptado de Briassoulis (2019)

Embora o uso do solo e a cobertura do solo sejam frequentemente combinados, por exemplo, em referências a mapas e informações do uso do solo/ mudança de cobertura (do inglês Land Use/Cover Change (LUC), eles de fato, têm significados bastante distintos. Muitos autores têm definições complementares (DI GREGORIO e JANSEN 1998; CAMPBELL e WYNNE 2011; GIRI 2016a; WULDER *et al.* 2018) e a diretiva europeia INSPIRE, que estabelece uma infraestrutura para informações espaciais na Comunidade Europeia e também inclui uma definição de cada termo.

Diretiva INSPIRE (2007/2/CE)

“Cobertura do solo: Cobertura física e biológica da superfície da terra, incluindo superfícies artificiais, agrícolas áreas, florestas, áreas (semi)naturais, áreas úmidas, corpos de água.

Uso do solo: Território caracterizado pela sua dimensão funcional planejada atual e futura ou finalidade socioeconômica (por exemplo, residencial, industrial, comerciais, agrícolas, florestais, recreacionais).”

Uma cobertura terrestre pode ter um ou vários usos, ou mesmo nenhum. Uma superfície artificial pode ser usada para hospedar pessoas (por exemplo, área residencial), produção (por exemplo, área industrial) ou lazer, atividades (por exemplo, instalações esportivas). Em mapas em escalas mais grosseiras, essa superfície artificial pode abrigar todos estes usos em conjunto. Por exemplo, uma área urbana é uma cobertura artificial que apresenta usos múltiplos (GARCÍA-ÁLVAREZ *et al.*, 2022).

Um uso específico da terra também pode ser associado a múltiplas coberturas de terra ao mesmo tempo. Um aeroporto é um uso do solo geralmente associado a várias coberturas artificiais, tais como edifícios, estradas e pistas de decolagem, e também com vegetação, como os pastos (GARCÍA-ÁLVAREZ *et al.*, 2022).

Considerando que as coberturas de terra são geralmente visíveis em imagens de satélite, os usos da terra são mais difíceis de distinguir. Por exemplo, um edifício poderia ter usos múltiplos: apartamentos, escritórios, plantas industriais, instalações esportivas, etc. Às vezes, o uso do terreno pode ser deduzido do contexto de informações da imagem, mas, na maioria dos casos, informações adicionais são necessárias para interpretação da

classificação. Isto torna a produção de mapas mais difícil e cara. Como resultado, a maioria dos mapas fornece apenas informações sobre coberturas de terra. Em outros casos, eles se concentram em o uso do solo de certas coberturas específicas, tais como artificiais ou áreas agrícolas, proporcionando assim tanto o Uso do Solo como a Cobertura do solo (LUC). É por isso que na ciência que estuda essa terminologia, geralmente se fala sobre as informações de Uso e Cobertura do Solo, com os dois aspectos combinados dentro dos mesmos conjuntos de dados.

Algumas informações sobre o uso e cobertura do solo já eram disponíveis antes do advento dos instrumentos de sensoriamento remoto (CAMPBELL, 1983). Entretanto, foi o surgimento de imagens aéreas e, sobretudo, de satélites que promoveu a produção de mapas LUC sistemáticos na região, continente e global. (LOVELAND, 2016).

3. GESTÃO TERRITORIAL DAS FAIXAS DE DOMÍNIO RODOVIÁRIO

3.1 Gestão da Malha Rodoviária

Segundo Câmara *et al.* (2001), na perspectiva moderna de gestão de território, toda ação de planejamento, ordenação ou monitoramento do espaço deve incluir a análise dos diferentes componentes do ambiente, o meio físico-biótico, a ocupação humana e seu inter-relacionamento.

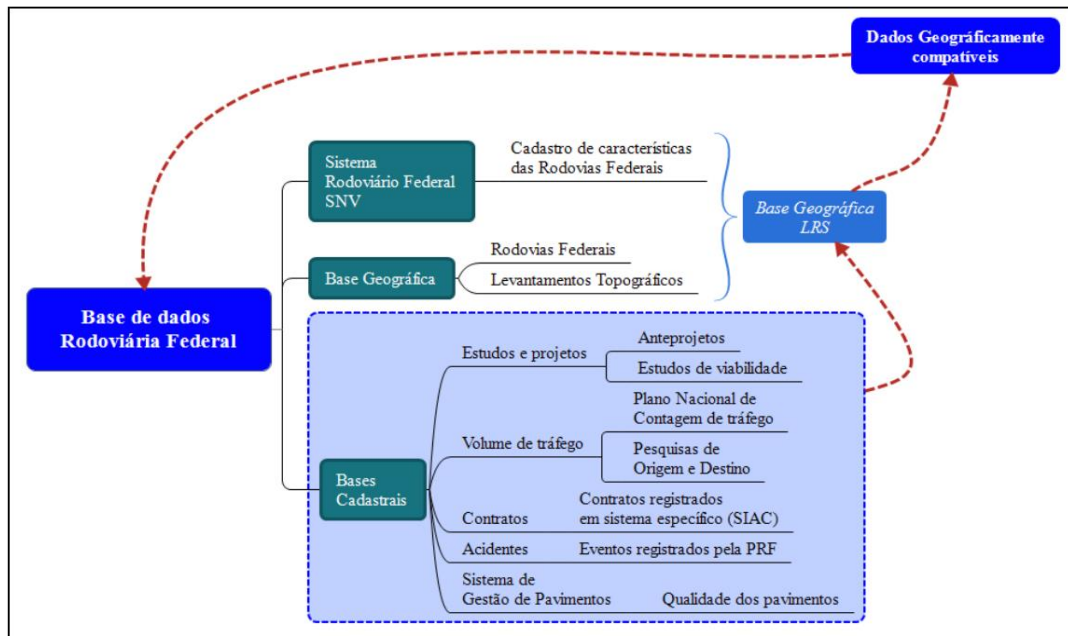
Entende-se por território como “o limite espacial dentro do qual o Estado exerce de modo efetivo e exclusivo o poder de império sobre pessoas e bens” (SILVA, 2001, p. 120). Também se pode definir território como uma “porção do espaço geográfico onde são projetadas relações de poder, que geram uma apropriação e um controle sobre este espaço, independentemente se ele é ou não territorializado por um ou mais agentes” (MAGDALENO, 2005, p. 119).

Gestão do território é a prática estratégica que faz uso de ferramentas científicas e tecnológicas, do poder controlador nas escalas espacial e temporal, da coerência das decisões e ações para alcançar um objetivo e que expressa, equitativamente, a nova racionalidade e a tentativa de ordenar o caos (MACEDO JR. *et al.*, 2003).

O DNIT atua em todo o território brasileiro e, dadas as dimensões continentais do país, a produção de dados e informações se torna substancial. Tais dados são coletados sobre diferentes perspectivas e com diferentes finalidades e enfoques. O DNIT dispõe de todo um arcabouço de dados e registros que datam de décadas anteriores e são fundamentais para o planejamento e gestão da infraestrutura nacional. Essas especificidades conferem às bases de dados do órgão uma heterogeneidade que torna sua centralização extremamente complexa (PEREIRA JUNIOR e FARZAN, 2017).

Ainda segundo Pereira Junior e Farzan (2017), algumas das principais bases que estão em construção têm a finalidade de criar um arcabouço de dados que permita a realização de relacionamentos espaciais. Um dos pontos chave é que as informações cadastrais não nascem geograficamente referenciadas. Então só apenas com a adoção do Sistema LRS é possível transformar esses dados tabulares em informação espacial de forma ágil. Essas bases vão desde informação sobre contratos até dados de acidentes ocorridos em Rodovias Federais e registrados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) (Figura 7).

Figura 7 - Principais bases rodoviárias em estruturação no âmbito do CGPLAN - DNIT



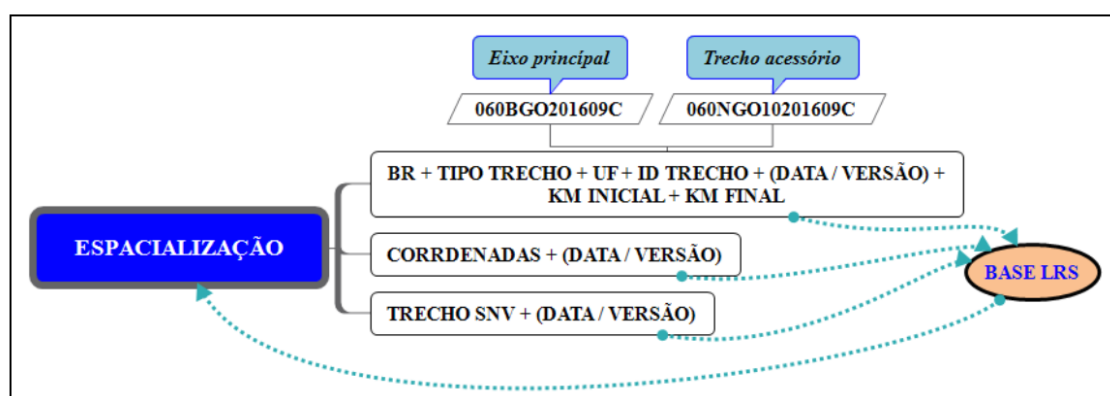
Fonte: Pereira Junior e Farzan (2017)

Conforme a Figura 7 existe três grupos de dados gerados: o primeiro, que é base do SNV, nasce ancorado em dois referenciais: um geográfico e o outro quilométrico. Dessa forma, a base SNV é armazenada como um LRS, que contém coordenadas X, Y e M (*Measure*). Vale ressaltar que segundo Pereira Junior e Farzan (2017) estão em curso análises no sentido de transformar o sistema em X, Y, Z e M, possibilitando uma representação mais acurada dos dados. O segundo grupo de dados pode ser entendido como a base geográfica propriamente dita, e é composto por levantamentos topográficos e a base rodoviária antes da inserção dos dados de quilometragem para transformação em um LRS. O terceiro grupo, formado basicamente por informações cadastrais, é composto por dados de levantamentos e monitoramento das rodovias e se destina a subsidiar a gestão das Rodovias Federais.

A compatibilização dos dados da Figura 8 pode ser realizada de três formas básicas. Sendo a Primeira Baseada em “rotas”, ou seja, cada rodovia recebe um identificador único que permite a segmentação dinâmica de dados a partir do uso desse código juntamente

como uma quilometragem de referência. A segunda forma é utilizada para dados que possuem referencial geográfico, porém, não contam com referência às rodovias que são a chave identificação no âmbito do DNIT. A terceira forma destina-se basicamente a informações já existentes e que estão referenciadas apenas ao código do Sistema Nacional de Viação, que foi e ainda é utilizado como referência oficial.

Figura 8 - Sistema básico de espacialização de dados no âmbito do CGPLAN - DNIT



Fonte: Pereira Junior e Farzan (2017)

A base LRS assume uma posição de identificador (ID) das informações. A partir disso é possível, por exemplo, obter-se o quilômetro de uma rodovia em relação a uma coordenada, bem como analisar historicamente o comportamento da quilometragem que passa por aquele ponto, uma vez que a quilometragem de uma rodovia pode ser alterada ao longo do tempo, sobretudo pela realização de obras.

Essas implementações pelo CGPLAN – DNIT vão possibilitar recuperar informações disponíveis em outras bases como do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência Nacional de Águas (ANA) e do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MT) a partir de consultas realizadas aos serviços de mapas disponibilizados pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (PEREIRA JUNIOR e FARZAN, 2017)).

Os avanços tecnológicos são significativos, principalmente na implantação de ferramentas computacionais para apoiar os processos de gestão do DNIT. Contudo, existe uma demanda por uma solução estruturada e integrada para a gestão dos processos

relacionados à faixa de domínio a fim de controlar cadastros de ocupações, solicitações de autorização para a implantação de novas ocupações, termos de permissão de uso, emissão de cobranças e informatização da gestão de receitas (MARAFFON *et al.*, 2009).

3.2 Aquisição de conhecimento sobre o fenômeno da ocupação irregular

O conhecimento sobre um fenômeno parte do pressuposto de conhecer os dados e as informações sobre esse fenômeno. Quanto mais nos distanciamos dos dados, maior é a abstração. Então para se garantir maior certeza sobre um fenômeno é necessário estar mais próximos dos dados. Principalmente na gestão e na tomada de decisão. Ter dados corretos, saber manuseá-los, aplicá-los e fazer as análises possíveis, transformá-los em informação, permite ao gestor a tomada de decisão de maneira ágil e eficiente, e no momento oportuno.

Para isso, a maioria dos dados sociodemográficos tem um elemento espacial. Por exemplo: os crimes são cometidos num determinado lugar, o desemprego é calculado para uma cidade ou região, a localização de áreas com resíduos perigosos ocorre a certa distância de núcleos populacionais, a população aumenta ou diminui nas proximidades de grandes centros, as doenças e mortes estão distribuídas irregularmente no espaço (JULIÃO, 2001). Então, a gestão do território deve, necessariamente, passar pelo entendimento e interpretação dos fatores sociais, políticos, econômicos e, na atualidade, dos fatores ambientais, para uma postura equilibrada, sem relegar os aspectos fundamentais do lugar (TOMMASELLI, 2012).

Em virtude das grandes extensões territoriais das faixas de domínio e do caráter dinâmico das pressões decorrentes do uso e ocupação das margens das rodovias, se fazem necessárias ações estratégicas. Essas ações estratégicas só serão possíveis, se houver um Sistema de Informação Geográfica que apresente mapas síntese como instrumento potencial para um melhor acompanhamento da movimentação dos índices expressos no território, auxiliando não apenas no planejamento, mas também no monitoramento dos resultados e intervenções no espaço (GENOVEZ *et. al.*, 2003).

Ainda segundo Genovez *et al.* (2003), as geotecnologias representam um instrumento relevante para subsidiar a definição de políticas públicas na medida em que permitem analisar, produzir e integrar dados diversos em uma mesma base territorial. A associação dos Sistemas de Informação Geográficos e das geotecnologias permite cruzar grande

quantidade de informações a um custo baixo, assim como, gerenciar e definir ações em combate às ocupações irregulares.

O uso de uma metodologia e tecnologia que possibilitem o monitoramento e a fiscalização desse patrimônio público de grande área e distribuição espacial, associando a integração com outros sistemas de gestão territorial e dados socioeconômicos, gerenciado por um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Assim se possibilitará ao órgão responsável pela gestão dessa malha rodoviária, um tratamento eficiente e inovador desses territórios.

3.3 Mudança no Uso da solo e Mudança na Cobertura do Solo

Para Valência (2008), os fatores que incidem sobre a vulnerabilidade do sistema homem-ambiente estão na mudança do uso e cobertura do solo. O solo possui uma dupla caracterização, pode ser considerado como o local da realização das atividades humanas, bem como a fonte dos recursos necessários para a realização dessas atividades.

O significado e a conceituação de mudanças na cobertura do solo e no uso do solo são muito mais amplos. No caso de mudança na cobertura do solo, a literatura relevante distingue entre dois tipos de mudança: conversão e modificação (TURNER *et al.*, 1995, 22; SKOLE 1994, 438). Conversão da cobertura do solo envolve uma mudança de um tipo de capa para outro. Modificação da cobertura do solo envolve alterações de estrutura ou funcional sem uma mudança geral de um tipo para outro; podendo envolver mudanças na produtividade biomassa ou fenologia (SKOLE, 1994, 438).

O uso e a mudança da cobertura do solo significam (quantitativamente) mudanças na extensão da área (aumento ou diminuição) de um determinado tipo de uso ou cobertura do solo, respectivamente. Segundo Briassoulis (2019), é importante notar que, mesmo nesse nível, a detecção e a medição das mudanças dependem da escala espacial; quanto maior o nível espacial de detalhes, maiores as mudanças na extensão territorial da terra.

A análise das mudanças no uso do solo gira em torno de duas questões centrais e inter-relacionadas: "o que impulsiona / causa mudança no uso da terra?" e "quais são os impactos (ambientais e socioeconômicos) da mudança no uso da terra?". (BRIASSOULIS, 2019).

Para Briassoulis (2019), o uso da terra está sendo moldado sob a influência de dois

amplos conjuntos de forças - necessidades humanas e características e processos ambientais. Ainda segundo ela, nenhuma dessas forças permanece parada; elas estão em constante estado de fluxo, pois a mudança é a essência da vida. As mudanças nos usos da terra que ocorrem em vários níveis espaciais e dentro de vários períodos são expressões materiais, entre outras, da dinâmica ambiental e humana e de suas interações mediadas pela terra.

Essas mudanças às vezes são benéficas, mas às vezes geram impactos e efeitos prejudiciais, sendo o último, a principal causa de preocupação, uma vez que incidem de várias formas no bem-estar humano. Então, uma rodovia é uma infraestrutura que causa impactos positivos economicamente e socialmente para determinada região, mas ela pode gerar consequências indesejadas de mudança nos usos das terras lindeiras à rodovia.

Para Briassoulis (2019), a magnitude da mudança no uso do solo varia com o período analisado, bem como com a distribuição geográfica. Além disso, as avaliações dessas mudanças dependem da fonte, das definições dos tipos de uso do solo, dos agrupamentos espaciais e dos conjuntos de dados usados.

Os estudos de mudança no uso da terra nem sempre empregam definições semelhantes dos principais termos terra, uso da terra e mudança no uso do solo. As definições e descrições desses termos variam de acordo com o objetivo do aplicativo e do contexto de seu uso (BRIASSOULIS, 2019). É, portanto, necessário examinar definições e descrições alternativas desses termos que são mais frequentemente usados nesses estudos, especialmente aqueles oferecidos por fontes oficiais.

Segundo o *Geographical Sciences Committee* (2014) e Carvalho (2019), a dinâmica da mudança do uso do solo é complexa, pois é influenciada por diversos sistemas sociais e ecológicos. Para a ONU (2005), as relações entre os ecossistemas e os sistemas humanos sempre existiram. Do ponto de vista sistêmico, essas relações envolvem três elementos: o bem-estar humano, impulsores de mudanças e os serviços ecossistêmicos.

Para Briassoulis (2000), o uso do solo pode ser a causa da mudança da sua cobertura, ainda assim, a cobertura do solo pode mudar mesmo se mantendo inalterado seu uso. O uso do solo pode modificar a cobertura do solo de três formas:

- I. **Conversão** - Consiste na mudança qualitativa da cobertura do solo para outro tipo de cobertura. Exemplificando, desmatamento ou deflorestação converte florestas em áreas agrícolas.
- II. **Modificação** - A cobertura do solo é modificada na sua estrutura ou função sem mudar a cobertura para outro tipo. Por exemplo, mudanças na produtividade e biomassa da cobertura.
- III. **Manutenção** - as condições do solo são mantidas contra agentes externos. Por exemplo, áreas de proteção ambiental tendem a manter a cobertura do solo protegidas de atividades extrativistas.

Para Valência (2008), as mudanças do uso e cobertura do solo não acontecem ao acaso em uma região. Estas mudanças estão em constante dinamismo e podem ser determinadas por dois tipos de impulsores:

- a) **Socioeconômicos**. Abrangem sistemas humanos. Por exemplo: fatores demográficos, políticos, sociais,
- b) **Biofísicos**. Abrangem características e processos ambientais. Por exemplo: temperatura do ar, precipitação pluvial, altitude, declividade, tipos de solo, rede fluvial, entre outros.

Os dados da LUC são uma fonte valiosa de informação para cientistas (BONTEMPS *et al.* 2012; MANAKOS e BRAUN 2014). Isso lhes dá uma melhor compreensão das interações entre as sociedades e o meio ambiente. Representam ainda aspectos de especial interesse para muitas ciências sociais tais como, geografia ou economia (GEOGHEGAN 1998; GREEN *et al.* 2005). Os dados da LUC também podem ser usados para monitorar uma gama de diferentes processos naturais e ambientais (por exemplo, hidrológicos, meteorológicos...), que se revelam de grande interesse para muitas ciências naturais (RINDFUSS *et al.*, 2004).

Os formuladores de políticas também precisam de dados da LUC como um recurso adequado para ajudá-los a lidar com muitos dos desafios enfrentados pela sociedade atual (SZANTOI *et al.*, 2020). Ela permite também entender onde estão localizados os recursos da terra e como e quando eles mudam (STRAND, 2013; THACKWAY *et al.*, 2013).

Campbell (1983) analisou algumas das aplicações de dados da LUC na formulação de

políticas nos EUA em diferentes escalas. Ele descobriu que "quase todas as unidades governamentais têm a exigência de criar e implementar leis e políticas que envolvem direta ou indiretamente o uso atual ou futuro da terra".

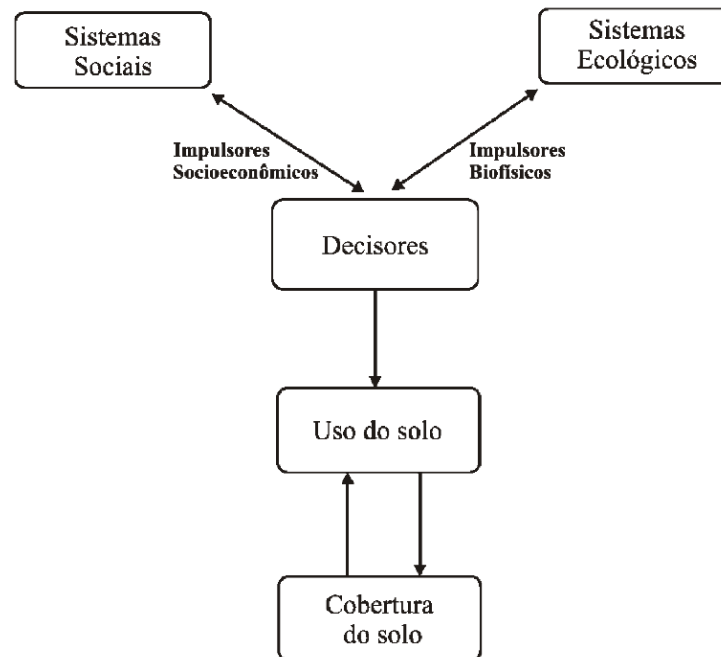
As administrações locais precisam de informações sobre o uso do solo para o planejamento do seu território. Os governos regionais e nacionais podem exigir informações LUC para gerenciamento da água, controle de inundações ou para concepção e avaliação das políticas ambientais. No nível internacional, os dados da LUC fornecem provas importantes sobre as quais embasarem decisões relativas a muitos dos desafios que a sociedade de hoje enfrenta (GARCÍA-ÁLVAREZ *et al.*, 2022)

O efeito imediato do uso do solo incide sobre a mudança da cobertura do solo (Figura 9). Para Kuhlman (2008), estes fatores de mudanças atuam em escalas espaciais locais, regionais e globais. Segundo Kuhlman (2008), os tipos de impulsores de mudança do uso do solo são considerados em função da sua variação no período da simulação:

Impulsores de mudanças dinâmicos. São aqueles impulsores que variam significativamente no período da simulação. Por exemplo, tamanho da população, precipitação pluviométrica, entre outros.

Impulsores de mudanças estáveis. São impulsores que variam tão pouco no período da simulação que podem ser considerados estáveis nesse período. Por exemplo, declividade, altitude, rede hidrográfica, entre outros. As mudanças do uso do solo representam o resultado da ação de decisores atuando em vários níveis organizacionais no âmbito local, regional ou global sob a influência de fatores socioeconômicos, políticos, entre outros (VALENCIA, 2008). (Figura 9)

Figura 9 - Relações entre impulsores de mudanças e o uso e



Fonte: Adaptado de Briassoulis, (2000).

Diante dos conceitos apresentados, o presente estudo tem o interesse de estudar a ocupação irregular sobre o território da faixa de domínio de rodovias, sobre a o viés da dinâmica do uso e ocupação dos territórios lindeiros às rodovias, para explicar esse fenômeno sobre a ótica dos padrões de mudança do território.

3.4 Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Solo no Brasil

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias) é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa composta por especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação que utilizam processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil. A rede faz uso de ferramentas de inteligência artificial aplicadas ao sensoriamento remoto combinadas com o conhecimento sobre os diferentes

usos da terra no país. O principal produto da iniciativa é a Coleção de Mapas Anuais de Cobertura e Uso do Solo do Brasil, com resolução de 30 m e uma série temporal já publicada que abrange o período de 1985 a 2018 (MapBiomias, 2020).

Segundo o projeto MapBiomias (2022), o Brasil foi o primeiro e ainda é o único país no mundo a contar com uma série anual de dados de cobertura e uso do solo completa, abrangendo todo o território nacional com resolução de 30 m. Os dados passam por uma série de filtros espaciais e temporais e são integrados em um mapa único para cada ano, mediante aplicação de regras de prevalência específicas para cada bioma ou região (Figura

Figura 10 -Fluxograma de Trabalho do MapBiomias



10).

Fonte: Mapbiomas (2022)

O Mapbiomas busca contribuir para o entendimento da dinâmica do uso do solo no Brasil e em outros países tropicais tendo como base:

- O desenvolvimento e implementação de uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil a partir de 1985 até os dias atuais (e posterior atualização anual).
- A criação de uma plataforma para facilitar a disseminação da metodologia para outros países e regiões interessadas utilizando a mesma base de algoritmos.
- Estabelecer uma rede colaborativa de especialistas nos biomas brasileiros para o mapeamento da cobertura do solo e da sua dinâmica de mudanças.

A proposta desta pesquisa é usar recortes de cenas fornecidas pelo Mapbiomas associadas a dados censitários, indicadores sociais e econômicos e de infraestrutura dos anos correspondentes, para então aplicar a modelagem da mudança de cobertura do uso do solo (LUCC) nas faixas de domínio rodoviárias.

3.5 Uso e Ocupação irregular da Faixa de Domínio

O território ocupado pela faixa de domínio revela um aspecto muito importante e intimamente relacionado à manutenção, operação e segurança do trânsito. Segundo Marafon *et al.* (2009), entre as várias funções dessa área estão a implementação da segurança viária, o aumento da capacidade com a ampliação física da rodovia e, eventualmente, a construção de instalações de apoio às atividades rodoviárias.

Esse território compreende o corpo da rodovia e as áreas adjacentes, até o limite das propriedades lindeiras, na qual se inicia a área *non aedificandi* e onde não se pode construir por questões de segurança. Segundo o Artigo 50 da Lei Federal nº. 9.503/97, que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro, o uso de faixas laterais de domínio e das áreas adjacentes às estradas e rodovias obedecerá às condições de segurança do trânsito estabelecidas pelo órgão ou entidade com circunscrição sobre a via.

Na prática, a faixa de domínio é parte integrante do espaço viário, cujo objetivo é o de garantir a continuidade das funções operacionais, o alagamento de pista e o aumento da segurança rodoviária. Seja qual for a classe da rodovia, sua segurança está relacionada à sua faixa de domínio, a qual deve ser dotada de uma área marginal de escape, sem obstáculos físicos e irregularidades do terreno lateral (DNIT, 2006). Dessa forma, a área adjacente à rodovia ficará preparada para a invasão de veículos desgovernados, por ocasião da necessidade de uma manobra brusca, uma falha mecânica ou ocasionada pelo motorista usuário da via (MARAFON *et al.*, 2009).

Ainda segundo Marafon *et al.* (2009), a presença de ocupações na faixa de domínio, quando irregularmente instaladas, a torna uma zona de riscos críticos e catastróficos. Árvores de porte, posicionadas a uma distância não segura do bordo do acostamento, geralmente são obstáculos que podem ser altamente letais em ocorrências de acidentes de trânsito. O mesmo se diz de postes, estruturas de drenagem salientes, painéis de propaganda e blocos de fundações, irregularidades do terreno não aplainado, desníveis dos aterros e dos valetões, construções clandestinas e depósitos de materiais diversos, entre outros.

Nas faixas de domínio, o processo de ocupação do solo de modo desordenado (e irregular) produz efeitos diferentes quando comparado ao mesmo processo nos centros urbanos. Quando há ocorrência de ocupação informal nos centros urbanos, a gestão pública do município tem por obrigação tomar medidas dentro da legislação de uso e ocupação do solo da cidade. Já nas faixas de domínio a gestão sobre o território é compartilhada pelo DNIT e a PRF, segundo a Resolução 26/2016 – Conselho de Administração do DNIT e o Código de Trânsito Brasileiro (CTB).

As ocupações informais no espaço das faixas de domínio e, quase sempre, estendidas às áreas “*non aedificandi*” recebem um tratamento diferente, devido às diferentes leis e órgãos que regem o uso e ocupação dessas áreas, onde, não se fazendo da Lei nº 13.913, de 25 de novembro de 2019, as medidas corretivas podem envolver desapropriação sem ação indenizatória, interdição e/ou ação demolitória da edificação irregular.

Segundo a abordagem da ecologia urbana citada por Burgess (1925), Hoyt (1939), Harris e Ullman (1945), o comportamento humano é determinado por princípios ecológicos, tais como a competição, a seleção, a sucessão e dominância. Como na ecologia vegetal e animal, o mais poderoso grupo humano obterá a posição mais vantajosa num determinado ambiente urbano, ou seja, melhor localização residencial. O modelo de Burgess descreve as zonas concêntricas que baseiam o crescimento urbano e a noção de que vários elementos de uma sociedade urbana economicamente complexa e heterogênea disputam ativamente os locais favoráveis dentro da cidade ou território (BONHAM-CARTER, 1994).

Modelar o uso e a ocupação sobre qualquer território, inclusive sobre a faixa de domínio, não é um fenômeno fácil. Conforme relatado por Barredo *et al.* (2003), De Lima, T. *et al.*, 2009; Dias *et al.*, 2013 e Liu (2009), esses modelos são em grande parte estáticos e lineares, pouco capazes de lidar com a complexidade dos sistemas. No entanto, as cidades são sistemas complexos caracterizados por auto-organização, autossimilaridade, emergência e um comportamento não linear da dinâmica do uso do solo (BARREDO *et al.*, 2003).

A expansão urbana é consequentemente, um processo complexo que envolve múltiplos atores com comportamentos diferentes e em várias escalas espaciais e temporais (PONTIUS e CHEN, 2006; DE BENITO, *et al.*, 2007; VELDKAMP e FRESCO, 1996;

LIU,2009)). Esse processo muitas vezes pressiona o uso e a ocupação do território lindeiro à rodovia para modificar seu uso em prol da harmonização de interesses sociais e econômicos e ambientais, causando muitas vezes desordenamento territorial nas imediações das rodovias.

Diante disso, esta pesquisa pretende entender o processo complexo que envolve múltiplos atores com comportamentos diferentes e que têm várias escalas espaciais e temporais associado ao fenômeno de uso e ocupação irregular de faixas de domínio. Propõe-se aqui adotar um ramo da pesquisa em vida artificial (HE *et al*, 2006) denominada de autômatos celulares (CA). Trata-se de um modelo no qual sua ideia geral é aplicar regras de transição aos subsistemas locais e permitir que todas as evoluções locais mostrem o padrão global.

3.6 Modelagem do Uso do solo e mudança da cobertura da terra

A Ciência da mudança do solo não é apenas uma questão de analisar e compreender as mudanças na LUC, mas também procurar modelá-los num futuro próximo (GUTMAN *et al.*, 2012a; TURNER, 2017). A partir do conhecimento do que mudou, onde mudou, porque mudou, como mudou e quais foram as consequências, pode-se então dar um passo adiante e tentar entender como diferentes tendências de mudança podem afetar o homem e a natureza. Isto é especialmente útil para a elaboração de políticas. Para avaliar diferentes cenários de mudança, é importante entender como pode ser o futuro e o que se pode fazer para colocar em prática os objetivos das políticas (OXLEY *et al.*, 2002; SOARES-FILHO *et al.*, 2006; ESCOBAR *et al.*, 2018).

Analisar a modelagem do uso do solo e da mudança da cobertura do solo (LUCCM) é compreender a dinâmica da LUC e modelar sua evolução futura (VERBURG *et al.*, 2004; PAEGELOW e CAMACHO OLMEDO, 2008). Para entender essas dinâmicas é necessário estudar como o sistema mudou no passado e analisar os processos que teriam dado origem a essas mudanças (PLATA ROCHA, 2010; TORO BALBOTÍN, 2014). Ao estudar esses processos em detalhe, podem-se identificar os atores por trás das mudanças que estão ocorrendo (BÜRGI *et al.*, 2005; KOLB *et al.*, 2013). Quando forem conhecidas as mudanças ocorridas, pode-se conceituar essa informação e traduzi-la em termos de

modelagem. Os modelos permitem prever como diferentes políticas afetam a LUC e as mudanças que elas podem causar (FURTADADO *et al.*, 2011).

Os modelos também ajudam a entender como essas mudanças podem evoluir no futuro sob diferentes condições socioeconômicas (ANTONI *et al.*, 2018). Em um nível mais modesto, o LUCCM também permite estudar e analisar esses sistemas em detalhes, de modo a obter uma compreensão mais profunda dos mesmos (HEWITT *et al.*, 2014). Muitos tipos de modelos LUCC estão disponíveis hoje (Conselho Nacional de Pesquisa, 2014). Embora não haja uma classificação globalmente aceita, pode-se, de modo geral distinguir entre os modelos LUCC baseados em processos e padrões (BROWN *et al.*, 2013). Esses últimos assumem que as mudanças no padrão paisagístico são o resultado dos processos e da dinâmica a ocorrer, e que cada padrão é uma consequência de um processo específico. Esses modelos simulam o padrão e suas mudanças. Eles são, portanto, muito dependentes de séries temporais de mapas LUC e do que se mostra nas mudanças.

A técnica empregada, a estatística espacial é diferente das demais técnicas que são utilizadas para análise descritiva, por levar em consideração a localização das informações no processo de coleta, descrição ou análise dos dados. É usado o termo autocorrelação espacial para poder diferenciar da correlação da estatística convencional. Por exemplo, a correlação é adquirida em meio a duas variáveis diferentes, sem qualquer referência a sua posição no espaço, já no caso de autocorrelação, utiliza-se no cálculo os valores de uma mesma variável em duas posições diferentes (ROCHA, 2004). Tradicionalmente, os estudos populacionais exploram a dimensão temporal em suas análises, colocando o tempo em termos de idade, período e corte, mas não fazem o mesmo, com igual intensidade, em relação ao espaço (MOUW, 2000).

As análises se sofisticaram nas últimas décadas pela incorporação de dados digitais e espaciais, assim como pelo uso de ferramentas como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Mapas contendo variáveis demográficas se tornaram potentes instrumentos que revelam padrões imperceptíveis nas tabelas convencionais. Contudo, para que o espaço seja analiticamente incorporado aos estudos de população, faz-se necessária a criação de modelos que explicitem as relações entre o espaço e os fenômenos demográficos (NICHHD, 2002).

Associada a essa dificuldade analítica, existe a limitação relativa ao modo como as variáveis de

população são apresentadas. Os dados censitários são geralmente disseminados em unidades de área (polígonos), que expressam unidades operacionais ou estatísticas, como os setores censitários e as áreas de ponderação, ou administrativas, como os municípios. Além dos problemas inerentes a qualquer análise baseada em unidades de área, como MAUP e Falácia Ecológica, o uso de limites administrativos e/ou operacionais traz uma série de restrições, tais como: baixa resolução espacial; falta de aderência aos limites de outras camadas de informação; e alterações nos seus limites ao longo do tempo (BUENO, 2014). O uso de tais unidades não favorece a realização de análises espaciais, restringindo a articulação dos dados demográficos a outros conjuntos de informações (GRASLAND; MADELIN, 2006; DE SHERBININ *et al.*, 2002).

4. MODELOS DINÂMICOS DE USO E OCUPAÇÃO DO TERRITÓRIO

Esta seção aborda os fundamentos e aplicações de modelos dinâmicos para estudar a evolução do uso e ocupação do território. Ela inclui as subseções que descrevem conceitos essenciais, como autômatos celulares e cadeias de Markov, além de matrizes de transição. O objetivo é fornecer uma base teórica e metodológica para compreender padrões e tendências de ocupações irregulares ao longo do tempo e do espaço.

4.1 Conceitualização

O termo “modelo” pode ser entendido como a representação de um sistema, obtido através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica etc., e segundo uma ou mais teorias (NOVAES, 1981). Um sistema é um conjunto de partes que apresenta interdependência entre seus componentes e atributos (ALMEIDA *et al.*, 2004).

De modo geral, os modelos podem ser basicamente classificados de acordo com as seguintes tipologias (ECHENIQUE, 1968; NOVAES, 1981): modelos descritivos, modelos exploratórios, modelos preditivos e modelos operacionais. Na obra de Almeida (2003), ele descreve cada modelo.

A arte de se construir modelos é conhecida como modelagem, termo que se refere ao processo de pesquisa que leva à geração do modelo (representação) de um sistema. Esse processo se desenvolve, então, através da definição de um conjunto de hipóteses ou predições, que poderão ser comparadas com medidas do mundo real. Dependendo da concordância entre observador e o resultado gerado, o modelo será aceito, rejeitado ou modificado de alguma maneira, para que seja novamente testado.

Esta pesquisa vai trabalhar com os modelos de mudança do uso e ocupação do solo. Segundo Almeida (2003), as categorizações mais detalhadas de modelos de uso do solo urbano são propostas por inúmeros autores. A mais extensa categorização de modelos genéricos de mudanças de uso do solo é apresentada por Briassoulis (2000).

Segundo Almeida (2003), os modelos podem ser classificados em vista de seus aspectos metodológicos e funcionais em estatísticos ou econométricos; modelos de

interação espacial; modelos de otimização (que incluem programação linear, dinâmica, hierárquica e não-linear, assim como modelos de maximização de utilidades e modelos multicritérios de tomada de decisão); modelos integrados (modelos de gravidade, de simulação e de entrada-saída); modelos baseados em ciências naturais; modelos baseados em SIG e modelos baseados nas cadeias de Markov.

Dentre esses modelos há o Modelo Não-Dinâmico de Uso de Solo Urbano, citado nas obras de Perraton e Baxter (1974) que usa a teoria de anéis concêntricos de Von Thunen de 1826; o Modelo de localização Industrial, modelo da teoria econômica de Weber de 1909, citado por Merlin (1973); modelo de lugares centrais de Christaller de 1933, baseado na teoria econômica, citado também por Merlin (1973).

Segundo o modelo de Christaller, cidades são lugares centrais hierarquicamente organizados, cujo papel fundamental é a provisão de bens e serviços. Sua ideia básica era de que cada ponto no espaço deve distar menos de uma hora a pé (cerca de 4 km) de um lugar central. Lösch aprimorou a idéia de Christaller, concebendo em 1940 a sua teoria de regiões econômicas. Para ele, os centros podem ser classificados em grupos hierárquicos de acordo com o tipo de serviço e o tamanho do mercado (PERRATON e BAXTER, 1974).

A modelagem dinâmica espacial presta-se a simular, em ambiente computacional, fenômenos do mundo real que possuem uma dimensão tanto espacial quanto temporal. Modelos dinâmicos espaciais envolvem uma ampla gama de aplicações, que compreendem a simulação de incêndios florestais, escoamento superficial e enchentes, expansão de epidemias, migração de espécies florestais, circulação de pedestres e veículos, mudanças de uso e cobertura da terra como expansão urbana, desmatamento, entre outras (SOARES-FILHO *et al.*, 2002; ALMEIDA *et al.*, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2005; PINTO E ANTUNES, 2007; XIMENES *et al.*, 2008; SILVESTRINI *et al.*, 2009; MACEDO *et al.*, 2013; LIU *et al.*, 2015). Segundo Almeida (2004), os primeiros Modelos Dinâmicos de Mudança do Uso do Solo Urbano surgiram a partir da crítica aos modelos não-dinâmicos de mudança do uso do solo urbano. Essa crítica se refere ao fato de que, embora baseados em bem definidas estruturas formais, alguns modelos ancoravam-se esparsamente em teorias, aparentando um caráter arbitrário e mecanicista, além de modelar o fenômeno apenas em determinado instante de tempo (BATTY, 1976).

De acordo com Wegener *et al.* (1986), um modelo se denomina dinâmico, se ele

possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo, e se seus estados dependem de estados anteriores.

Para Carvalho (2015), sistemas complexos são sistemas dinâmicos (mudam com o passar do tempo) e abertos (sofrem influência de agentes externos). São formados por subsistemas que interagem entre si (redes), através de suas relações de vizinhanças (autômatos celulares). Dessa forma, toda e qualquer tentativa de previsão nesses sistemas estão condicionadas ao seu estado inicial e pequenas alterações podem provocar mudanças significativas em sua estrutura global, uma vez que atuam de maneira não linear (CARVALHO, 2015).

Também na obra de Almeida (2004) é citada a primeira geração de modelos urbanos, que representam um novo grupo de modelos que se propõe operar sobre uma base dinâmica. Nem todos eram totalmente dinâmicos, o que torna importante a introdução de algumas definições básicas em termos de modelagem dinâmica.

Uma sequência de modelos estáticos comparativos é chamada modelo recursivo, no qual o estado final de um período serve como estado inicial do período subsequente (WEGENER *et al.*, 1986).

Na obra de Wegener *et al.* (1986), ele cita uma sequência de modelos estáticos comparativos chamada de modelo recursivo, no qual o estado final de um período serve como estado inicial do período subsequente. Em Batty (2007) ele faz mais uma distinção, ao afirmar que um modelo é quase- dinâmico, se ele contém partes estáticas em uma estrutura dinâmica.

Perraton e Baxter (1974) apresentaram um modelo estático comparativo, analisando as repercussões de disposições alternativas de redes de transporte, regulações de ocupação e serviços públicos na distribuição de população.

O trabalho de Butler de 1969 é um exemplo de modelo recursivo, onde a redistribuição residencial é abordada em dois submodelos – quais moradores se mudam e para onde – sendo que a nova distribuição residencial é usada para determinar quais famílias se mudarão no período seguinte.

O que interessa a esta pesquisa são os sistemas complexos, que segundo Carvalho (2015), são sistemas adaptativos, ou seja, aprendem com os eventos passados, e se retroalimentam. Além disso, têm a capacidade de se auto-organizarem de forma

espontânea, criando padrões geométricos (fractais), onde antes não havia. O sistema é constituído por interações que obedecem a uma hierarquia, uma vez que é constituído principalmente por fluxos que interagem.

O paradigma matemático-computacional mais amplamente difundido para a construção de modelos dinâmicos espaciais consiste nos chamados autômatos celulares. Essa abordagem compreende uma grade de células regulares com n -dimensões, no qual o estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com um arranjo específico de vizinhança, sendo todas as células atualizadas simultaneamente em passos de tempo discretos (WOLFRAM, 1984; SOARES-FILHO *et al.*, 2007).

Os modelos dinâmicos de simulação de mudanças de uso e cobertura da terra tentam replicar possíveis padrões da evolução da paisagem e assim possibilitar a avaliação de futuras implicações ecológicas sobre o meio ambiente (SOARES-FILHO *et al.*, 2002). De acordo com esse autor, os componentes de um modelo de mudança da paisagem consistem em: i) uma configuração inicial, ii) função de mudança e iii) uma configuração de saída.

Um território às margens de uma rodovia se caracteriza como um sistema complexo, e por isso deve ser tratado e trabalhado com metodologias que expressem teorias e conceitos de redes, autômatos celulares, assim como ocorre na dinâmica do ambiente urbano e na dinâmica ambiental das paisagens.

Segundo Carvalho (2015), o território, assim como a cidade e o rural, é construído por ações individuais que se refletem no espaço de forma coletiva, criando padrões de organização, que podem ser identificados por alguns modelos voltados para o estudo das dinâmicas espaciais.

Através dessa compreensão, vem surgindo uma nova forma de se fazer a gestão e planejamento do território, baseada nas teorias da complexidade e de uso e ocupação do solo, posto que não é mais possível abrir mão da concepção de interação dinâmica (espaço-temporal) para ajudar no processo de entendimento de alguns fenômenos.

Carvalho (2015); Nobrega *et al.* (2019); Almeida *et al.* (2014); e Feitosa *et al.* (2019) destacam que o território sempre apresenta padrões espaciais, fluxos de interação, relações de vizinhança e áreas de influência dos fenômenos que podem ser mapeados, identificados e devem ser considerados na estruturação do modelo geral da dinâmica

espacial, considerando um fator escala.

O fenômeno de ocupação irregular sobre a faixa de domínio tem características fortes de um sistema dinâmico, porque ocorre em todo momento, em ritmo lento ou acelerado, sendo causado por fatores internos ou externos ao território, pois segundo Santos (1997), a paisagem nada tem de fixa, de imóvel.

Diante disso, fica claro que a cidade, ou seja, a área urbana é o território que mais permanece vulnerável às ocupações irregulares sobre a faixa de domínio. Isso se justifica por que a cidade é o resultado de milhares de decisões individuais e coletivas. A literatura destaca que as cidades por muito tempo eram tratadas e planejadas segundo uma gestão centralizadora, denominada “*top down*”, ou de “cima para baixo”, ignorando relações de vizinhança intra e entre cidades e o ambiente. A abordagem *top-down* viola segundo Carvalho (2015), dois princípios básicos dos fenômenos populacionais, que são a individualidade e a localidade. A individualidade tenta levar em conta as diferenças entre os indivíduos. Tais diferenças, ainda que muito pequenas, podem conduzir a resultados radicalmente diferentes na evolução das populações ao longo do tempo, uma vez que cada fenômeno tem uma localidade e tem escopo de influência.

Então, ignorar a localização dos eventos obscurece fatores que poderiam contribuir para uma visão mais clara da dinâmica espaço-temporal dos sistemas (KAWATA e TOQUENAGA, 1994; PALAZZO, 2004). Parte-se então do pressuposto de que o território apresenta respostas diferenciadas às condições iniciais, dependendo da sua forma, tamanho, densidade, estrutura física, ou cenário socioeconômico. Então, pode-se dizer que os territórios marginais às rodovias se assemelham ao comportamento das cidades. Como sistemas complexos apresentam comportamento não-linear. Assim, embora uma ação externa possa provocar *feedbacks* positivos em determinadas cidades pode provocar *feedbacks* negativos em outras.

Isso pode explicar o motivo por que em algumas cidades cortadas por rodovias há uma maior presença de ocupações irregulares do que em outras. Então, o planejamento do território usando os modelos como ferramentas constitui um campo importante de investigação, pois podem ajudar a entender a dinâmica das mesmas, seus padrões e regras de comportamento (transição). Por sua vez, os gestores das faixas de domínio poderiam usar este recurso para criar mecanismos de ação para prevenir futuras ocupações.

Segundo Carvalho (2019), cada vez que a sociedade passa por um processo de mudança, os setores econômicos, das relações sociais e políticos também mudam, em ritmos e intensidades variados. A mesma coisa acontece em relação ao espaço e à paisagem que se transforma para se adaptar às novas necessidades da sociedade.

Essa visão fica mais clara, segundo Carvalho (2015), quando se implanta uma infraestrutura rodoviária. Há mudanças na configuração da paisagem, na dinâmica da ocupação do território, ou nos manifestos sociais. Além disso, a gestão local em muitos territórios às margens das rodovias não dispõe de políticas habitacionais e de emprego e renda eficazes. As faixas de domínios por estarem contidas e cortarem diversos tipos de território (municípios ou estados), sofrem influências múltiplas da economia, meio ambiente e políticas públicas regionais. Essas três esferas de influência não deveriam ser trabalhadas de forma isolada, mas considerando as interrelações que representam a soma dos subsistemas, que compõem um sistema maior e mais complexo - o território como um todo.

O território apresenta comportamento não linear em sua dinâmica, segundo Carvalho (2015). É por isso que se pode afirmar que nenhum território é igual a outro. O fato de os territórios reagirem de forma particular aos diferentes fatores a que são expostos, devido às suas configurações políticas, socioeconômicas, ambientais é que os tornam sistemas únicos, embora conectados aos seus vizinhos. Isso acaba por prejudicar a predição do seu comportamento.

A cidade é um território, que tem uma dinâmica de uso e ocupação muito mais intensa. As cidades são constituídas por interações que obedecem a uma hierarquia, uma vez que são constituídas principalmente por fluxos (redes de mercadorias, pessoas, serviços, informação e cultura) que interagem no espaço obedecendo aos padrões geométricos da ocupação humana e suas relações de vizinhança/proximidade e que se retroalimentam, apresentando-se assim como um sistema complexo (CARVALHO, 2015).

Neste trabalho dá-se ênfase aos modelos de mudança do uso e cobertura do solo. Segundo Almeida (2004), as categorizações mais detalhadas de modelos de uso do solo urbano são propostas por inúmeros outros autores. A mais extensiva categorização de modelos genéricos de mudanças de uso do solo é apresentada por Briassoulis (2000).

Nesta pesquisa o foco é nos modelos de mudanças do uso do solo (situação

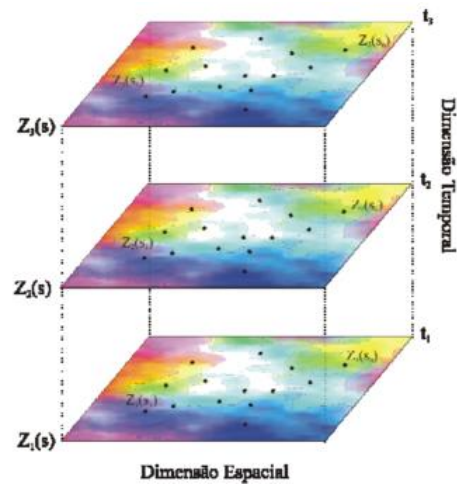
regional). Dentre esses modelos, há o Modelo Não-Dinâmico de Uso de Solo Urbano, citado nas obras de Perraton e Baxter (1974), que usa a teoria de anéis concêntricos de Von Thunen de 1826; o modelo de localização Industrial, modelo da teoria econômica de Weber de 1909, citado por Merlin (1973); modelo de lugares centrais de Christaller de 1933, baseado na teoria econômica, citado também por Merlin (1973).

4.2 Modelos de Simulação das Mudanças do Uso e Cobertura do Solo

Métodos de análise espacial em Sistemas de Informação Geográfico (SIG) cada vez mais integram métodos da Estatística Espacial (EBDON, 2007). A aplicação dos métodos e procedimentos disponíveis em SIG depende da configuração espacial dos dados. Grande parte dos métodos usados em SIG é aplicada sobre a dimensão espacial. Nessas aplicações, os dados são mais densos na dimensão espacial do que na dimensão temporal. A Figura 11 apresenta um exemplo de uma variável Z cuja distribuição espacial é mensurada em três tempos (t_1 , t_2 e t_3).

O principal objetivo é estimar a distribuição espacial usando uma amostra de tamanho n . Para resolver esta questão métodos Geoestatísticos são adequados, (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

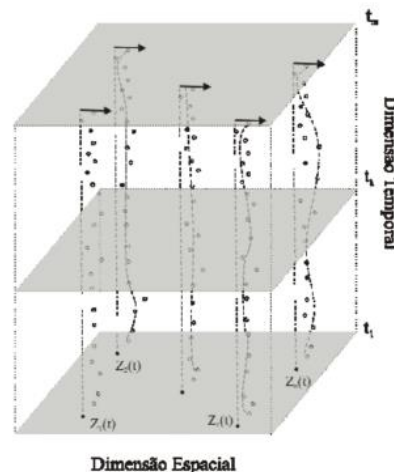
Figura 11 - Configuração de Dados Espaciais



Fonte: Adaptado de Valencia (2008)

Na literatura são citadas outras configurações de dados que consideram a dimensão temporal. Um exemplo disso é a rede de estações meteorológicas que gera mensurações de precipitação, umidade e temperatura com uma frequência temporal diária, exposto na Figura 12. Nesse caso, os dados são mais densos na dimensão temporal. O problema a resolver é a extrapolação temporal do processo, que também pode envolver a interpolação espacial.

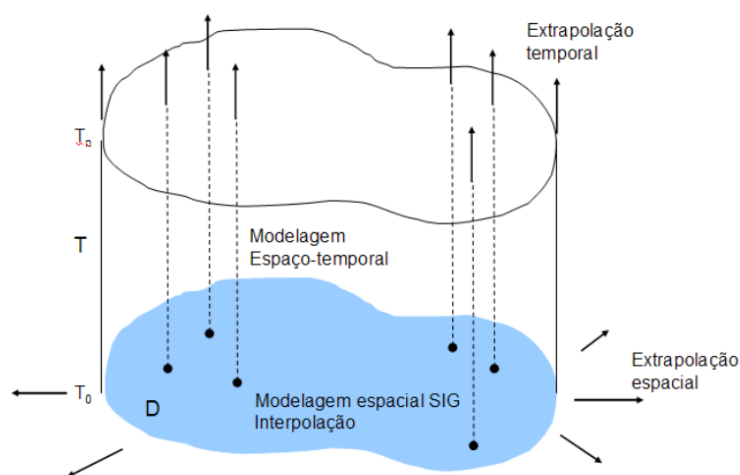
Figura 12 - Configuração de dados Temporais



Fonte: Adaptado de Valencia (2008).

Um terceiro esquema corresponde a uma estrutura de modelagem espaço-temporal apresentada na Figura 13. Existe uma demanda por modelos para manipular e analisar dados espaço-temporais devido à oferta crescente de sistemas de coleta e aquisição de dados, principalmente derivados de sensoriamento remoto, de redes de estações de monitoramento ambiental, dos censos demográficos, entre outros. Todas as análises espaciais são confinadas dentro do volume definido pelo domínio espacial D e pelo intervalo temporal T .

Figura 13 - Domínio espaço-temporal da análise espacial



Fonte: Adaptado de Valencia (2008)

Um tipo de problema é a simulação dinâmica das mudanças do uso e cobertura do solo. Através destas simulações é possível avaliar cenários e quantificar seus impactos. Modelos de simulação dinâmica compreendem um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos para analisar a evolução temporal de um processo espacial (MEIRELLES *et al.*, 2007). Estes modelos são conhecidos como modelos LUCC, em inglês *Land Use Land Cover Change*.

Algumas questões, segundo Valencia (2008), os modelos podem ajudar a responder: Quais são os processos que contribuem significativamente para explicar as mudanças? Como os processos evoluem espacialmente?

Uma questão importante é a diferenciação entre o processo de mudança do uso solo e o processo de mudança da cobertura do solo. Estas dinâmicas são inter-relacionadas, porém diferentes. Nesse contexto, os sistemas do sensoriamento remoto unicamente conseguem mensurar a cobertura do solo e não o uso do solo. Por tanto, a modelagem considera o uso do solo como elemento de análise.

A dinâmica da mudança do uso do solo é complexa, pois é influenciada por diversos sistemas sociais e ecológicos. Alguns conceitos conectividade como, Hierarquia, Estabilidade e Resiliência oriundos da ecologia, geografia e sociologia são usados na concepção de modelos LUCC. Existe, portanto, uma grande variedade de enfoques e modelos LUCC. Estes enfoques são descritos e comparados nos trabalhos de Parker *et al.* (2003), Agarwal *et al.* (2002) e Jones (2005).

4.3 Autômatos Celulares

Segundo Rocha (2012), os autômatos Celulares (AC), do inglês Cellular Automats (CA) foram desenvolvidos por Ulam e Von Neumann em meados da década de 1940. Von Neumann e Ulam estavam interessados em explorar se a característica de autorreprodução dos sistemas biológicos poderia ser reduzida para formulações puramente matemáticas. Naquele tempo, ambos trabalhavam no *Los Alamos National Laboratories* em estudos sobre a bomba atômica e, mais tarde, de hidrogênio (Stanislaw Ulam, juntamente com Edward Teller, assinou o pedido de patente para a bomba de hidrogênio).

A história matemática atribui a ideia dos CA a Ulam, que era muito conhecido, pela sua excepcional imaginação matemática e aversão à escrita. Embora não exista um debate sobre as origens da ideia, pode dizer-se que a referência a celular vem de Ulam e a autómatos de von Neumann (RUCKER, 1999).

O conceito base para a aplicação dos CAs preconiza que é possível extrair padrões regionais através do comportamento local de um reduzido número de elementos (WHITE e ENGELEN, 1993a, 1993b; BATTY e XIE, 1994; CECCHINI, 1996; BATTY *et al.*, 1997; CLARKE *et al.*, 1997). Da observação desses comportamentos individuais são extraídos grupos que categorizam padrões, formas e intensidades no espaço e no tempo. A característica que torna os CAs atrativos deve-se ao fato deles possuírem um atributo de

espaço (funciona em um “universo”) e, embora os elementos sejam conhecidos (na medida em que são definidos pelo utilizador), o comportamento é independente.

À semelhança do mundo real, o tempo e as dinâmicas entre elementos assumem características que variam de local para local, são imprevisíveis e complexas. Do mesmo modo, em um CA cada elemento (célula) comporta-se individualmente e os resultados são imprevisíveis, assumindo padrões diversos em nível global. Assim, é possível simular, ao longo do tempo e no espaço, um mundo “Autômato Celular” que pretende ser o reflexo da realidade.

Segundo White *et al.* (2000), os autômatos celulares convencionais consistem em: i) um espaço euclidiano dividido em uma matriz de células idênticas; ii) uma vizinhança celular ; iii) um conjunto de estados celulares discretos; iv) um conjunto de regras de transição, que determinam o estado de uma célula em função dos estados das células em uma vizinhança; e v) etapas de tempo discretas, com todos os estados das células atualizados simultaneamente. Ainda, os CA são sistemas espaciais dinâmicos muito simples, nos quais o estado de cada célula é uma matriz que depende do estado anterior das células, dentro de uma vizinhança de células, de acordo com um conjunto de regras de transição. Os CA são muito eficientes em termos computacionais, porque representam sistemas iterativos discretos que envolvem interações somente nas regiões locais e não entre todos os pares de células. Por serem eficientes, é possível trabalhar com grades contendo centenas de milhares de células.

Segundo Almeida (2003), os CAs são também considerados como modelos flexíveis, porque lidam com os mais diversos processos dinâmicos do mundo real e podem ser vinculados a um amplo espectro de teorias do campo da complexidade: caos, emergência, fractais, criticalidade auto organizável, etc., bem como do campo da *artificial intelligence* (AI), como sistemas especialistas, redes neurais artificiais e aprendizagem evolucionária. Esse autor também descreve sobre os primeiros modelos urbanos em CA, baseados em procedimentos metodológicos simples, como restrições de coerência de vizinhança (PHIPPS, 1989); regras Booleanas (COUCLELIS, 1985); regras de transição dinâmicas (DEADMAN *et al.*, 1993); regras de transição para capturar os processos de ocupação de terra, baseadas em heurística e lógica *fuzzy* (WU, 1996); regras de transição modificadas segundo limiares-metas de otimização econômica, social e ambiental,

associadas ao desenvolvimento urbano sustentável (WARD *et al.*, 1999).

Modelos de CA podem contemplar aplicações teóricas e práticas, onde as primeiras concernem a exercícios abstratos, e as de caráter prático, experimentos que lidam com estudos de caso reais. Batty (2000) relatou cerca de vinte ou mais aplicações de CA a cidades, incluindo um vasto repertório tanto temático, quanto metodológico. Os autômatos celulares foram originalmente desenvolvidos para fornecer uma técnica computacionalmente eficiente para investigar a natureza geral dos sistemas dinâmicos (WHITE *et al.*, 2000). Agora, porém, eles estão sendo usados como base para diversos tipos de modelos e aplicativos de domínio específicos. Tobler (1979) foi o primeiro a sugerir a aplicação de CA a problemas geográficos. Em seguida, Couclelis (1985, 1988) reintroduziu a ideia de usar o CA para modelar a dinâmica espacial e Phipps (1989, 1992) e Cecchini e Viola (1990) propuseram modelos de CA em vários processos geográficos.

Os CAs foram utilizados também para explicar fenômenos geográficos, tanto em termos dos processos modelados, quanto em detalhes geográficos (COUCLELIS, 1997; ENGELEN *et al.*, 1993, 1996, 1997; PORTUGALI; BENENSON, OMER, 1997; PORTUGALI *et al.*, 1997; WHITE e ENGELEN, 1993, 1994, 1997, 1997b; WHITE *et al.*, 1997). Esses avanços foram acompanhados por um aumento na complexidade dos modelos e no esforço de construir modelos mais realistas, como observou Couclelis (1997, p.167).

Batty e Xie (1994) desenvolveram simulações da expansão residencial suburbana em Amherst, Nova Iorque, onde uma série espaço-temporal do desenvolvimento foi usada para ajustar o modelo. Contudo, Clarke e Gaydos (1998) empreenderam uma série de simulações em larga escala do crescimento urbano metropolitano na Área da Baía (EUA) e passaram a testar o modelo numa série de cidades americanas através do projeto Gigalopolis. Já White e Engelen (1993) trabalharam um modelo de CA para Cincinnati (EUA), focado na urbanização, suburbanização e expansão urbana.

Diversas são as pesquisas implementadas nos vários domínios de modelação baseada em CA. Seu resumo está apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 - Uso do CA na aplicação nas dinâmicas urbanas na modelação

Domínio	Região Geográfica	Autor(es)
Dinâmicas do uso e ocupação	Canada; Austrália; Japão	(Moreno e Marceau, 2007);

de solo		(Lau and Kam, 2005); (Arai and Akiyama, 2004)
Crescimento urbano nas áreas rurais	China, EUA	(Yeh e Li, 2000); (White e Engelen, 1993)
Sub-urbanização de cidades	Austrália	(Ward et al., 2000)
Urbanização de cidades	Várias cidades latino-americanas	(Barredo et al., 2003); (Torrens, 2006)
Modelação de Sistemas Urbanos	Holanda	(White and Engelen, 2000)
Crescimento urbano difuso	Itália	(Besussi et al., 1998)
Espalhamento de epidemias	Brasil	(Melotti, 2009); (Sasso et al., 2004)
Desmatamento na Amazônia	Brasil	(Ximenes et al., 2008); (Soares Filho et al., 2003)
Dinâmicas de mudança no uso do solo em áreas agrícolas	Brasil	(Macedo et al., 2013); (Kamusoko, Courage et al., 2009)
Simulação de tráfego e transporte	Brasil	(Lima, 2007); (Sun et al., 2012)
Dinâmicas de mudança no uso do solo urbano	Brasil, EUA, Malásia	(Couclelis, 1997); (Batty et al, 1999); (Burrough, 1998); (Roy, 1996); (Engel, 1995); (Câmara, 1996; (Almeida et al, 2003); (Memarian et al, 2012), (Fuglsang et al, 2013; Almeida et al, 2003); (Mitsova et al, 2011); (Onsted e Chowdhury, 2014); (Pires e Polidori, 2009); (Verstegen et al., 2014)
Modelagem de expansão da mancha urbana para regiões	Brasil, Portugal	White Engelen, 1997; Umbelino, 2012, Furtado &

metropolitanas

Van Delden, 2011; Costa, 2010

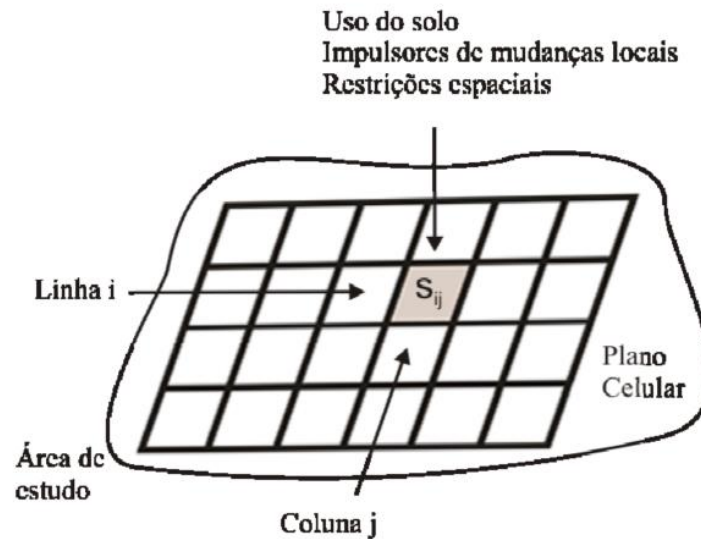
Propagação do Fogo	Brasil	Soares-Filho et al. (2002)
Estudos de população, espaço e ambiente	Brasil	(Umbelino e Barbieri, 2010)
Expansão Urbana	EUA, China	Batty e Xie (1994); Clarke e Gaydos (1998); Wu (2002)

Fonte: Autor

Uma questão pertinente a essa representação refere-se à escolha do tamanho da célula ou *pixel* (grão da paisagem) em função da escala de observação. Para tanto, busca-se uma solução de compromisso, definindo-se um tamanho que atenda certa exatidão cartográfica, capture a frequência espacial do fenômeno modelado e ainda permita um desejável desempenho computacional.

A simulação CA se caracteriza pela discretização da área de estudo através de um plano celular (PC). O plano celular é formado por células regulares, usualmente quadradas, que definem a unidade espacial de estudo. Esse tipo de representação espacial é denominado de *raster* no ambiente SIG. Todas as variáveis (classes de uso do solo, impulsionadores de mudança e restrições espaciais) são representadas no plano celular (Figura 14).

Figura 14 - Discretização da área de estudo no plano celular



Fonte: Valencia (2008)

A grande *expertise* do modelo é a regra de transição, pois é ela que determina quando e porque o estado de uma célula se altera. A dinâmica de aplicação das regras de transição em um CA é semelhante à de um filtro espacial, pois a cada intervalo de tempo todas as células são avaliadas e, quando for o caso, modificadas para um novo estado (PAIVA, 2019).

Para Costa (2010) é fundamental considerar nos modelos CA, a forma como se determinam as regras de transição, já que essas determinam a dinâmica espacial do sistema, servindo como algoritmos que conduzem à alteração do estado das células ao longo do tempo. Segundo Li *et al.* (2008), essas regras podem ser representadas de várias formas. Várias metodologias são utilizadas em regras de transição como, por exemplo: matrizes de peso (WHITE e ENGELN, 1993), modelo SLEUTH (CLARKE e GAYDOS, 1998), avaliação multicritério (WU e WEBSTER, 1998), análise de regressão múltipla (SUI e ZENG, 2001), regressão logística (WU, 2002), redes neurais (LI e YEH, 2002) e árvores de decisão (LI e YEH, 2004).

Wu (2002) e Almeida *et al.* (2003) destacam o uso de uma abordagem estocástica para configurar os valores dos parâmetros de um modelo CA. Em apenas Wu (2002), o estudo derivou a probabilidade inicial, exemplo a priori de simulação a partir da observação de

dados sequenciais de uso do solo. A probabilidade inicial foi atualizada dinamicamente de acordo com as regras locais baseadas na importância do desenvolvimento da vizinhança, aplicando o modelo para simular o processo de transição do rural para o urbano na cidade de Guangzhou (China).

Almeida *et al.* (2003) introduziram o método probabilístico da teoria de Bayes e abordaram o conceito de pesos da evidência (*weight of evidence*) para simular as alterações urbanas. O modelo foi aplicado a uma cidade brasileira de média dimensão, combinando vários fatores socioeconômicos e infraestruturais com o intuito de prever a probabilidade das mudanças entre tipos de usos do solo.

A literatura destaca que os CA podem ser considerados como uma categoria de modelos espacialmente explícitos (ou mais genericamente, modelos dinâmicos espaciais). O termo “espacialmente explícito” não é novo, mas é empregado para caracterizar modelos que procuram descrever e prever a evolução de atributos ambientais em subunidades de área com distintas localização e configuração (BAKER, 1989). Briassoulis (2000) subdivide estes modelos em espacialmente explícitos integrais (georreferenciados) e espacialmente explícitos parciais (não-georreferenciados).

Para Almeida (2003), os modelos de CA podem contemplar aplicações teóricas e práticas, onde as primeiras concernem exercícios abstratos, e as de caráter prático, experimentos que lidam com estudos de caso reais.

4.4 Cadeias de Markov

Cadeia de Markov ou o termo em inglês “*Markov Chain*” são processos estocásticos com a chamada propriedade markoviana. Esses processos têm aplicabilidade desde na biologia até a economia. Um processo estocástico revela a propriedade markoviana, se os estados anteriores do processo são irrelevantes para a predição dos próximos estados, desde que o estado atual seja conhecido.

Probabilidades ligadas a jogos, evolução de populações e resultados sobre teoria de filas são algumas aplicações. Também se encontram aplicações de Cadeias de Markov em modelos epidêmicos, processos de migração, estudos sobre o DNA, modelos de gerenciamento de recursos, modelos para processos de decis sobre o DNA, modelos de

gerenciamento de recursos, modelos para processos de decisão, modelo para difusão de informação, dentre outros.

Se o espaço de estados é discreto (enumerável), então o modelo de Markov é denominado Cadeia de Markov. Um Processo Estocástico é dito ser um Processo Markoviano se definido como um conjunto indexado de variáveis aleatórias, $\{X_t\}$, em que o índice t percorre um dado conjunto T . Normalmente, admite-se que T seja um conjunto de inteiros não-negativos e X_t represente uma característica mensurável de interesse no instante t .

Equação 2:

$$P(X_{t+1} = j | X_0 = k_0; X_1 = k_1; \dots; X_{t-1} = k_{t-1}; X_t = i) = P(X_{t+1} = j | X_t = i)$$

Para $t = 0, 1, \dots$ e toda sequência $i, j, k_0, k_1, \dots, k_{t-1}$.

Que corresponde a probabilidade condicional de qualquer “evento” futuro, dados, “quaisquer” eventos passados e o estado presente $X_t = i$, é independente dos eventos passados e dependente apenas do estado atual. Um processo estocástico X_t ($t = 0, 1, \dots$) é uma Cadeia de Markov se possuir a propriedade markoviana. As probabilidades condicionais $P(X_{t+1} = j | X_t = i)$ para uma Cadeia de Markov são chamadas probabilidades de transição. Se, para cada i e j ,

Equação 3

$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) = P(X_1 = j | X_0 = i)$$

, para todo $t = 1, 2, \dots$ então as probabilidades de transição são ditas estacionárias.

Portanto, ter probabilidades de transição estacionárias implica que as probabilidades de transição não mudam ao longo do tempo. A existência de probabilidades de transição (em uma etapa) estacionárias também implica o mesmo, para cada $i; j$ e n ($n = 0, 1, 2, \dots$),

Equação 4

$$P(X_{t+n} = j | X_t = i) = P(X_n = j | X_0 = i)$$

para todo $t = 0, 1, \dots$. Essas probabilidades condicionais são denominadas probabilidades de transição (em n etapas).

Para simplificar a notação com probabilidades de transição estacionárias, observe-se que

Equação 5

$$p_{ij} = P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$$

$$p_{ij}^{(n)} = P(X_{t+n} = j \mid X_t = i)$$

Assim, a probabilidade de transição em n etapas $p_{ij}^{(n)}$ é simplesmente a probabilidade condicional de que o sistema estará no estado j após exatamente n etapas (unidades de tempo), dado que ele inicia no estado i a qualquer instante t . Quando $n = 1$, note que $p_{ij}^{(n)}$.

Para $n = 0$, $p_{ij}^{(0)}$ é apenas $P(X_0 = j \mid X_0 = i)$ e, conseqüentemente, é 1 quando $i = j$ e 0 quando $i \neq j$. Como as $p_{ij}^{(n)}$ são probabilidades condicionais, elas devem satisfazer as seguintes propriedades:

Equação 6

$$p_{ij}^{(n)} \geq 0, \forall i, j, n,$$

$$\sum_{j=0}^M p_{ij}^{(n)} = 1, \forall i, n$$

A maneira mais conveniente de mostrar todas as probabilidades de transição em n etapas é o formato de matriz a seguir:

Equação 7

$$p_{(n)} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Estado} & 0 & 1 & \dots & M \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ M \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{00}^{(n)} & p_{01}^{(n)} & \dots & p_{0M}^{(n)} \\ p_{10}^{(n)} & p_{11}^{(n)} & \dots & p_{1M}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{M0}^{(n)} & p_{M1}^{(n)} & \dots & p_{MM}^{(n)} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

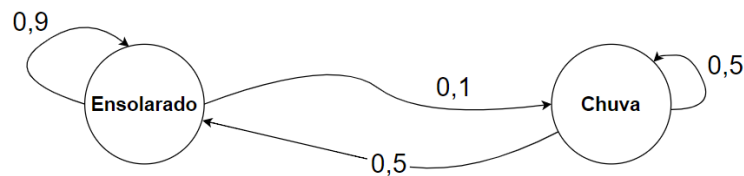
Que é denominada de matriz de transição em n etapas. A probabilidade de transição em determinada linha e coluna é para a transição do estado de linha para o estado de coluna.

Esta estrutura possibilita o desenvolvimento do diagrama de transição conforme a Figura

15.

Figura 15 - Matriz de Probabilidade e Diagrama de Transição

$$P = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,1 \\ 0,5 & 0,5 \end{bmatrix}$$



Fonte: Adaptado Rai (2016)

Os modelos "*Cellular Automata*" e "*Markov Chain*" são considerados vantajosos para modelagem de mudanças no uso do solo (MISHRA e RAI, 2016). Autômatos celulares adicionados a um modelo Markov levam a prováveis transições espaciais que ocorrem em determinada área durante um período de tempo (SUBEDI *et al.*, 2013). Em outras palavras, a quantidade de mudanças do modelo *Markov Chain* é usado de forma espacial através de autômatos celulares (MISHRA e RAI, 2016). O modelo CA-Markov utiliza os resultados da análise da cadeia de Markov, particularmente o arquivo da Área de Transição, para aplicar um filtro de contiguidade para permitir o desenvolvimento de outras características de uso do solo desde o segundo tempo até um período posterior. Um CA é capaz de desenvolver uma ponderação espacial sobre as áreas particulares que têm aproximadamente o mesmo para o uso do solo existente com base em classes, e não é aleatório (SUBEDI *et al.*, 2013). Portanto, o modelo CA-Markov é considerado uma abordagem robusta por causa da estimativa quantitativa e da dinâmica espacial e temporal que ela tem para modelagem da dinâmica LULC (JOKAR ARSANJANI *et al.*, 2013; MISHRA e RAI, 2016; PARSA *et al.*, 2016; SUBEDI *et al.*, 2013)

4.5 Matriz de Transição

A modelagem dinâmica, inicialmente compreende a obtenção de uma matriz de transição, que é gerada a partir da tabulação cruzada dos dados de uso e cobertura do solo, nos diversos anos considerados. A função de mudança é outra componente que opera sobre os mapas de probabilidades, buscando localizar as quantidades desejadas de mudanças, através de escolhas aleatórias e ordenadas das células mais prováveis. Sendo um princípio dos autômatos celulares, a vizinhança tem uma forte influência sobre o estado da célula, tendo a formar padrões espaciais com arrumações distintas em relação ao tamanho, forma e orientação das manchas.

Uma maneira de representar este tipo de modelo de estado e de transição dá-se pelo uso da matriz de transição, que, por si só, não consiste em um modelo espacial, sendo adimensional, mas na distribuição de mudanças por toda a paisagem, ou seja, o primeiro componente da função mudança (SOARES FILHO *et al.*, 2003). Temos então a matriz de transição:

Equação 8

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & P_{2\cdot} & P_{2j} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{3j} \\ P_{j1} & P_{2j} & P_{j\cdot} & P_{jj} \end{bmatrix}^v * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0}$$

Sendo o estimador de P_{ij} dado pela seguinte equação, onde o n é o número de classes no mapa.

Equação 9

$$\hat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^n n_{ij}}$$

O modelo de transição, como foi definido, requer apenas que seja especificado o número de estados (classes) e que sejam conhecidas as probabilidades, ou melhor, as taxas de transição de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto.

4.6 Análise de Correlação de Mapas de Classes

É possível na estatística determinar a probabilidade de encontrar mudanças mediante algumas evidências do problema ou de variáveis explicativas. Entretanto, essas variáveis devem ser independentes, conforme o Teorema de Bayes, para que possam explicar uma transição de classes de uso e cobertura do solo. Para tanto é comum se utilizar o Índice de Cramer (V), que toma como base medidas absolutas de áreas das classes, e a incerteza de Informação Conjunta (U), que se refere aos valores percentuais e constitui-se em uma medida de correlação entre os mapas. Ambos os índices são utilizados para verificar a independência entre os pares de variáveis explicativas do modelo, a partir da matriz de transição entre pares de mapas variáveis. Tais Índices variam de (0) a um (1): quanto mais próximo a zero menor será o grau de dependência ou associação entre as variáveis. No entanto, o contrário representará dependência. Os valores inferiores a 0,5 para ambos os índices mencionados sugerem menos associações. Com isso, variáveis correlatas devem ser desprezadas ou combinadas em uma terceira que substituirá o par correlacionado no modelo. (ALMEIDA, 2003)

O índice de Cramer é definido por BONCHAM-CARTET (1994) pela seguinte fórmula:

Equação 10

$$V = \sqrt{x^2 / T..M}$$

Onde:

T= totais marginais da matriz de tabulação cruzada entre dois mapas A e B

X^2 = estatísticas qui-quadrado;

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

A incerteza de Informação Conjunta (U) também se baseia na matriz de tabulação cruzada T; assim, U(A,B) pode ser usada como medida de associação, sendo definida por:

(Bonham-Carter, 1994)

Equação 11

$$U(A,B) = 2[H(A) + H(B) - H(A,B) / H(A) + H(B)]$$

A qual varia entre 0 e 1, sendo que quando os dois mapas são completamente independentes, então $H(A,B) = H(A) + H(B)$ é 0, e quando os dois mapas são completamente dependentes, $H(A) = H(B) = H(A,B) = 1$, é $U(A,B)$ é 1 (ALMEIDA, 2003). Bonham-Carter (1994), reporta que os valores inferiores a 0,5 tanto para V quanto para U sugerem menos associação do que mais. Este critério foi adotado para a seleção das variáveis explicativas do modelo.

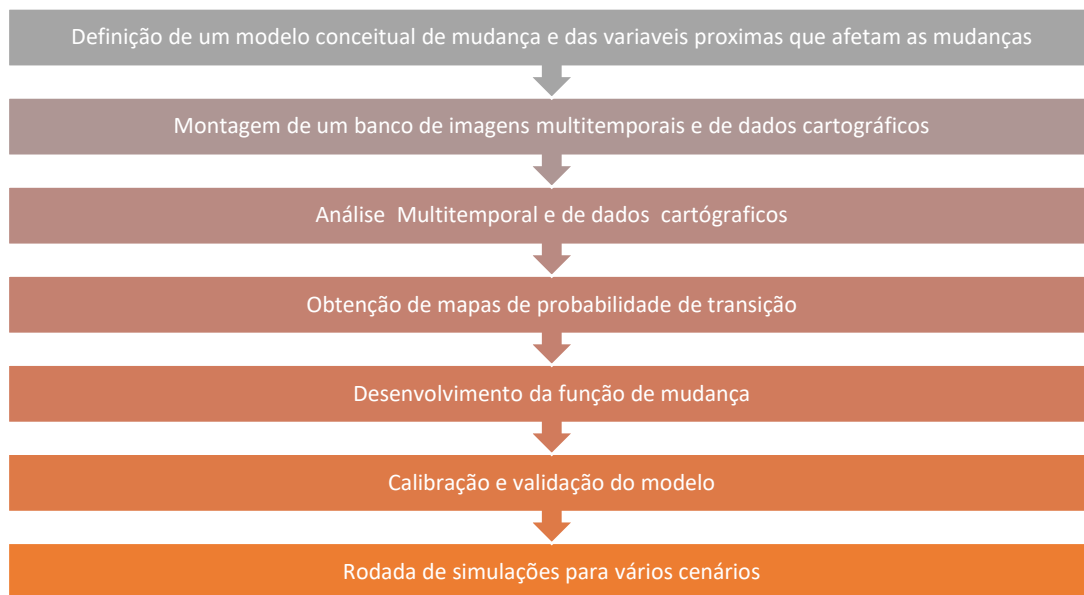
4.7 Modelos de Simulação: Compressão dos Padrões e Configuração

A simulação é vista como um instrumento de aquisição de conhecimento, a partir da integração da informação sobre sistemas dinâmicos. Neste ponto, Lévy (1998) aponta a simulação como um importante dispositivo heurístico, que só se tornou viável graças ao desenvolvimento científico, tanto na área de informática, como também na modelagem de sistemas.

Araújo (2001) cita que o uso de tais modelos visa auxiliar o entendimento dos mecanismos causais e processos de desenvolvimento de sistemas ambientais, e assim determinar como eles evoluem diante de um conjunto de circunstâncias.

Todos os modelos de simulação têm um fluxograma bem similar, com algumas adaptações, conforme pode ser visto na Figura 16.

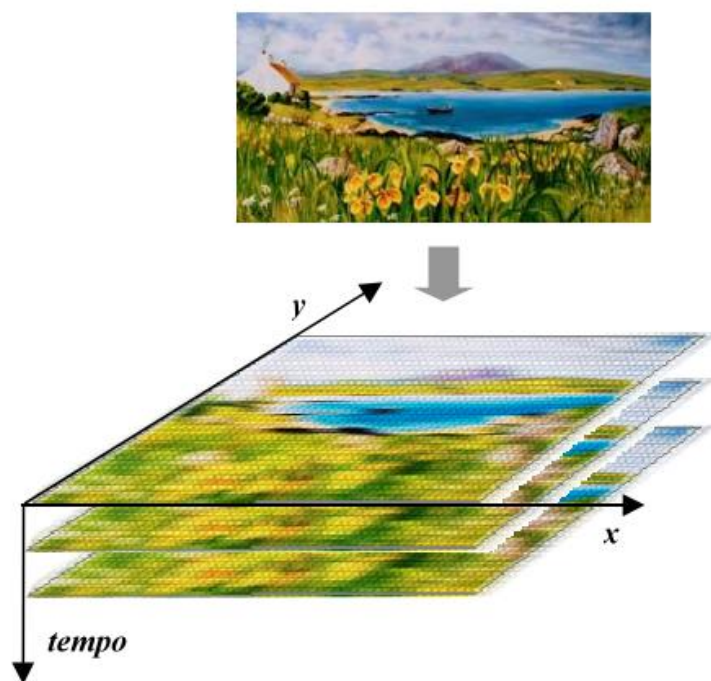
Figura 16 - Fluxograma de Desenvolvimento e aplicação de um modelo de Simulação



Fonte: Adaptado Cf. Soares-Filho *et al.* (2017)

Araújo (2001) considera uma forma conveniente de pensar sobre um modelo espacial, na qual ele introduz o pensamento de uma paisagem composta por uma variedade de arranjos de elementos de paisagem – os quais representam os ecossistemas ou classes de cobertura e uso do solo, sobrepostos a uma grade ou matriz, sistema de representação 2D conhecido como *raster* ou matricial. Os elementos de paisagem passam ser representados por *pixels* ou células com o mesmo valor em uma única camada de informação (Figura 17).

Figura 17 - Abstração da paisagem em um modelo espacial de mudanças, usando-se uma estrutura *raster*



Fonte: Filho *et al.* (2017)

O desenvolvimento de um modelo de simulação de mudanças da paisagem passa pela solução da função, que descreve as mudanças nos padrões espaciais de um tempo t para um novo padrão espacial no tempo $t + v$.

Equação 12

$$X_{t+v} = f(X_t, Y_t)$$

Onde X_t é o padrão espacial no tempo t e Y_t é o vetor ou conjunto escalar de variáveis que afetam a transição, no caso, variáveis com coordenadas espaciais.

Segundo Soares Filho *et al.* (2001), a Equação 12 implica na solução de modelos espaciais dinâmicos, onde a definição dos processos no tempo t controlam o desenvolvimento do padrão espacial para o tempo $t+v$. A construção de um modelo de simulação visa obter medidas de alguns aspectos do estado atual da paisagem que possam

fornecer indicações do seu potencial para se tornar algo diferente, diante diversos conjunto de condições.

Portanto, a primeira etapa consiste no mapeamento de padrões mutáveis de uso e cobertura do solo da região escolhida para o estudo. Para tanto, são necessários métodos de levantamento que possibilitem identificar as mudanças na paisagem. Para este propósito, podem ser utilizados, como fonte de dados, levantamentos de campo, mapas previamente existentes, fotografias aéreas, dados publicados por censos e sensoriamento remoto orbital (SOARES FILHO *et al*, 2001).

Desse modo, os componentes básicos de qualquer modelo de mudança da paisagem são: configuração inicial, função de mudança e configuração de saída. A configuração inicial consiste em um mapa da paisagem, o qual pode ser derivado de uma série de dados, incluindo dados históricos de uso do solo obtidos via bases de dados geoespaciais ou sensoriamento remoto.

4.8 Modelos de Simulação: Regras de Transição

Um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Os Modelos de Simulação da Paisagem podem ser classificados como empíricos ou de sistemas. Os modelos empíricos, em sua dimensão procedimental, possuem três componentes chave: uma configuração inicial, uma função de mudança e uma configuração de saída (PEDROSA e CÂMARA, 2004).

Modelos empíricos são caracterizados pela simplicidade dos modelos matemáticos empregados e pelo número reduzido de variáveis envolvidas. Como exemplo, podem-se citar as Cadeias de Markov, modelos logísticos e os modelos de regressão (CARVALHO, 2019). Já os “Modelos de Sistemas”, segundo Pedrosa e Câmara (2004), procuram descrever os sistemas como um todo, isto é, tentam representar as interações entre os seus componentes. Uma característica chave desses modelos é a eficiência com que abordam a dimensão espacial, implantando conceitos tais como, as relações de vizinhança e suportando o uso combinado de múltiplas escalas. Como exemplos de modelos de sistemas podem-se citar os modelos de simulação de ecossistemas e os modelos de simulação dinâmica espacial.

Segundo Carvalho (2019), os modelos denominados de Modelos de Sistemas são classificados em: Modelos de Simulação de Ecossistemas e Modelos de Simulação Dinâmica Espacial. O primeiro é projetado para imitar o comportamento de um sistema, enfatizando as interações entre todos os seus componentes. Esses modelos são baseados na composição de ecossistemas complexos em um número de equações diferenciais. O segundo baseia-se em modelos de ecossistemas com extensões para acomodar a heterogeneidade espacial e os processos humanos de tomada de decisão (PEDROSA e CAMARA, 2004).

Segundo Carvalho (2019), uma condição comum aos modelos de projeção do uso/cobertura do solo é a de atender ao requisito de “*Pure pixels*”, o que significa que o modelo usa *pixels* que possuem adesão completa a exatamente uma categoria, ao contrário dos *pixels* misturados que têm adesão parcial para mais de uma categoria, como, por exemplo, os *pixels* de imagens hiperespectrais.

As metodologias de projeção são apresentadas como a metodologia de identificação e definição das regras de transição mais usadas. Cabe ressaltar que esses métodos podem ser usados separadamente ou mais de um ao mesmo tempo, dependendo da complexidade do algoritmo do modelo empregado e do número reduzido de variáveis envolvidas (CARVALHO, 2019).

A literatura descreve os principais modelos de projeção com a metodologia de identificação e definição de regras de transição mais usualmente usadas. Em várias obras são destacados Métodos de autoaprendizagem e metodologias de projeção baseada *em Exogenous quantity*” e “*Machine Learning*” (GOMES, 2013); (BREDEWEG, *et al.*, 2007); (PONTIUS JR. *et al.*, 2008); (GEOGRAPHICAL SCIENCES COMMITTEE, 2014). Esse métodos incorporam estatísticas de estimação tipo: Regressão Linear Simples e Múltipla, Regressão Logística Simples, Múltipla e Multinomial e Redes Neurais. (PONTIUS JR. *et al.*, 2008; PETERNELLI, 2000), (FIGUEIRA, 2006; EASTMAN, 2012); (ATKINSON e TATNALL, 1997; CHAN *et al.*, 2001; CIVCO, 1993; HSIEH, 2009; GENARO *et al.*, 2010; GEOGRAPHICAL SCIENCES COMMITTEE, 2014); (NAGABHATLA, *et al.*, 2012; RUHOFF *et al.*, 2010; PÉREZ-VEGA, *et al.*, 2012); (MISHRA *et al.*, 2014; CHU, *et al.*, 2013; LIU e SETO, 2008; WANG e MOUNTRAKIS, 2011; ISLAM e AHMED, 2011; FERNANDES *et al.*, 1996); DIMURO *et al.*, 2002; ANDERSSON, *et al.*, 2002; LI e

ZHANG, 2010; HERMANNS, 2002).

Se o espaço dos estados é discreto (enumerável), então o modelo de Markov é denominado de “Cadeia de Markov”. As propriedades desses modelos são estudadas em termos das propriedades das matrizes de transições de estados que são utilizadas na sua descrição (CARVALHO, 2019). Este modelo segundo Hermanns (2002) não é recomendado para dados amostrais escassos ou dados temporais com intervalo de longa data (relação de Dependência entre os dados). Já os Autômatos Celulares (CA) são uma entidade celular que varia seu estado de forma independente, considerando apenas o seu estado anterior e o estado de seus vizinhos imediatos de acordo com uma regra específica (BATTY, *et al.*, 1999; BURROUGH, 1998; ROY, 1996; ENGELN, 1995; CÂMARA, 1996; O’SULLIVAN & TORRENS, 2000).

Então, esta pesquisa se concentrou na metodologia que usa cadeia de Markov e Autômatos celulares como método de projeção, identificação e definição das regras de transição na simulação de mudanças no uso/cobertura do solo denominado de *Land Change Modeler* (LCM).

5. IDENTIFICAÇÃO DO MODELO PARA SIMULAÇÃO

Esta seção detalha o processo de identificação do modelo mais adequado para a simulação do uso e cobertura do solo, com foco em ocupações irregulares. Os modelos considerados foram avaliados com base em sua capacidade de representar padrões espaciais e temporais. Além disso, sua viabilidade para aplicações práticas foi cuidadosamente analisada. O principal modelo adotado foi o Land Change Modeler (LCM), escolhido devido à sua robustez na análise de mudanças dinâmicas.

- Os critérios de seleção incluem:
- Capacidade de integrar dados geoespaciais e variáveis socioeconômicas.
- Flexibilidade para aplicações em diferentes contextos territoriais.
- Precisão nas projeções de cenários futuros.

Este capítulo também inclui a descrição detalhada das etapas de parametrização e calibração do modelo, garantindo a coerência entre os dados históricos e as tendências identificadas. Resultados preliminares indicam que o modelo é eficaz na identificação de áreas com maior risco de ocupação irregular, permitindo uma gestão territorial mais eficiente.

Um desafio a ser superado na escolha dos modelos dinâmicos, principalmente quando se pretende analisar e simular questões que estão relacionadas à ótica dos problemas das ciências sociais. É a questão dos seus comportamentos potencialmente imprevisível, de escolhas subjetivas e psicologia complexa, aspectos esses difíceis de quantificar, calibrar e muitas vezes, justificar.

Modelos de mudança de uso e cobertura da terra oferecem a possibilidade de testar a sensibilidade de padrões de uso, a partir das mudanças das variáveis ou forças, e são capazes de promover informações sobre o comportamento do sistema em determinadas condições de contorno (VELDKAMP; LAMBIN, 2001). Segundo Verburg *et al.* (2006), esses modelos apresentam diversas utilidades e geralmente são utilizados para fornecer suporte à decisão no contexto de ações e políticas públicas. Frequentemente, são empregados para prever futuras configurações dos padrões de uso e cobertura da terra, baseados em diversos cenários ambientais e socioeconômicos.

Entre os vários modelos de simulação dinâmica, optou-se pelo *Land Change*

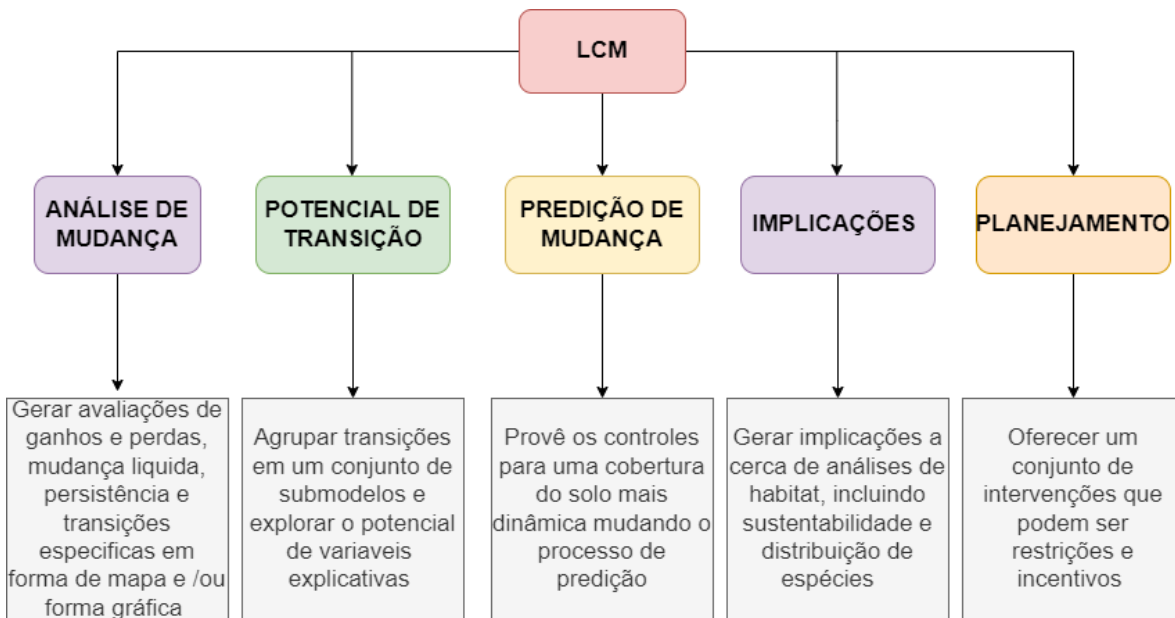
Modeler (LCM), Modelo de Mudança da Terra, pois os resultados gerados por esse modelo respondem de forma mais eficiente e apresentam produtos diversificados e elucidativos, gráficos, além de integrar, obviamente, a módulos de *softwares* disponíveis ao programa de Pós-Graduação, como: ArcGis com extensão *Land Change Modeler* (LCM); QGIS com extensão (denominada de *plugin*) e *Modules for Land Use Change Evaluation* (MOLUSCE). Diante disso, optou-se por adotar o QGIS com MOLUSCE, pois a principal vantagem do LCM, em comparação aos outros modelos é o seu potencial para modelar várias transições em diferentes modelos de previsão. Esse modelo possibilita diminuir os esforços de investimento de tempo e recursos tecnológicos e financeiros para a calibração do modelo de mudança, que consiste em identificar quais as variáveis explicativas que respondem de forma satisfatória às regras de transição.

Os modelos dinâmicos espaciais, ou espacialmente explícitos, que incorporam a dimensão espacial, geralmente são representados por uma estrutura de grade regular quadriculada (células), formando um espaço celular. Esse tipo de representação é a base dos modelos de autômatos celulares. Segundo Wolfram (1983), os CAs são idealizações matemáticas de sistemas, nas quais o espaço e tempo são discretos, com uma variável discreta em cada célula. O estado do CA é especificado pelas variáveis de cada célula e evolui em passos de tempo, em que o valor da variável em uma célula é afetado pelas suas células vizinhas. As variáveis são atualizadas com base nos valores prévios da célula, da sua vizinhança e de acordo com um conjunto de regras predefinidas.

O LCM ainda permite incluir nas simulações os dados referentes a projetos ainda em análise ou já aprovados e informar a data a partir de quando esses dados devem ser considerados ativos no modelo. O *Land Change Models* – LCM constituem-se como uma avançada técnica para responder às necessidades e interesses das investigações acerca de dinâmicas de uso e cobertura do solo urbano e regional (ALMEIDA, MONTEIRO e CÂMARA, 2007).

O LCM permite a partir dos seus diversos ambientes (Figura 18) analisar diversos cenários. Os cenários procuram descrever futuros alternativos, lidando com eventos e processos incertos para apoiar a decisão e a escolha de alternativas e destacam-se, portanto, como ferramentas de planejamento numa realidade carregada de riscos, surpresas e imprevisibilidades.

Figura 18 - Ambientes do LCM



Fonte: Adaptado de VILELA (2009)

Ocupações irregulares sobre faixas de domínio se caracterizam como sistemas complexos e não lineares e contemplam a incerteza dos eventos futuros (PEDROSA e CÂMARA, 2004). A construção de cenários deve lidar com um razoável grau de imponderabilidade. Desse ponto de vista, segundo Buarque (2003), não constitui uma atividade científica adequada e apta para explicar o passado, mas limita-se à antecipação de futuros. Entretanto, deve se basear e recorrer, necessariamente, ao conhecimento científico para estruturar as informações e compreender a lógica e a dinâmica da realidade, contando com um referencial analítico ou modelo de interpretação teórica do objeto ou do sistema.

Segundo Godet (1996), cenários são configurações de imagens de futuro condicionadas e fundamentadas em jogos coerentes de hipóteses sobre os prováveis comportamentos das variáveis determinantes do objeto de planejamento. Os cenários tratam, portanto, da descrição de um futuro – possível, imaginável ou desejável – para um sistema e seu contexto, bem como do caminho ou da trajetória que o conecta com a situação inicial do objeto de estudo, como histórias sobre a maneira como o mundo (ou uma parte dele) poderá se mover e se comportar no futuro.

Na caracterização dos cenários, é possível distinguir quatro grandes conjuntos diferenciados (Quadro 2). Os cenários segundo o propósito podem ter várias formas de acordo com o grau de importância que for conferido às latências e aos fatores de mudança que amadurecem na realidade, indicando maior ou menor abertura para inflexões e descontinuidades futuras.

Quadro 2 - Síntese das Tipologias de Cenários Quanto ao Propósito

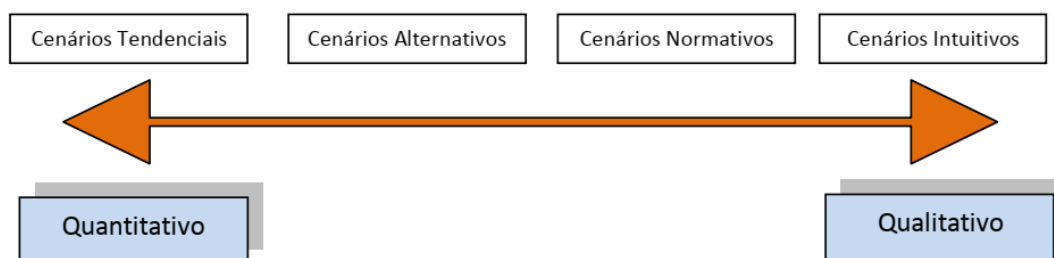
Cenário	Pergunta (futuro)
Tendencial	O que acontecerá se medidas não forem tomadas
Alternativo	O que pode realmente acontecer? (Cenário futuro possível, alternativo, frente às restrições biofísicas, às aspirações e às limitações socioeconômicas e administrativas)
Normativo	Como deveria acontecer? (Cenário futuro ideal, frente às potencialidades e restrições– desejo plausível)
Intuitivo	Como gostaria que acontecesse? (prevalece o desejo em função dos anseios dos agentes envolvidos)

O cenário desejado deve aproximar-se das aspirações do decisor em relação ao futuro, refletindo a melhor previsão possível. Embora se trate de ajustar o futuro aos desejos, para ser um cenário, a descrição deve ser plausível e viável e não apenas a representação de uma vontade ou de uma esperança. Então, quanto mais se quer evitar um fenômeno, mais são necessários dados quantitativos sobre o mesmo, demonstrando com os dados cenários tendenciais. Mas quando se tem apenas

o fenômeno,
dados cada
qualitativos. (Figura 19)

intuições sobre
são necessários
vez mais

Figura 19 - Abordagens e Tipos de Cenários

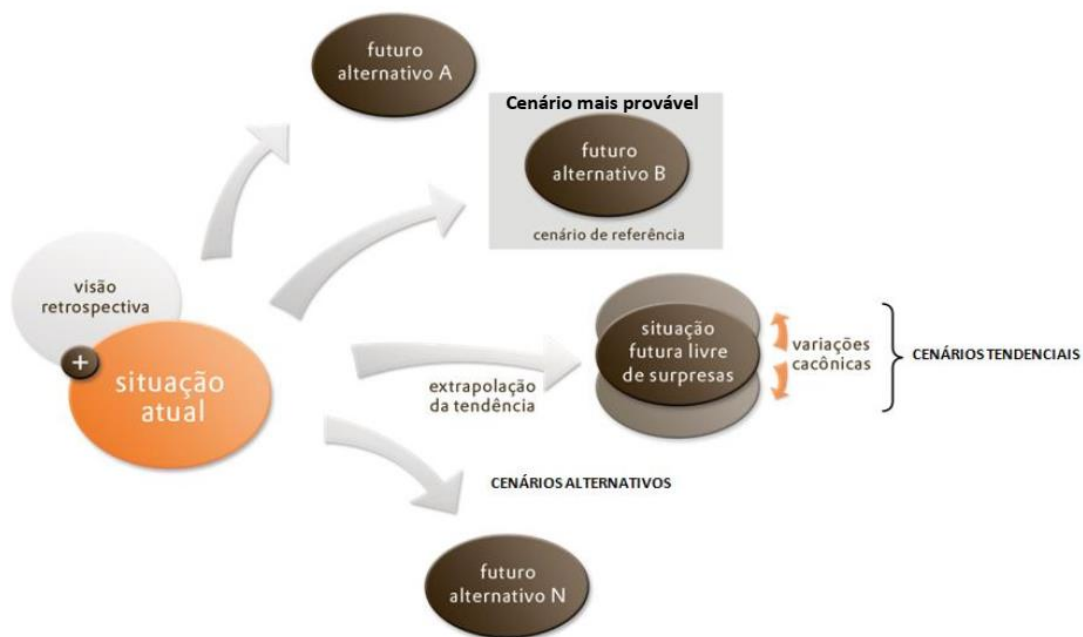


Fonte: Buarque (2003)

Para Godet (2008), cenário é um conjunto formado pela descrição de uma situação futura e do encaminhamento dos acontecimentos que possibilitem passar da situação originária para a futura. De acordo com Godet *et al.* (2008), a elaboração de cenários traz diversas vantagens: i) é possível tomar consciência dos múltiplos futuros possíveis; ii) a obrigação de analisar a interdependência que relaciona os elementos a serem estudados; e iii) a possibilidade de identificação de problemas que poderiam ser ignorados ou deixados de lado por métodos menos abrangentes. O método de Godet, descrito por Ribeiro (1997), baseia-se na identificação e projeção de variáveis-chave de cenários e dos atores relacionados a essas variáveis, ou seja, os *stakeholders* para os quais os cenários são elaborados.

A simulação do modelo LCM para anos posteriores sobre uma ótica de tendências apresentada por dados quantitativos de variáveis chaves (variáveis canônicas) pode trazer para os órgãos de gestão territorial das faixas de domínio uma situação futura livre de

Figura 20 - Comparação entre Cenários x Tendências



surpresas (Figura 20).

Fonte: Adaptado de MACOPLAN (1996)

Segundo Guban (2008), cenários oferecem visões alternativas do futuro. Eles identificam algumas diferenças básicas e os principais intervenientes, bem como a sua motivação e oferta de diferentes perspectivas sobre o desenvolvimento futuro. A elaboração e a aplicação de cenários podem ajudar a encontrar a maneira como enfrentar as incertezas futuras.

O estudo do comportamento das tendências do modelo LCM, pode ajudar em ações e políticas públicas que antecipem mudanças na ocupação dos territórios marginais às rodovias em favorecimento a não ocupação irregular sobre a faixa de domínio. Com base nessa observação, são definidas as hipóteses de evolução futura diferenciada dos diversos eventos para a construção de múltiplos cenários. Sobre esses múltiplos cenários, o planejamento tem um papel ímpar na definição de ações e iniciativas capazes de influenciar os resultados futuros de uma realidade desejada.

Além disso, o LCM pode se tornar um método para acompanhar e monitorar o movimento da realidade que é antecipado pelos cenários de intervalos iguais obtidos facilmente pela proposta do MAPBIOMAS associado a dados censitários ou índices ou indicadores disponibilizados por órgãos que estimulam as políticas públicas que afetam a realidade do fenômeno de construções sobre as ocupações irregulares. Diante disso é possível ajustar e calibrar as antecipações de futuro, introduzindo, por exemplo, técnicas de monitoramento ostensivo das áreas na iminência de ocupações irregulares nas faixas de domínio. Através da frequência de monitoramento (visitas) dessas áreas por sensoriamento remoto ou aerofotogrametria (por exemplo, o uso de *Drones/Vants*) pode-se observar o avanço de determinadas classes de cobertura da terra sobre a faixa de domínio. Assim, se pode intervir preventivamente sobre o uso e ocupação irregular das margens das rodovias com ações e políticas públicas articuladas entre o órgão responsável pela gestão territorial da rodovia e os gestores locais.

Visto a partir do planejamento territorial baseado em tendências é possível ajustar e calibrar as antecipações de futuro, introduzindo os novos elementos que amadurecem com o tempo. Se alcançados os objetivos, mesmo que se evidenciem desvios nas previsões dos cenários, a organização responsável pela gestão territorial da faixa de domínio terá condições de responder rápida e eficientemente às surpresas. Pois segundo Buarque (2003), a organização estará preparada para conviver com as incertezas e com as intensas

transformações do mundo contemporâneo, fortalecendo sua capacidade de respostas às condições emergentes e às surpresas.

Desse modo, simplificando o processo, pode-se dizer que o grande segredo da metodologia de cenários reside no reconhecimento e na classificação dos eventos em graus diferentes de incerteza. Seja qual for a abordagem ou o caminho escolhido para a elaboração dos cenários, a organização e o tratamento das incertezas são pontos centrais de todas as metodologias. Por outro lado, o poder da metodologia de cenários decorre da habilidade e da capacidade para a organização lógica (causal), de um grande volume de informações e de dados relevantes e diferenciados (VAN DER HEIJDEN, 1996).

Isso só é possível, se os técnicos responsáveis pelo exercício de construção do futuro, contarem com uma base conceitual e analítica capaz de identificar incertezas, classificar eventos, analisar relações causais e lógicas de uma grande massa de informações e processos. Com efeito, a metodologia de cenários precisa de um modelo teórico para assegurar a plausibilidade das hipóteses e analisar a consistência das combinações delas, de modo que a descrição da realidade futura seja fundamentada.

Diante disso, o LCM, sobre a ótica das possibilidades de analisar e validar os modelos conceituais obtidos pelas tendências apresentadas pelos dados possibilita modelar várias transições em diferentes modelos de previsão, tornando interessante para aplicação em diversos trechos rodoviários, onde a regionalidade difere a cada trecho.

Assim, para a construção dos cenários, parte-se de um modelo mental (teoria), que interpreta as variáveis centrais e as interações entre elas, como uma redução da complexidade da realidade com certo entendimento do sistema-objeto de análise e projeção futura. Começa-se, portanto, com a formulação explícita dos princípios teóricos de interpretação do objeto, o que não significa, evidentemente, um esforço teórico e científico de parte dos técnicos e dos profissionais envolvidos no trabalho na gestão do território (BUARQUE, 2003).

5.1 Land Change Modeler (LCM) For Ecological Sustainability

O *Land Change Modeler (LCM) For Ecological Sustainability* ou Modelo de Simulação da Paisagem para Sustentabilidade Ecológica – é um aplicativo comercial

desenvolvido pela *Clark Labs* e tem como objetivo a projeção de cenários futuros e a avaliação de impactos de cunho ecológico (CARVALHO, 2019). Foi desenvolvido inicialmente para aplicações na Ecologia. Entretanto tem sido amplamente utilizado para a modelagem de mudanças de uso do solo em geral. Ainda segundo Carvalho (2019), a interface do *Land Change Modeler* (LCM) é organizada em seis grandes eixos:

- ***Change Analysis*** - Analisa as imagens de uso do solo antigas (exige no mínimo três imagens para realizar todo o processo de modelagem);
- ***Transition Potentials*** - Modela o potencial de transição nos usos;
- ***Change Prediction*** - Projeta o curso das mudanças para o futuro;
- ***Planning*** - Avalia as intervenções de planejamento para manter a sustentabilidade ecológica.
- ***REDD Project*** - Estima a emissões de gases de efeito estufa a partir de projetos REDD.

O LCM utiliza matrizes da cadeia de Markov para determinar a quantidade de mudanças e mostrar espacialmente essas mudanças. Uma aplicação detalhada dessa abordagem pode ser encontrada em Paegelow e Camacho Olmedo (2005). Existem duas extensões que executam a detecção de mudanças, empregando-se ferramentas SIG, tanto em *software* livres, como proprietário. Segundo Holler *et al.*, (2018^a), as extensões, *Land Change Modeler* (LCM) (Clark Labs, 2017) para o ArcGis e o *plugin Modules for Land Use Change Simulations* (SIA AIR SURVEY; NEXT GIS. MOLUSCE, 2012) para o QGIS foram projetadas para analisar, modelar e simular mudanças de uso e cobertura da terra. Incorporam algoritmos conhecidos, que podem ser usados para:

- Analisar o uso e cobertura da terra e suas mudanças entre diferentes períodos.
- Modelar o uso e cobertura da terra e potencial de transição.
- Simular futuras mudanças de uso e cobertura da terra.

Além de fazer análises como a geração de cenários de alteração de mudanças, Carvalho (2019) destaca que alguns aspectos devem ser considerados na entrada dos dados no LCM, como destacados na Figura 21:

- A legenda em ambos os mapas devem ser as mesmas, inclusive com mesma

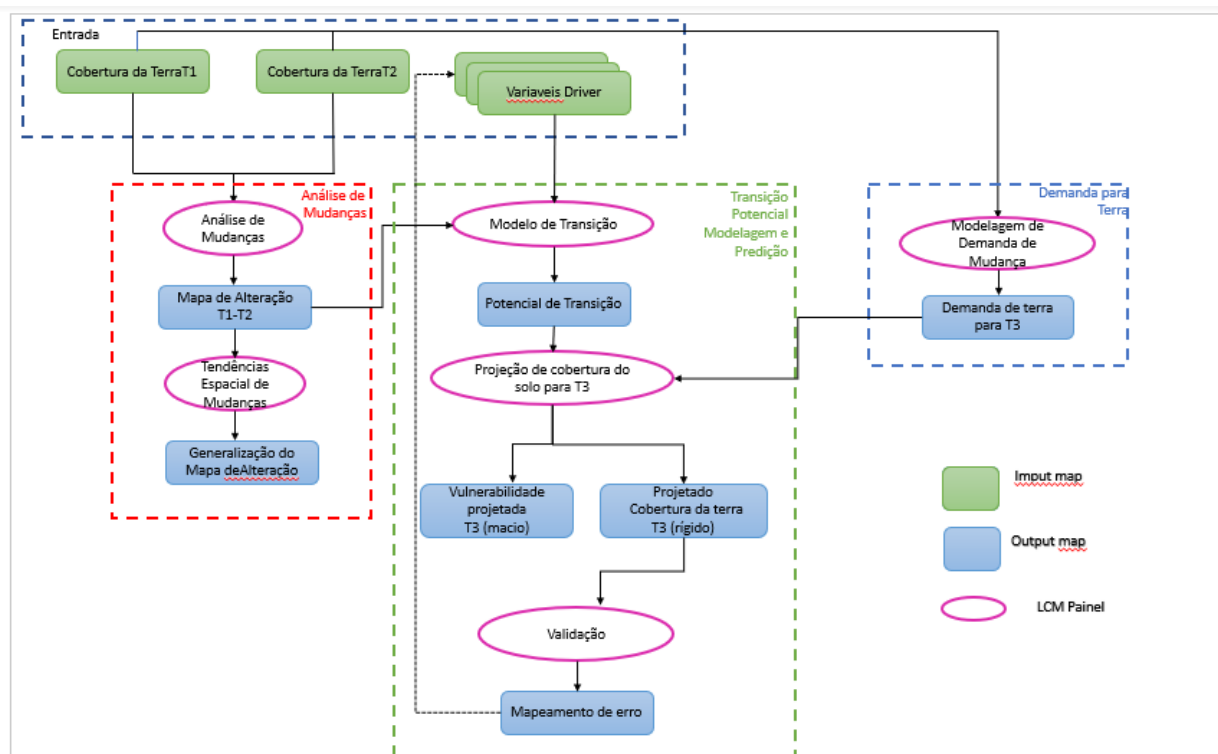
grafia;

- As categorias analisadas em todos os mapas devem apresentar a mesma sequência, por exemplo: se no mapa antigo a categoria urbano recebeu o ID 01 (um), então em todos os mapas o ID para urbano também tem que ser 01 (um), e assim por diante;
- A área delimitada como “fundo” ou não analisada/background deve ser a mesma em todos os mapas e deve apresentar valor zero como ID.
- Todos os mapas devem apresentar a mesma dimensão espacial, incluindo resolução espacial e sistema de coordenadas.

O LCM chama de Variáveis *Drivers*, as variáveis usadas para responder pelos processos de mudança nas variáveis de uso do solo. Seriam as variáveis independentes do processo de Regressão Linear, Variáveis Explicativas ou camadas intermediárias das Redes Neurais, que por sua vez, são aquelas que serão usadas para auxiliar na elaboração das regras de transição do uso/cobertura do solo de acordo com o modelo escolhido (CARVALHO, 2015).

Todas essas variáveis devem estar normalizadas numa mesma escala numérica, (por exemplo, de 0 a 1, onde 1 indica o maior potencial de transformação do uso do solo e 0 o menor potencial) (CARVALHO, 2019).

Figura 21 - Fluxograma do Processo de Análise de Mudanças, Modelos de treinamento e Validação no LCM.



Fonte: Adaptado de (Eastman, J. R. 2012b).

O desenvolvimento desta pesquisa se deteve em utilizar o MOLUSCE, que segundo Holler *et al.*, (2018) possui seis módulos: Entrada, Avaliação de correlação, Análise de mudança de área, Métodos de modelagem, Simulação e Validação. O *plug-in* fornece um conjunto de algoritmos para simulações de mudanças no uso do solo, como ANN, LR, WoE, MCE, bem como validação usando estatísticas *Kappa*, configuração essencial para a análise exploratória do modelo e metodologia proposta na pesquisa.

O MOLUSCE no módulo de avaliação de correlação contém três técnicas para a execução da análise de correlação: Correlação de Pearson; Coeficiente de Cramer e Incerteza de informação conjunta. Para maiores detalhes referentes à operação com o *plug in*, consultar as seguintes obras: Holler et al (2018), Rahman et al (2017) e Asia Air Survey (2012).

Um dos produtos gerados é o mapa de mudanças e permanências, que apresenta sua legenda em duas colunas, sendo a primeira correspondente ao ano de *T1* e a segunda ao ano de *T2*. Valores iguais indicam que o uso permaneceu, valores diferentes indicam a alteração do uso da primeira coluna para a segunda. Esse resultado é usado como dado de entrada no Modelo de Transição (*Transition Model*). Nele é criado um Submodelo onde o usuário indica todas as transformações na paisagem detectadas nas mudanças dos mapas *T1* e *T2* e que julga importante serem consideradas na modelagem do potencial de transformação da paisagem futura.

A função de mudança pode usar as matemáticas contínuas ou discretas, envolvendo desde uma simples equação linear diferencial, no caso do tempo ser considerado como uma variável contínua, ou ao contrário, uma equação de diferença, até exemplos mais complexos, como a utilização de sequências de regras de decisão, conjunto complexo de equações não-lineares com interações recursivas ou não (BAKER, 1989).

Quanto ao espaço de estados, muito embora ele possa ser contínuo, em geral, assume-se uma representação discreta. Assim, à medida que o número de estados aumenta, a capacidade computacional e o requisito de dados para esses modelos crescem consideravelmente (SOARES FILHO *et al.*, 2001).

A construção de uma função de mudança é sempre a parte mais complexa do

modelo. O modelo pode ser decomposto em duas funções, uma de quantificação das mudanças e outra dedicada à alocação espacial das mudanças.

O mapa de mudanças e permanências, saída do módulo de Análise de mudanças, entra como Modelo de Transição (*Transitions Model*), com o intuito de facilitar a compreensão das tendências de transformação. Para tal, aplica-se uma função de transformação no mapa de mudanças e permanências, onde o resultado será um mapa de potencial de transformação baseado exclusivamente nas mudanças observadas. Segundo Eastman (2012), os logaritmos de transformação mais usados são:

- O natural *log transformation* quando seus dados no submodelo são predominantemente linearizados, por exemplo, distância das vias, densidade, concentração etc.
- O *evidence likelihood transformation* quando suas variáveis no submodelo são categóricas ou de origem qualitativa.

5.2 Análises Métricas da Paisagem

As ‘métricas da paisagem’ (*landscape metrics*) descrevem um conjunto de medidas que permitem mensurar “as propriedades geométricas de elementos da paisagem e suas posições relativas e distribuições (composição e configuração) (LEITÃO, *et al.*, 2006, p. 20). As medidas utilizam informações presentes nos mapas temáticos (ex.: mapas de cobertura do solo) e podem ser calculadas através de algoritmos computacionais, com auxílio de *softwares* de análises estatísticas espaciais.

As métricas da paisagem permitem quantificar diferentes atributos da estrutura da paisagem e, acompanhar suas transformações espaciais e configuracionais ao longo de intervalos de tempo. Entre os atributos que podem ser quantificados, estão as medidas de área, perímetro, forma, contraste, agregação, diversidade e conectividade. As métricas

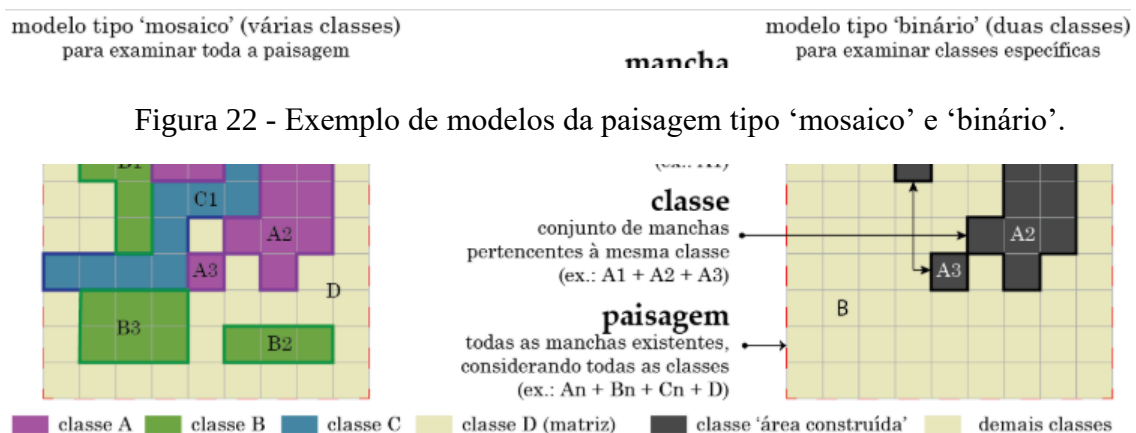


Figura 22 - Exemplo de modelos da paisagem tipo 'mosaico' e 'binário'.

podem ser calculadas em três níveis de análise: (i) mancha; (ii) classe; (iii) paisagem, conforme indicado na Figura 22, abaixo.

Fonte: GABE, M. (2017)

O modelo do tipo ‘binário’ (utilizado nas análises desenvolvidas por esta pesquisa) é uma simplificação do mosaico, podendo ser utilizado para realçar o contraste entre uma classe específica (ex. área não vegetada) e o restante do território (BISWAS; WAGNER, 2012). As métricas na escala da classe permitem caracterizar a extensão e configuração de uma classe específica, sendo que várias medidas são derivadas de cálculos de somatório ou média das medidas obtidas na análise de todas as manchas dessa classe, existentes na paisagem.

5.3 Análise Estatística

Todas as medidas estatísticas, que inibem certo grau de complexidade, são categorizadas como Análise Espacial. Isso inclui as medidas ecológicas da paisagem de padrão e dispersão (como frequência, índices de similaridade, riqueza relativa, diversidade, dominância, uniformidade, fragmentação, densidade, índice de Shannon, e graus de liberdade), mas também inclui centralidade ou conectividade, medidas de forma (como assimetria ou compactação) e todo o conjunto de ferramentas para a análise multivariada.

Com índices numéricos podem-se quantificar os atributos espaciais de uma paisagem. O uso, entretanto, das métricas desenvolvidas em Ecologia, tem sua correta aplicação com o pré-requisito do conhecimento minucioso dos parâmetros e fenômenos envolvidos. Todas estas métricas resultam em números singulares, que são o motivo por que podem ser categorizados como Métricas. Medidas de padronização e dispersão são possivelmente as operações mais tradicionais dentre todas as operações de Análise Espacial, pelo menos com respeito à estatística descritiva.

Medidas de padronização e dispersão são possivelmente as operações mais tradicionais dentre todas as operações de Análise Espacial, pelo menos com respeito à estatística descritiva. Os biólogos, os economistas, os historiadores, os sociólogos e, especialmente, os geógrafos procuram explicar os processos básicos por meio da análise

espacial dos padrões de seus objetos de pesquisa.

Embora tenham sido desenvolvidas para aplicações na área florestal as métricas de passagem definem os padrões para este tipo de estatística, que pode ser utilizada em muitos outros domínios. A Centralidade dá tanto o centro de um *cluster* de pontos como uma medida de conectividade em uma rede. Medidas de forma são utilizadas num vasto conjunto de aplicações (como em geomorfologia, biogeografia, política ou práticas arqueológicas). Muitos parâmetros básicos que podem ser encontrados nos grupos de medidas (área, perímetro, centroide, etc.) podem ser usados para descrever alongação, orientação, compactação, pontilhamento ou fragmentação.

Quantificar a fragmentação de uma paisagem fornece valores quantitativos da extensão da área e da distribuição espacial de fragmentos dentro da paisagem. A determinação da cobertura da terra para estudar o fenômeno da ocupação irregular sobre a faixa de domínio das rodovias necessita reconhecer suas mudanças através do tempo, posto que a mesma consiste em um dado momento, de um estágio no qual processos dinâmicos estão ocorrendo. Portanto, segundo Silveira (1998), qualquer estudo quantitativo de dimensões sorológicas da paisagem requer que o tempo ou as mudanças temporais sejam considerados, quer na compreensão do relacionamento dos padrões aos processos naturais e antropogênicos que os originam ou para fins de prognóstico ambiental.

As análises das mudanças de cobertura do solo foram calculadas com o QGIS com o *Plugin* MOLUSCE 3.0.11 (<http://hub.qgis.org/projects/molusce>). A ferramenta fornece estatísticas para a classe de cobertura do solo e matriz de transição para a classe de cobertura do solo.

Nas três rodovias do estudo, aplica-se a análise LUCC (Land Use na Land Cover Change) para quantificar a área de mudanças na cobertura do solo. As mudanças foram validadas estatisticamente por matriz de transição, simulação e com o auxílio de estatísticas Kappa, que medem a concordância de dois conjuntos de dados categóricos em uma comparação célula por célula (VAN VLIET et al. 2011).

Há limitações nas estatísticas *Kappa* com o uso histograma *Kappa* e Localização *Kappa* para claramente distinguir entre os erros de quantificação e erros de localização ou concordância. O histograma *Kappa* mede o acordo esperado entre dois conjuntos de dados com base na distribuição de tamanhos de classes, enquanto a localização *Kappa* mede o

acordo máximo dado pela distribuição de tamanhos de classes (VAN VLIET *et al.* 2011).

5.4 Métodos de Parametrização, Calibração, Simulação e Validação.

5.4.1 Parametrização

Esta etapa se inicia com o cálculo das matrizes de transição global e anual, que são obtidas a partir dos mapas de uso e cobertura da terra inicial e final. A matriz global fornece as taxas de transições para todo o período de simulação (2000-2018), e a matriz anual, as taxas de transição para cada passo de tempo (cerca de 10 anos), que consiste na decomposição ano a ano da matriz global.

Parametrização é a etapa que define a quantidade possível de transições no uso e cobertura do tipo de quantidade de células que podem mudar de classe de cobertura, isto é, o cálculo de todas as mudanças que ocorrem no nível macro. É ainda o momento em que se definem as regras locais para que uma célula mude de estado e a probabilidade de um lugar mudar de classe.

Segundo Bell e Hinojosa (1977), existem duas técnicas de parametrização. A primeira define as taxas anuais de transição e calcula as matrizes de transição baseadas na teoria de Cadeia de Markov de primeira Ordem. O cálculo das transições por cadeia de Markov de primeira ordem, também foi adotado por Almeida *et al.* (2003). Adicionalmente, adaptações nas técnicas foram sugeridas por Godoy e Soares- Filho (2008), Basse *et al.*, (2014), Ghosh *et al.*, (2017) e Campos e Queiros (2017). O Cálculo das matrizes pode ser realizado conforme a Equação 13:

Equação 13

$$P = H V H^{-1}$$

Em que, P é a matriz de transição do Resultado da Tabulação cruzada entre os mapas

iniciais e finais de cada período de análise; H é o autovetor da Matriz P , e V é a matriz de autovalor de P , H^{-1} é a matriz transpostas do Autovetor de P e V é a matriz de autovalor de P .

No entanto, existe uma premissa para esse processo de cálculo de taxas anuais. As matrizes devem ter propriedades ergódicas, que significa ter estados finitos de classes de uso, não ter alterações cíclicas e não possuir estados absorventes, ou seja, classes de cobertura que são completamente convertidas em outras, ou então, usos e ocupações que não existem mais (BELL e HINOJOSA, 1977). Quando a matriz não é ergódica, Godoy e Soares-Filho (2008) propõem uma adaptação, calculando as taxas líquidas médias a partir da taxa global de transição.

A segunda técnica de parametrização que pode ser utilizada é o cálculo dos pesos positivos de evidências, baseado no Teorema da Probabilidade Condicional de Bayes (BONHAN-CARTER, 1994). As equações estimam as probabilidades de transição locais e os pesos calculados para cada célula. Nessas equações, as variáveis explicativas, tanto estáticas quanto dinâmicas, são divididas em intervalos discretos. Os pesos são dados para cada intervalo de variáveis. Portanto, é possível variar o peso da variável em relação aos seus intervalos discretos de distância.

Equação 14

$$P(T_i^\alpha / V_i^1, \dots, V_i^{m_\alpha}) = O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} w_{i,v}^+} / 1 + \sum_{\alpha=1}^n O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} w_{i,v}^+}$$

Equação 15

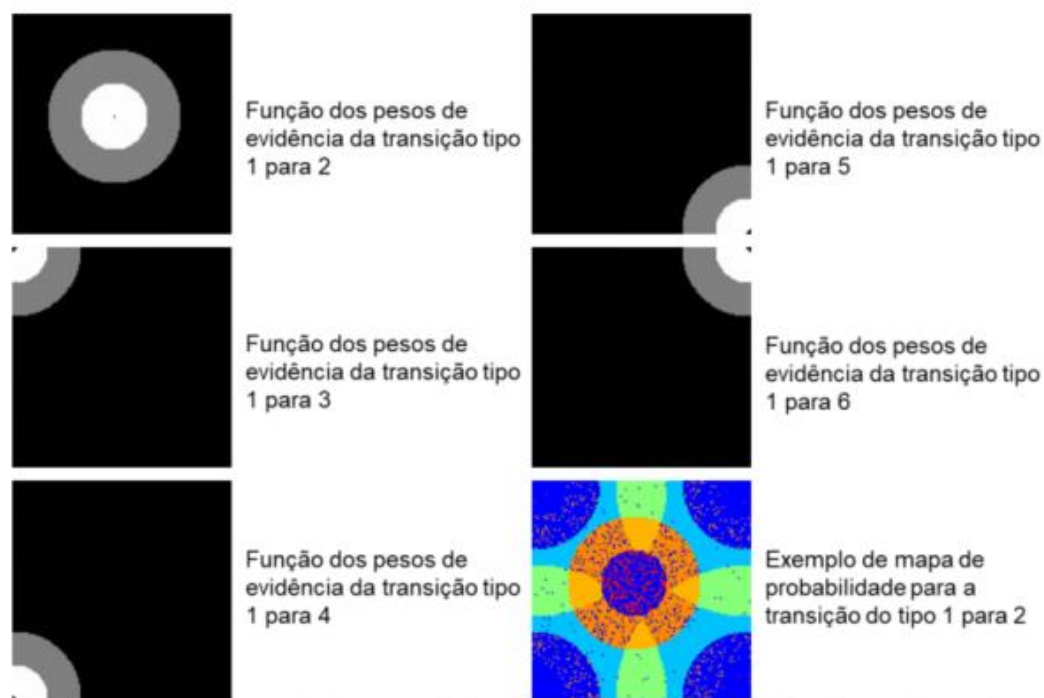
$$W^+ = \log_e \frac{P\{V_i / T\}}{P\{V_i / \bar{T}\}},$$

P é a probabilidade de Transição T de uso do solo; i corresponde às coordenadas x , y das células da matriz; α representa uma matriz de transição entre classes de cobertura em um total de η transições; $V_i^1 \alpha V_i^{m_\alpha}$ são variáveis utilizadas para explicar a transição α ; O representa o Odds ou chances de transição T^α na i -ésima célula, expressa pela razão entre a probabilidade de ocorrência de T_i^α e a probabilidade de complementar, isto é, $\frac{P\{V_i / T\}}{P\{V_i / \bar{T}\}}$

corresponde ao peso positivo de evidência $w_{i,v}^+$ para i-ésima célula referente à v-ésima variável.

A mostra a relação entre as funções de peso de evidências para diferentes tipos de transição de ocupação/cobertura. No caso, são seis classes de uso/cobertura do solo, e a matriz calculou apenas transições da classe 1 para as outras. O mapa de probabilidade varia entre cores quentes, que demonstram maior a probabilidade. Nota-se que há uma consideração de todas as funções de pesos de evidências para calcular a probabilidade de apenas uma transição (Figura 23). O número de mapas de probabilidade calculado coincide com a quantidade de transições possíveis na matriz.

Figura 23 - Exemplo de espacialização dos Pesos de Evidências e valores de Probabilidade



Fonte: Adaptado de Soa-Filho et al., (2009)

5.4.2 Calibração

A etapa de calibração compreende selecionar o melhor conjunto de variáveis de

entrada, bem como os parâmetros internos do programa, para produzir um ajuste otimizado entre a simulação e a realidade (ALMEIDA *et al.*, 2005). A primeira opção que surge naturalmente é utilizar o conhecimento da literatura ou de especialistas, porém nem sempre isso é suficiente. Outras opções que podem ser exploradas são experimentar muitos diferentes valores (o que se torna mais difícil à medida que a quantidade de parâmetros aumenta).

Então, na primeira etapa é calculado um índice para avaliar o grau de dependência ou associação espacial entre as variáveis utilizadas para explicar cada transição possível de ser identificada na matriz de transição. Para isso, o teorema de Bayes parte da pressuposição de que as evidências são independentes entre si. É necessário então, realizar uma análise de associação ou dependência espacial de forma pareada entre as variáveis. Para isso, são utilizados o Coeficiente de Cramer e o Índice de Incerteza da Informação Conjunta do inglês *Joint Information Uncertainty – JIU*. Esse índice foi proposto por Bonham-Carter (1994) para manter o pressuposto de independência das variáveis, necessária para aplicação da probabilidade condicional. A literatura utiliza um limiar máximo de 0,5 para constatar a independência entre cada par de variáveis explicativas (também chamadas de evidências). Caso o limite seja ultrapassado, uma das variáveis deve ser retirada da análise.

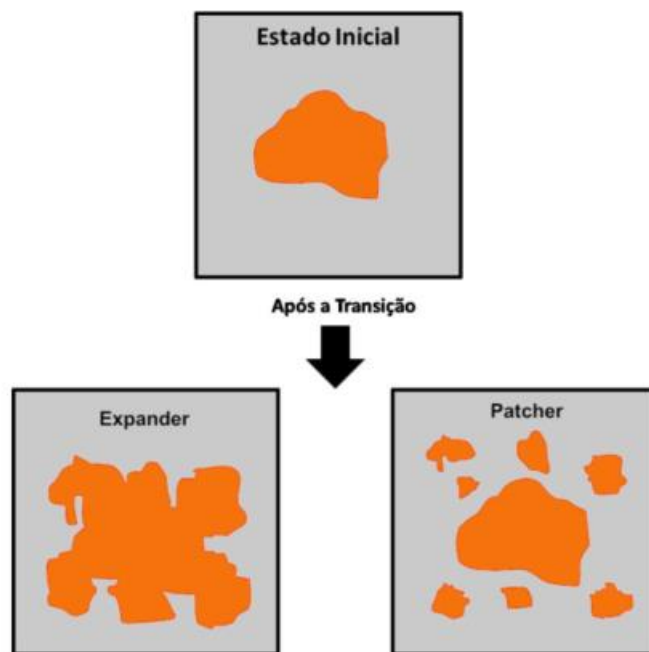
As variáveis explicativas também são excluídas do modelo quando não apresentam relação direta com a transição ou quando apresentam comportamento ruidoso no cálculo da probabilidade. Quando a variável se apresenta com peso zero no processo de discretização das variáveis contínuas, o comportamento do peso interfere no cálculo da probabilidade como um ruído (PATEL, 2019).

Com as variáveis e seus respectivos pesos calibrados, é possível configurar a primeira simulação. Para tanto, é necessária a definição dos parâmetros de formação das manchas das classes de uso e cobertura da terra. Com os modelos funcionais em passos anuais, foram estabelecidas taxas anuais de quantidade de células que podem mudar de estado para cada tipo de uso, conforme o cálculo da matriz de transição. A probabilidade indica onde essa transição é mais provável de acontecer. A simulação, por sua vez, estabelece aonde e como novas manchas, para cada tipo de uso ou cobertura, vão se formar.

A definição de onde e como as manchas serão formadas na simulação é atribuída

pelas funções de alocação denominadas de *Expander* e *Patcher*. A primeira é responsável pela expansão ou contração de manchas existentes para uma determinada classe de uso e cobertura da terra. A segunda é designada para gerar novas manchas, buscando reproduzir a estrutura da paisagem observada (SOARES-FILHO *et al.*, 2002). A quantidade total de células de uma transição de uso, para cada passo de tempo, pode ser atribuída nas duas funções de alocação, sendo que devem ser complementares, e, portanto, a soma das porcentagens de atribuição deve ser igual a 1 (ALMEIDA e GLERIANI, 2007) A Figura 24 representa uma comparação das duas funções de alocação de transição denominadas de *Expander* e *Patcher*.

Figura 24 - Comparação das funções de alocação de transições *patcher* e *expander*



Fonte: Almeida et. al (2007)

Dessa forma, os parâmetros internos a serem calibrados são: (a) proporção de cada algoritmo de transição; (b) tamanho médio de mancha em hectares; (c) variância do tamanho de mancha em hectares e (d) Índice de Isometria (ISI) das manchas de cada algoritmo.

O ISI representa um valor numérico, que é multiplicado pelo valor de probabilidade

das oito células da janela de vizinhança 3x3, utilizada pelos algoritmos de transição antes da sua aplicação. Quanto mais elevado é o valor do índice, mais compactas serão as manchas produzidas, e, de forma oposta, quanto mais próximo de zero, mais dendríticas (fragmentadas) serão elas (XIMENES *et al.*, 2008).

5.4.3 Simulação

A simulação representa um ferramental disponibilizado pela área de pesquisa que permite a geração de cenários, que representam imagens alternativas de futuro (KAWASHIMA *et al.*, 2016), a partir dos quais se pode: orientar o processo de tomada de decisão, proceder análises e avaliações de sistemas; e propor soluções para a melhoria de performance.

O modelo de simulação do processo dinâmico de transição de uso e cobertura do solo emprega uma lógica de procedimentos, que utiliza dados produzidos, estados cronológicos sequenciais simulados a partir de um conjunto de regras que fazem emergir padrões similares à realidade. Os CAs são utilizados na simulação, pois permitem uma análise da trajetória do dado ou da informação. Esta metodologia foi adaptada de Almeida *et al.*, (2003), Soares-Filho *et al.*, (2006) e Li *et al.*, (2008).

Esses autores descrevem a configuração inicial, como, por exemplo, um mapa da paisagem ou de uso e cobertura da terra, derivados de dados de sensoriamento remoto. A função de mudança pode ser contínua ou discreta, envolvendo desde uma equação linear diferencial, no caso de o tempo ser considerado como uma variável contínua, ou exemplos mais complexos, como a utilização de sequências de regras de decisão (SOARES-FILHO *et al.*, 2007). A saída consiste em mapas simulados definidos em determinado intervalo de tempo.

A discretização de modelos de simulação passa pela seleção de variáveis explicativas e pelo cálculo de seus efeitos nas mudanças, resultando em um mapa de favorabilidade ou probabilidade de mudanças (SOARES-FILHO *et al.*, 2007).

A seleção dessas variáveis determina as relações de influência com a variável dependente, definindo as células com maior ou menor probabilidade de transição de uso e cobertura da terra. As variáveis explicativas utilizadas na modelagem podem ser

discriminadas em variáveis proximais e causais. As variáveis proximais explicam as influências locais na configuração espacial dos padrões de mudanças, como, por exemplo, distâncias às estradas e às cidades. As variáveis causais explicam as forças subjacentes ou motivadoras das mudanças, sendo muitas vezes consideradas como variáveis de contorno ou exógenas ao modelo espacial, a exemplo de modelos climáticos, demográficos, econômicos e político-econômicos e seus efeitos na dinâmica do sistema estudado (SOARES-FILHO *et al.*, 2007).

Nesta pesquisa, utilizou-se a plataforma MOLUSCE de modelagem baseada em autômatos celulares denominada de *Land Cover Modeller – LCM* que usa matrizes da cadeia de Markov para determinar a quantidade de mudanças e mostrar espacialmente essas mudanças, a qual permite a construção de modelos de simulação com o emprego de funções de transição concebidas para reproduzir as dimensões e as formas das alterações da paisagem.

Uma série de procedimentos de conversão entre formatos dos mapas de variáveis e de paisagem foi necessária para a entrada desses dados no MOLUSCE, os quais resultaram em arquivos matriciais estruturados na forma de um cubo de variáveis estáticas, apresentados na como variáveis *Driver*.

As simulações foram realizadas com base nas taxas e probabilidades de transição das células, sendo que estas últimas foram determinadas pelo modelo Autômato Celular na abordagem de Monte Carlo. As saídas das simulações foram continuamente calibradas, e seus resultados validados com a situação mapa de uso de cobertura de 2018 reclassificado e adicionado a classe ocupação irregular sobre a faixa de domínio.

5.2.4 Validação

A validação é a etapa na qual o modelo é comparado com a realidade observada. A comparação não necessariamente deve resultar em um atestado de exatidão. Deve antes estabelecer um grau de confiança ou de similaridade entre os resultados (HAGEN, 2003). O interesse está na possibilidade de reconhecer como funcionam os processos de formação dessa organização espacial e qual a relação com inserção de importantes intervenções na paisagem urbana.

Portanto, a técnica utilizada por Hagen (2003) valida o grau de assertibilidade dos modelos produzidos. Como outras possibilidades, esta técnica permite estabelecer uma medida de semelhança entre dois mapas de uso e cobertura do solo, considerando um contexto de vizinhança local e não apenas uma comparação célula a célula.

O LCM realizou uma comparação entre quatro modelos matemáticos baseados nas mudanças de uso e cobertura da terra. Esses modelos analisam mapas entre duas datas, a fim de identificar os padrões e processos das mudanças (tipos e taxas de transição), e estimam as relações dessas transições com variáveis explicativas (ou explanatórias), obtendo mapas com o grau de potencialidade (ou probabilidade) de uma transição de uso e cobertura da terra ocorrer espacialmente. A partir desses mapas, os modelos fazem uso de diferentes técnicas para alocar, no espaço e ao longo do tempo, certa quantidade dessas mudanças, produzindo mapas simulados de uso e cobertura da terra. Com a cadeia de Markov obtiveram a quantidade de mudanças, bem como os autômatos celulares para reproduzir os padrões dessas mudanças a partir dos mapas de probabilidades. (MAS *et al.*, 2014).

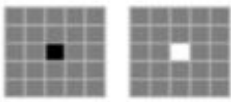
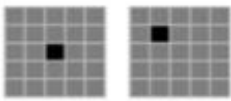
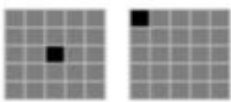
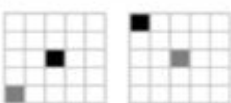
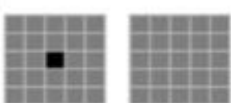
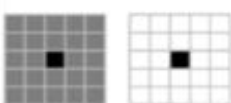
Para verificar se os modelos elaborados refletem ou não a realidade, é necessária a condução de testes estatísticos para a validação espacial do modelo. Essa validação deve ser feita em um contexto de vizinhança, pois mesmo que os mapas simulados e reais não sejam coincidentes célula a célula, o modelo ainda pode apresentar padrões espaciais similares aos observados na realidade. As plataformas empregam o Índice de Similaridade *Fuzzy* (ISF), criado por Hagen (2003). Este índice estabelece métricas de similaridade entre dois mapas por meio de janelas de vizinhança de tamanhos diferentes.

A classe da célula central de uma janela no mapa 1 é verificada em relação à janela correspondente (localizada na mesma área) no mapa 2. Caso a classe em questão também seja encontrada na posição central dentro da janela no mapa 2, a métrica é definida como sendo 1 (100% semelhante). Caso a classe se encontre dentro da janela no mapa 2, mas não na célula central, a métrica de similaridade é penalizada em função da menor ou maior distância desta célula em relação à célula central, sendo a distância unitária medida entre os centroides de duas células, para o caso de decaimento exponencial. Isso é chamado de imprecisão de localização (*fuzzyness of location*).

A Figura 25 apresenta algumas situações de comparação entre células, considerando

o conceito de incerteza de localização. É possível perceber o efeito gerado pela consideração apenas das células que sofrem mudanças de estado entre o mapa inicial observado e os dois mapas finais (observado e simulado). O decaimento em função da distância também é exemplificado com clareza.

Figura 25 - Situações de comparação de células, considerando o conceito de *fuzziness of location*

	Situação 1: o valor na célula central deve baixo. Pois as células diferem e não há nenhuma célula da mesma categoria das duas no entorno
	Situação 2: o valor na célula central é intermediário, pois há uma célula na vizinhança com a mesma cor.
	Situação 3: como na Situação 2, o valor na célula central é intermediário, porém mais baixo, considerando a distância.
	Situação 4: o valor é igual ao da Situação 3, pois nos dois sentidos a resposta é a mesma.
	Situação 5: o valor é igual ao da Situação 1, pois a vizinhança não teve alteração de estado entre os passos de tempo.
	Situação 6: o valor é igual ao da 1, pois a vizinhança não teve alteração de estado entre os passos de tempo e, nos dois sentidos, as células são iguais.

Fonte: Adaptado de HAGEN (2003)

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos descritos nesta seção foram alinhados aos objetivos gerais do estudo, com foco na replicabilidade e clareza das etapas. Cada abordagem foi detalhada de forma a permitir sua aplicação em contextos similares, garantindo transparência metodológica. Incluem-se descrições precisas das ferramentas utilizadas, como o Land Change Modeler (LCM), a parametrização dos modelos, e as técnicas de análise de dados geoespaciais e socioeconômicos, promovendo robustez nas análises realizadas.

A primeira etapa consistiu na montagem de um banco de dados, contendo informações relevantes que pudessem ser obtidas junto aos órgãos oficiais como o DNIT, IBGE, INCRA e o IPEA, associados a componente espacial que pode ser o município ou setor censitário. No contexto da cobertura do solo temos os dados do MAPBIOMAS para os anos de 2000, 2010 e 2018.

Os arquivos obtidos foram avaliados e armazenados dentro de uma estrutura que se possibilita a reconstituição do modelo no QGIS. Análise exploratória dos dados descritivos foi realizada dentro um Notebook tanto dentro do Rstudio como no Google Colab. Já geração e análise espacial quanto geração do modelo foi realizada dentro do QGIS com auxílio plugin “MOLUSCE”.

O método de desenvolvimento das análises do modelo foram realizados nas rodovias que tinham passado por uma atualização cadastral na faixa de domínio da margem da rodovia pelo projeto PROFAIXA que aconteceu no estado de PE em 2018 nas rodovias contempladas pelo programa.

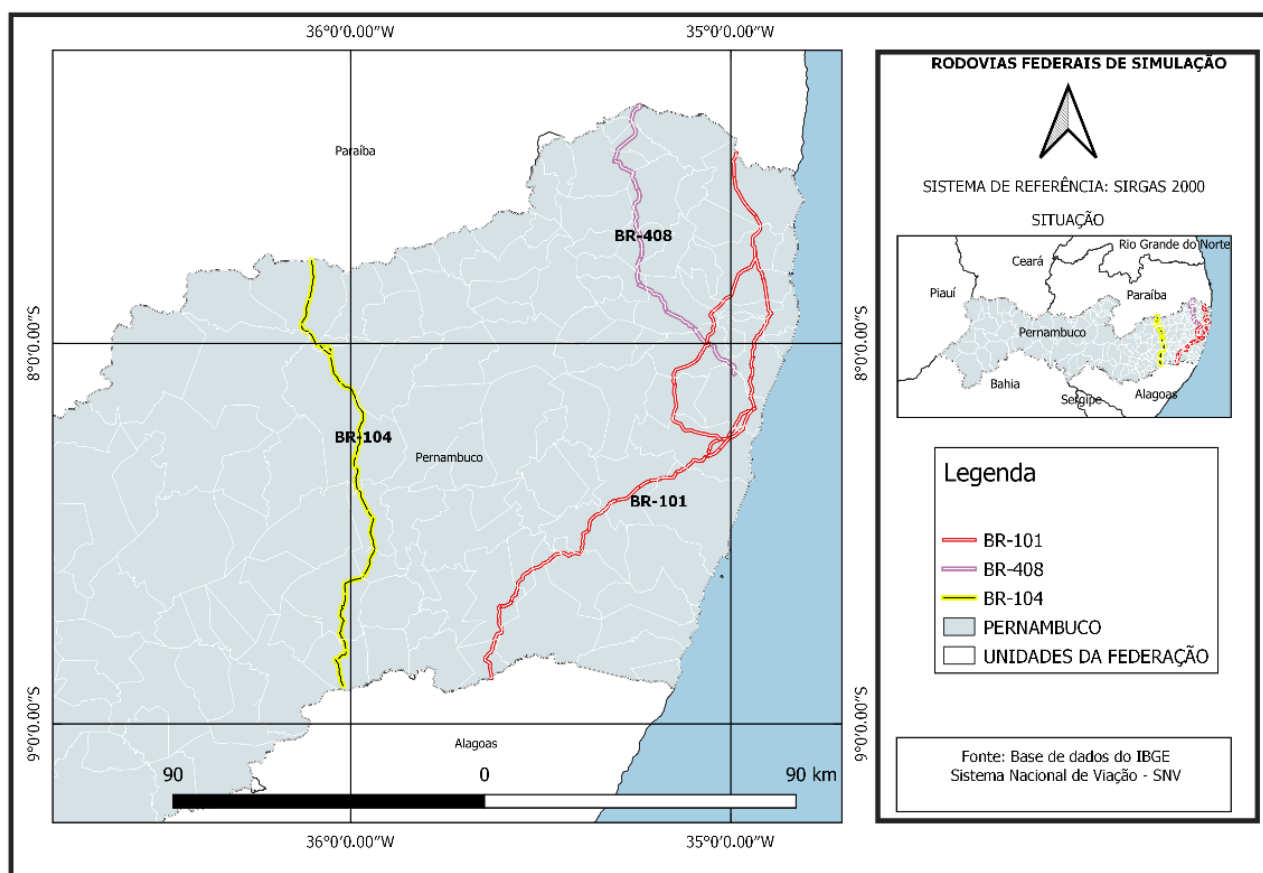
6.1 Desenvolvimento metodológico

Para identificar os tipos de cobertura do uso do solo e os fatores mais sensíveis a ocupações irregulares sobre faixas de domínio de rodovias, foi criada uma metodologia baseada na dinâmica do espaço-tempo para entender o processo.

Para isso, foram utilizadas três rodovias que cortam o Estado do Pernambuco, as rodovias BR-408/PE, BR – 104/PE e BR-101/PE (Figura 26). A escolha dessas três

rodovias se deu pelo fato que são as únicas rodovias no Estado de Pernambuco que já têm suas faixas de domínio mapeadas em nível cadastral. Além do que essas informações foram disponibilizadas pela Superintendência Regional do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT.

Figura 26 – Localização das Áreas de Estudo



Fonte: Autor

A seguir é feita uma descrição dos segmentos rodoviários estudados:

- A **BR-408/PE** é uma rodovia federal brasileira que liga a cidade de Campina Grande, no agreste da Paraíba a Jaboatão dos Guararapes, cidade de Pernambuco. Trata-se de uma rodovia de ligação de curta extensão.

- A **BR-104** tem 146,7 quilômetros em Pernambuco, sendo um importante elo entre os estados da Paraíba e Alagoas e é aproximadamente paralela à BR-101/PE (Figura 13).
- A **BR-101** é uma rodovia longitudinal brasileira que tem início no município de Touros, no Estado do Rio Grande do Norte e termina em São José do Norte no Rio Grande do Sul. O trecho que está contido no estado de Pernambuco se limita ao norte com estado da Paraíba no Município de Goiana e ao Sul com Estado de Alagoas no Município de Xexéu.

As informações contidas nessas bases de dados propiciaram a validação e calibração do modelo LCM, pois contém os dados geoespaciais das ocupações sobre as faixas de domínio dessas três rodovias. As rodovias estão vinculadas ao Programa Federal de Faixas de Domínio – PROFAIXA:

Esta pesquisa foi desenvolvida em duas Etapas representadas pelo Fluxograma da Figura 27, nas três rodovias que tiveram seu mapeamento da faixa de domínio.

- a) Montagem da base de dados e análise: Nessa etapa, foi elaborado o banco com os dados necessários para a simulação, com os mapas de uso e cobertura da terra e das variáveis explicativas. Efetuou-se uma análise qualitativa dos mapas de uso e cobertura da terra retirados do MAPBIOMAS, a fim de promover a reclassificação das classes. A partir daí, foi realizada a tabulação cruzada para avaliar as transições de uso e cobertura, a correção das transições equivocadas e a adição da classe ocupação irregular.
- b) Simulação da mudança de uso e cobertura da terra: Nessa etapa, foram realizadas a calibração, parametrização e validação da simulação das mudanças de uso e cobertura da terra. Assim, foram gerados mapas simulados da paisagem, a partir dos mapas de cobertura da terra dos anos 2000, 2010 e 2018.
- c) Validação do Modelo: a partir da comparação dos mapas gerados pela simulação do MOLUSCE com os dados vetoriais do cadastro das faixas de domínio das rodovias com as ocupações irregulares para o ano de 2018, adicionadas como classe de uso e cobertura do solo ao mapa de uso e cobertura da terra.

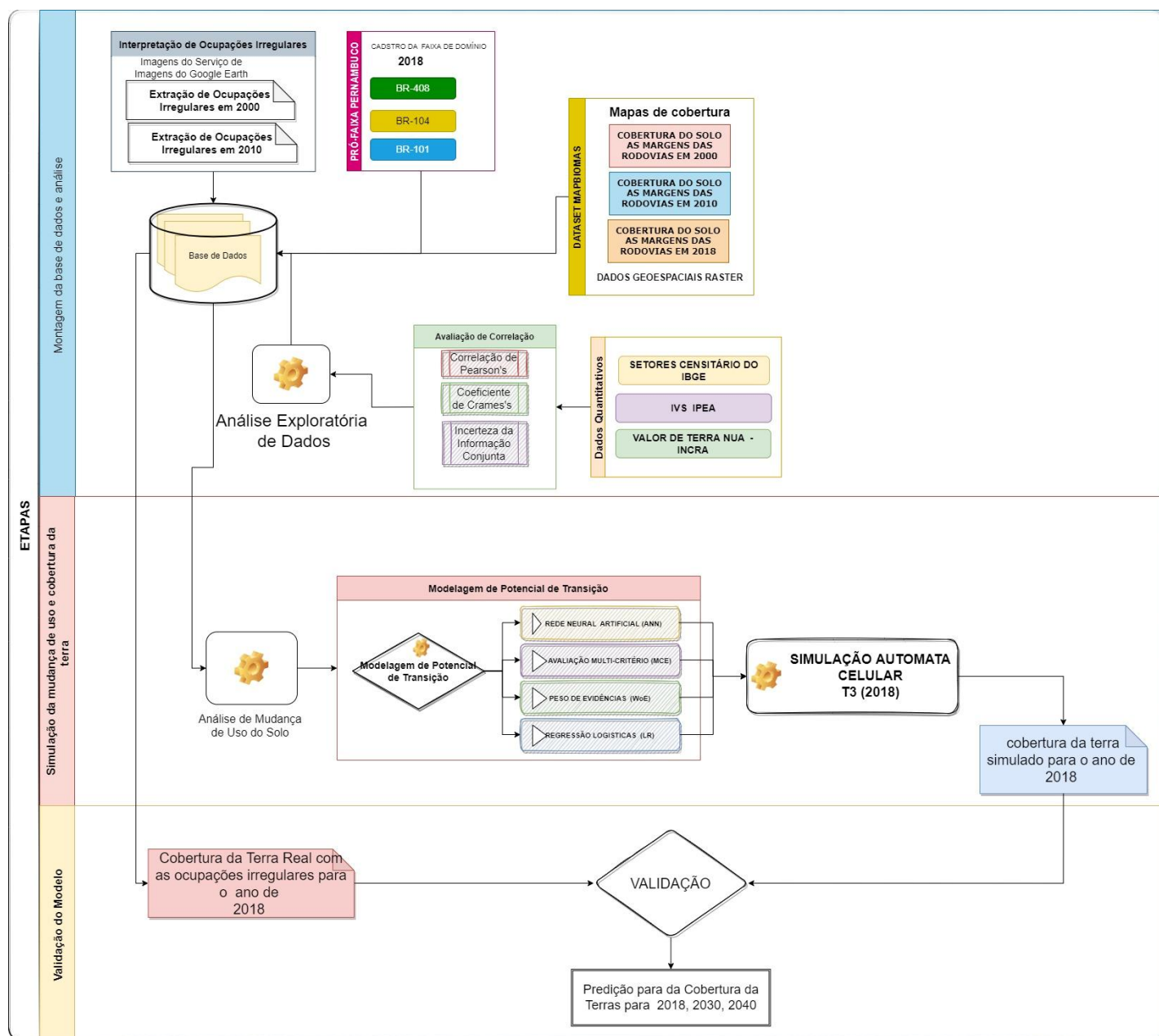


Figura 27 - Fluxograma Metodológico

Fonte: O Autor (2022)

6.2 A Unidade Territorial de Análise

Uma importante etapa em um processo de modelagem é a escolha da unidade de análise. Essa escolha é determinada tanto pela possibilidade de coletar dados em um tempo relativamente longo, quanto de gerar informações que sustentem decisões conceituais e metodológicas e fazer inferências válidas e replicáveis. No contexto da pesquisa, essa seleção ganha ainda mais relevância quando se considera a grande variedade de fatores intraurbanos, demográficos, econômicos e sociais, que podem influenciar, tanto as informações, quanto os resultados obtidos.

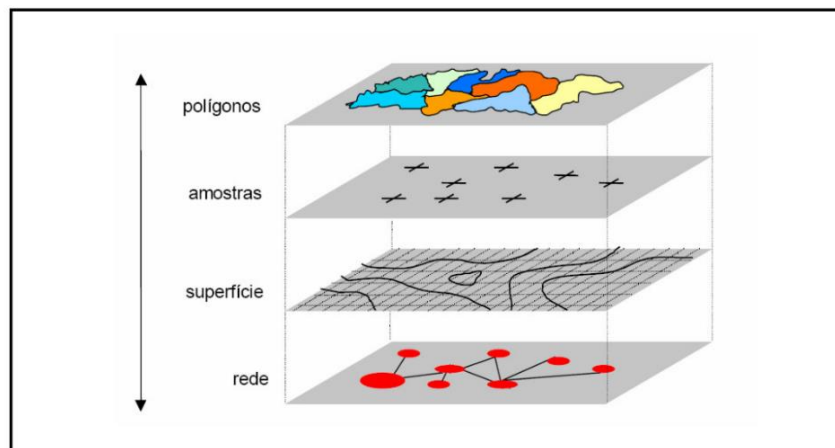
Diante disso, existe a necessidade de definir qual é o melhor tipo de espaço para representar o fenômeno de ocupação irregular sobre os terrenos e faixas de domínio marginais às rodovias.

As unidades usualmente utilizadas para a representação das variáveis demográficas trazem algumas dificuldades aos estudos de população e ambiente, para os quais o relacionamento entre as variáveis populacionais e as variáveis ambientais é de central relevância. A expressão dos dados sociodemográficos segundo limites administrativos (estados e municípios) e limites de unidades operacionais, como os setores censitários, traz uma série de restrições nem sempre devidamente consideradas nas análises conforme destacam D'Antona Carmo *et al.* (2016).

A aplicação das tecnologias da geoinformação para estudos de fenômenos de ocupação de áreas, parte necessariamente da formulação de um modelo de dados. Nesta pesquisa foram estabelecidas as abstrações formais que possibilitam o salto dimensional entre a realidade concreta e a sua expressão computacional. Em outras palavras, o processo de modelagem de dados é associado à construção de abstrações em diferentes níveis, partindo-se da identificação dos elementos da realidade das margens das rodovias, em direção a um nível puramente sintático de implementação em ambiente computacional.

A ideia de agregação ou de co-vizinhança embutida no conceito de contiguidade, é capaz de trazer expressões de representação dos territórios que revelam padrões de associações espaciais inicialmente ocultos nas tabelas (ALMEIDA et al.,2019) (Figura 28).

Figura 28- Categorias de representação usuais em SIG.



Fonte: (ALMEIDA *et al.*, 2019)

Para representar o conceito genérico de ocupação irregular sobre a faixa de domínio precisam-se definir quais atributos caracterizam essa ocupação e como se pode medi-los no território. Essa caracterização está associada à passagem do universo antológico para o universo formal, com base em conceitos bem definidos na literatura sobre universo de abstração (CAMARA e MONTEIRO, 2001).

Umas das fontes de dados geoespaciais normalmente utilizadas são os setores censitários, indicadores construídos a partir da coleta e sistematização de ocorrências pontuais agregadas por unidades de área político-administrativas ou operacionais. (CELISO; CAMARGO, 2007). As informações do censo estão agregadas ao território pelos polígonos dos setores censitários.

Segundo Ramos (2002), o setor censitário é o nível territorial mais desagregado que possui dados populacionais e habitacionais coletados periodicamente. Além de revelar distinções intraurbanas que não seriam observadas com o emprego de dados agregados nos limites político-administrativos municipais. Dessa forma, para a utilização dos setores censitários como unidade territorial de análise foram necessárias, a compatibilização das malhas censitárias e a redistribuição da população para as áreas com ocupação humana.

Percebe-se, então, que a disponibilidade de informações socioeconômicas está na maioria das vezes, condicionada a limites físicos e operacionais de levantamento logístico, ou administrativos, como no caso dos setores censitários. Também os dados agregados por setores censitários não obedecem a critérios de homogeneidade interna da população por

eles apresentados (RAMOS *et al.*, 2007).

Na presente pesquisa, as variáveis socioeconômicas foram estudadas em duas escalas geográficas: setor censitário do IBGE e município. Os estudos cuja espacialização é o setor censitário são utilizados na integração de variáveis da álgebra dos mapas, mas os estudos relativos ao município como um todo são realizados apenas para a conformação de um conhecimento geral.

- Por Setor Censitário – Censo 2000/IBGE – 1:50.000
- Densidade Populacional;
- Educação e analfabetismo (ensino médio, fundamental e básico);
- Renda média dos responsáveis pelo domicílio;
- Renda média em Salário-mínimo (que no ano de 2000 era o valor de R\$ 151,00);
- Média de moradores por domicílio.

Por município

- Valor da terra na zona rural e urbana;
- Índices de Produtividade da terra;
- Grau de Urbanização;
- Déficit habitacional;

Com esses dados foi realizada uma análise exploratória, para de início extrair alguma informação prévia sobre o comportamento das ocupações irregulares sobre as faixas de domínio. Uma informação prévia que se pode extrair é a homogeneidade do local a partir da análise espacial dos dados socioeconômicos, segundo Druck *et al.* (2004). O mesmo autor define que análises espaciais como a mensuração de propriedade e relacionamentos levam em conta a localização espacial dos fenômenos.

A partir da análise exploratória dos dados foi possível elaborar alguns mapas que vão ajudar, mesmo de forma elementar, a compreender como acontecem as ocorrências de ocupações irregulares sobre as faixas de domínio. Dentre elas podem-se gerar mapas de Conforto Domiciliar; Mapa de Fragilidade Social; Mapa de Potencial de Expansão Urbana entre outros relatados na obra de Carvalho (2015), assim como outros da literatura associada.

O cruzamento desses planos de informação pode dar indícios preliminares estáticos do comportamento do uso e ocupação dos territórios marginais às rodovias. Esses cruzamentos permitem fazer uma avaliação qualitativa da relação entre os planos de informação.

O grande problema é que pelo fato de a delimitação dos setores censitários não observar a distribuição espacial da população, há dificuldade da sua utilização como unidade de análise, especialmente para áreas heterogêneas, muitas vezes imensas, como nos setores censitários rurais (D'ANTONA e BUENO, 2016). Além disso, os limites podem apresentar alterações ao longo dos anos de coleta (como por exemplo, a criação de novos municípios ou de novos setores censitários), dificultando a criação de uma unidade espacial base para a análise em um determinado período (IBGE, 2015).

Dias, Oliveira e Câmara (2001) vêm apontando que em unidade de análise de dados agregados (como por exemplo os setores censitários) supõe-se que haja homogeneidade interna, ou seja, os agrupamentos aleatórios de indivíduos/domicílios tenderiam a ser semelhantes.

No entanto, não há qualquer garantia de homogeneidades dentro dos setores censitários, tendo em vista que a delimitação dos perímetros não é necessariamente condicionada à determinação de locais relativamente homogêneos, mas a critérios operacionais (coleta de dados) e políticos administrativos (limites municipais, distritos etc.) (FEITOSA; MONTEIRO; CAMARA, 2005; D'ANTONA e BUENOS, 2016).

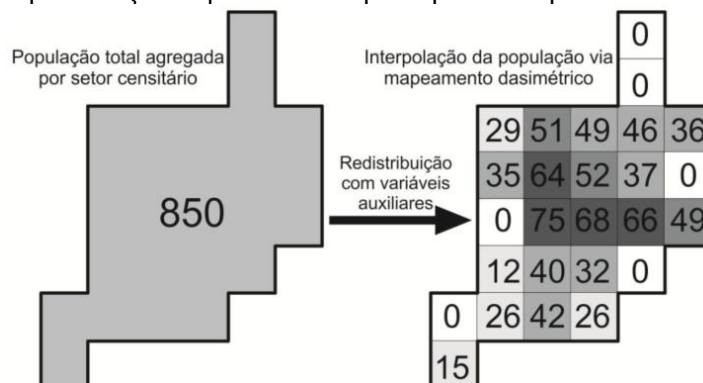
Existe a limitação relativa ao modo como as variáveis de população são apresentadas. Os dados censitários são geralmente disseminados em unidades de área (polígonos), que expressam unidades operacionais ou estatísticas, como os setores censitários e as áreas de ponderação, ou administrativas, como os municípios. Além dos problemas inerentes a qualquer análise baseada em unidades de área, como *Modifiable Area Unit Problem* (MAUP) e Falácia Ecológica, o uso de limites administrativos e/ou operacionais traz uma série de restrições, tais como: baixa resolução espacial; falta de aderência aos limites de outras camadas de informação; e alterações nos seus limites ao longo do tempo (BUENO, 2014). O uso de tais unidades não favorece a realização de análises espaciais, restringindo a articulação dos dados demográficos a outros conjuntos de informações (GRASLAND; MADELIN, 2006; DE SHERBININ *et al.*, 2002).

Esse problema foi primeiramente detectado por Gehlke e Biehl (1934) e foi amplamente

estudado por Openshaw (1984) e por Openshaw e Taylor (1979,1981), sendo que este último criou o nome pelo qual o problema é conhecido-*Modifiable Area Unit Problem* ou MAUP.

Para minimizar os efeitos, será utilizado o conceito de Grade Estatística para agregar os dados socioeconômicos, de infraestrutura e outras variáveis de interesse do modelo, utilizando técnicas de mapeamento desimétrico (BUENO, 2014). Segundo Eicher e Brewer (2001); Mennis (2003) e Langford (2001), o mapeamento desimétrico pode ser definido como método de refinamento da informação espacial que, subdivide a informação contida em uma área em unidades menores e homogêneas em relação às variáveis mapeadas, permitindo um maior nível de detalhamento da densidade da informação analisada. Um dado que será importante para a modelagem do fenômeno é a densidade populacional dentro do setor censitário que contém algumas áreas não habitadas, como mostra a Figura 29. Considerando as alternativas de representação do geocampo apresentada, a densidade populacional nesse caso está sendo representada por uma subdivisão plana, cujo, elemento básico é o polígono do setor censitário, o qual assume que a distribuição da variável pela superfície do polígono é homogênea (UMBELINO, 2012). Isso torna essa suposição não verdadeira. Para isso a presença de corpos d'água, a localização de arruamentos, os limites conhecidos das manchas urbanas e dados cadastrais indicando vazios serão usados para limitar ou excluir determinadas áreas da representação da distribuição espacial do fenômeno no polígono original.

Figura 29 - Representação esquemática do princípio do mapeamento desimétrico



Fonte: Umbelino, 2012

6.3 Grade Estatística

Em outubro de 2015, o IBGE liberou a grade regular para fins estatísticos. Essa grade é composta de células de 1 km x 1 km na área rural e de 200 m x 200 m na área urbana. Em cada célula estão sintetizados somente os dados de população residente, sexo e número de domicílios do censo de 2010. Outras informações estão sendo avaliadas para não comprometer a confidencialidade do informante (IBGE, 2015).

As grades estatísticas se constituem em uma forma de disseminação de dados que permitem análises detalhadas e independentes das divisões territoriais, visando atender, principalmente, a necessidade de se ter dados em unidades geográficas pequenas e estáveis ao longo do tempo, facilitando sobremaneira a comparação nacional e internacional e fornecendo um aumento significativo do detalhamento, particularmente nas regiões rurais, em comparação com metodologias anteriores (IBGE, 2015).

Cabe destacar que, no Brasil, a geração da grade estatística se tornou possível graças aos avanços tecnológicos adotados inicialmente nos Censos 2007 e continuados no Censo 2010, como a utilização de dispositivos de coleta eletrônicos equipados com tecnologias que permitem a captura de coordenadas geográficas e a criação de um cadastro de endereços conectado com o mapeamento viário.

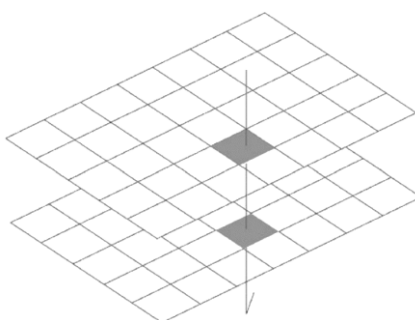
Os dados da grade para área urbana foram agregados a partir do Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos – CNEFE – (IBGE, 2016). Segundo o IBGE (2011), o CNEFE compreende os endereços de todas as unidades registradas pelos recenseadores durante o trabalho de coleta das informações (domicílios e unidades não residenciais). É um cadastro em que cada domicílio é associado à face de uma quadra, cada unidade domiciliar é associada a um registro do banco de dados e cada registro contém os dados de Logradouro, Número, Complemento, Localidade e o Ponto de Referência.

A grade do IBGE representa um marco na divulgação de dados socioeconômicos no Brasil, pois conta com estabilidade geométrica e temporal que permite analisar a evolução demográfica para uma série de aplicações, em contrapartida com os setores censitários que são geometricamente instáveis entre censos decenais (UMBELINO; BARBIERI, 2008); (FEITOSA; MONTEIRO; CÂMARA, 2005), principalmente nas regiões urbanas. Buenos (2014) destaca as vantagens da grade estatística como: Estabilidade espaço-temporal;

Adaptação a recortes espaciais; Hierarquia e flexibilidade Versatilidade.

Os dados socioeconômicos e de infraestrutura compatibilizados em grades estatísticas precisam ser normalizados para que não tragam prejuízos na interação com outras variáveis de dimensões diferentes. Posteriormente é realizada a rasterização numa dimensão compatível com o cruzamento de dados, para isso é necessário que os planos de informação estejam numa mesma resolução espacial ou precisão espacial (Figura 30).

Figura 30 - Coincidência espacial - sobreposição de planos de informação de mesma resolução.



Fonte: Moura, (2003, p. 70)

É comum que em uma análise espacial as variáveis que compõem os planos de informação apresentem fontes de dados e escalas diferentes, o que resultaria em possibilidades diferentes de resoluções espaciais. O procedimento indicado segundo Carvalho (2014) é a adoção da pior resolução entre as praticadas (maior dimensão de *pixel*), pois não é cartograficamente correto reduzir a resolução e melhorar a representação de um dado cuja fonte era de pior qualidade.

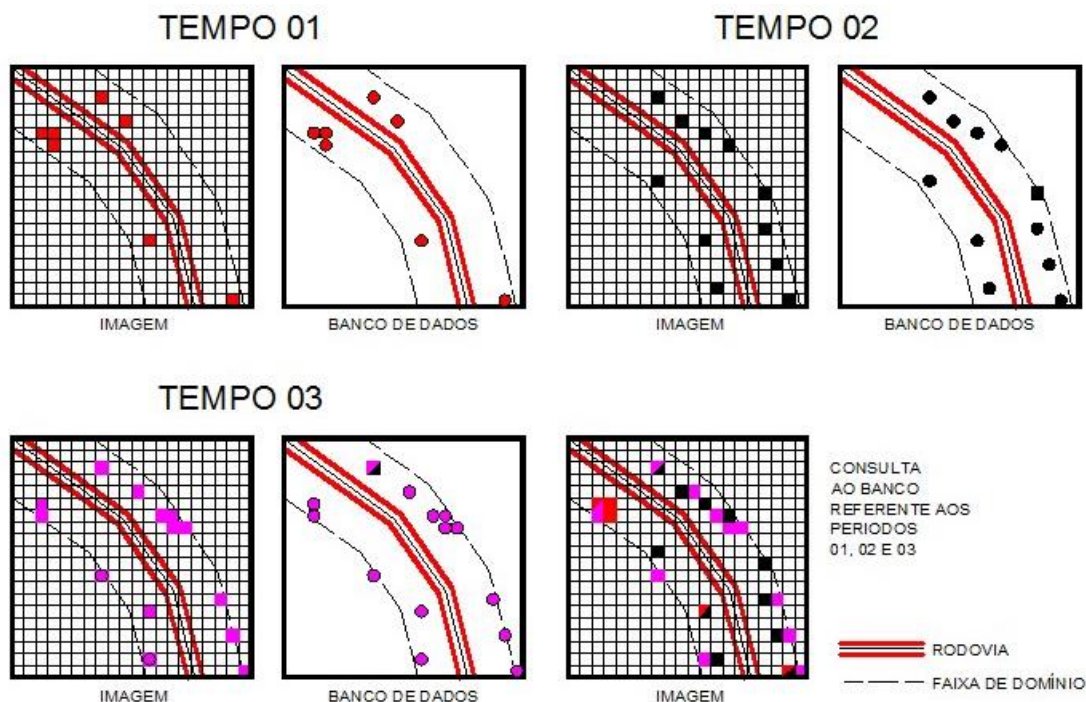
A escolha da dimensão do *pixel* da matriz que será empregada em todas as camadas, reconhecida como unidade territorial de integração dos dados, pode ser definida por dois critérios: resolução cartográfica definida pela acurácia visual (o menor elemento que se consegue visualizar) e precisão cartográfica (erro médio embutido no mapa), ou pelas dimensões definidas, a partir dos objetivos da análise (CARVALHO, 2014).

A boa resolução espacial que pode ser alcançada é uma vantagem importante ao modelar a dinâmica do uso do solo, especialmente para aplicações de planejamento e política, uma vez que os detalhes espaciais representam os recursos locais reais que as

peessoas experimentam e com os quais os planejadores devem lidar (WHITE *et al.*, 2000).

A modelagem espaço temporal das ocupações irregulares (construções) foi feita considerando a interpretação sobre imagem do Google Earth de 2000 e 2010 com auxílio dos limites da faixa de domínio da rodovia que podem ou não ser conectados espacial e temporalmente, formando assim ocupações com variação espaço-temporal. As ocupações foram obtidas através de imagens do Google Earth. Para tanto, cada pixel da imagem onde foram identificadas as ocorrências de ocupação, é representado por um ponto com uma região contígua ao seu redor representando o tamanho nominal dos *pixels* da imagem. (Figura 30). Com isso, é possível acompanhar a evolução das ocupações irregulares. Ao se realizar uma consulta, pode-se analisar tanto a posição (localização) das ocupações, quanto o seu tamanho.

Figura 31 - Modelagem espaço-temporal das Ocupações Irregulares



Fonte: Autor

Além dos dados de ocupações irregulares, a base de dados foi projetada de forma a armazenar dados de uso e cobertura da terra, socioeconômicos, de infraestrutura e ambientais.

O processo de ocupação irregular sobre a faixa de domínio é apresentado por pontos

que estão localizados no centróide das ocupações e que, normalmente, evoluem ao longo do tempo em processo incremental, estático ou de redução.

Todos os dados foram incorporados ao QGIS de arquitetura de camadas, ou seja, onde os dados descritivos e espaciais são guardados em tabelas relacionais armazenadas em um SGBD objeto-relacional. Sobre esse modelo lógico foi possível implementar consultas espaços-temporais de interesse da pesquisa como: Quais são as áreas ocupadas irregularmente no ano de 2010? ou Qual é área de ocupação irregular no ano de 2000?. Todas são possíveis de responder a partir de comando *SQL*.

Essas consultas espaço-temporais forneceram os resultados esperados, sinalizando para uma modelagem adequada, o que possibilitou a integração de dados históricos de ocupação irregular, como também de identificação da evolução das classes de uso e cobertura do solo dos terrenos marginais às rodovias.

6.4 Modelagem de uso e cobertura da terra

Para as séries temporais propostas na pesquisa, foram utilizados os dados disponíveis na plataforma MapBiomias. A pesquisa gerou um mapa anual de cobertura e uso do solo para o ano entre 2000, 2010 e 2018 com resolução de 200 m numa faixa de 5 km no entorno das Rodovias em estudo.

Os dados de uso e cobertura da terra são provenientes da Coleção 4 do Projeto MapBiomias, que utiliza os dados das Coleções 1 a 4 registradas pelos sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), e *Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor* (OLI-TIRS), a bordo dos satélites Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, respectivamente. As imagens ópticas desses sensores possuem resolução espacial de 30 m, sendo que o processamento e classificação das mesmas foram realizados no *Google Earth Engine* (MAPBIOMAS, 2019)

Com o objetivo de realizar a reclassificação das classes, foi feita uma análise qualitativa dos mapas de uso e cobertura, visando entender o que cada classe do MapBiomias estaria representando no mundo real, a fim de não se incorrer em análises equivocadas por conta de erros de classificação.

Dessa forma, baseando-se nos dados geoespaciais vetoriais do cadastro da faixa de Domínio ano de 2018 com o mapa de uso e cobertura do Mapbiomas de 2018, foi realizada uma comparação entre os mapas de uso e cobertura da terra e as imagens do PE3D e do Google Earth.

Na modelagem da BR-408/PE foi adotada a variável ocupação irregular da faixa de domínio para os anos de 2000, 2010 e 2018 obtidas a partir da limitação da faixa de domínio sobre as imagens do Google Earth de 2000, 2010 e mapeamento da faixa de domínio do DNIT com verificação do uso do PE3D de 2018.

Na modelagem da BR-104/PE e BR-101/PE foi adotada a criação de uma nova classe de uso e cobertura da terra, a classe ocupação irregular sobre a faixa de domínio obtida a partir da identificação das ocupações sobre as imagens do Google Earth dos anos de 2000 e 2010.

Com base na reclassificação dos mapas de uso e cobertura da terra, foi conduzida uma operação de tabulação cruzada, a fim de se obter os mapas de transição entre as classes. Para cada transição, foi verificada a plausibilidade de sua ocorrência na realidade, e assim, retiraram-se as transições equivocadas, que são decorrentes do processo de classificação. A partir disso, foi possível gerar mapas de uso e cobertura da terra com as classes representativas da área e apenas com as transições que realmente ocorreram.

6.5 Dados Geoespaciais

A aplicação das tecnologias da Geoinformação para estudos de fenômenos de ocupação de áreas, parte necessariamente da formulação de um modelo de dados, estabelecidas as abstrações formais que possibilitam o salto dimensional entre a realidade concreta e a sua expressão computacional.

6.6 Variáveis utilizadas nos modelos

Os modelos fazem uso de dois tipos de variáveis explicativas: (a) as dinâmicas, que são sempre contínuas, representadas sob a forma de grades numéricas de distâncias, e (b) as estáticas, que são subdivididas em contínuas (como distâncias a rodovias mapas de declividade, altimetria etc.) e discretas (como o tipo Ocupada irregularmente), expressas sob a forma de mapas temáticos.

A escolha das variáveis explicativas a serem utilizadas nos modelos foi feita com base na literatura consultada, visando avaliar se elas influenciam os processos de transição de uso e cobertura da terra sobre a ótica das classes ocupação irregular sobre a faixa de domínio. A base de dados contendo as variáveis estáticas está descrita nas Tabela 4, Tabela 9 e Tabela 13 totalizando 14 variáveis usadas nas três rodovias, que são *layers* matriciais com a resolução de 200 m ou vetores que foram transformados em raster. Criadas normalizadas e padronizadas as variáveis, elas foram agrupadas em um único arquivo matricial, ou em vários, dependendo da necessidade de análise e do *software* utilizado gerando um cubo de dados. A partir desse cubo, é possível categorizar (ou discretizar) as variáveis contínuas no QGIS, no Python ou no Rstudio.

6.7 Análise de Mudança de uso e Cobertura.

As análises das mudanças na cobertura do solo do Inglês LCC (“*Land Cover Change*”) têm como objetivo detectar e registrar as mudanças nos padrões de ocupação do solo entre dois períodos temporais distintos (2000 e 2010).

As análises são possibilitadas por procedimentos que envolvem a comparação ‘pixel-a-pixel’ dos mapas temáticos de cobertura do solo, gerando a tabulação cruzada dos dados contidos nos mapas. Esse procedimento permite produzir tabelas de contingência indicando a frequência de distribuição das áreas para cada classe, que podem ser sintetizadas em duas ferramentas de análise conhecidas como ‘estatísticas de classe’ e ‘matriz de transição’.

Essa etapa corresponde aos processos de análise das mudanças temporais, que incluem: criação dos mapas de alteração e a geração das matrizes de transição. Por meio da comparação dos mapas de uso e cobertura gerados para os períodos indicados na série temporal definida, foram elaboradas matrizes de transição entre os períodos de análise e mapas de detecção de mudanças referentes a cada período.

Os dados são analisados pelo processo de sobreposição de arquivos *raster* (matrizes). Como resultado, é exibida uma tabela cruzada que mostra a possibilidade de transformação de cada uso do solo para outros usos. Além disso, o mapa de mudança criado indica a localização das alterações da área e representa a distribuição das conversões com

informações detalhadas sobre seus atributos.

Na pesquisa adotaram-se técnicas e procedimentos metodológicos distintos para cada rodovia com o intuito de estudar as técnicas e quais variáveis, índices e indicadores afetam a dinâmica da cobertura das terras às margens das rodovias e que acabam por incentivar em algumas situações as ocupações irregulares sobre a faixa de domínio. Então, apresentam-se a seguir todas as análises realizadas baseada na fundamentação teórica e na metodologia apresentada com intuito de entender o fenômeno das ocupações irregulares (construções) sobre a faixa de domínio das rodovias estudadas (BR-408/PE, BR-104/PE e BR101/PE).

7. RESULTADOS E DISCURSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a aplicação dos modelos e os discute de forma detalhada para explorar suas implicações práticas. Cada conjunto de resultados é descrito com base nos dados analisados e nas simulações realizadas, com destaque para as tendências de ocupações irregulares nas rodovias BR-408, BR-104 e BR-101/PE.

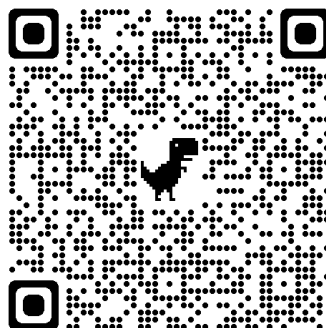
As análises comparativas entre os cenários previstos e os dados observados revelam padrões consistentes de ocupação que corroboram a eficácia dos métodos empregados. Além disso, a validação dos modelos mostra alta precisão na identificação de áreas de risco.

Os resultados também destacam a importância de considerar variáveis socioeconômicas e ambientais na formulação de políticas públicas para gestão territorial. A discussão detalha como os achados podem embasar ações preventivas e corretivas, contribuindo para um planejamento mais eficiente e sustentável.

7.1 Modelo LCM para Rodovia BR-408/PE

Os dados e os resultados estão disponíveis no repositório com o seguinte endereço eletrônico:

Figura 32 Qrcode de acesso aos Dados do Resumo da BR-408/PE

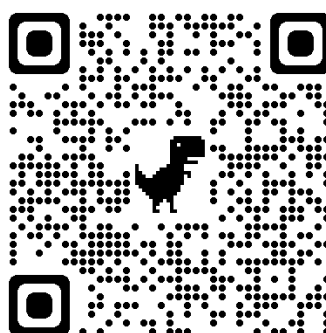


<https://data.mendeley.com/datasets/3bsrvrddgm/draft?a=c1f0ff3f-ecd4-4f34-bff3-3e8c08b23a13>

Fonte: Autor (2022)

Com mais detalhes, a descrição dos dados e a metodologia de análise exploratória e as demais estatísticas estão contidas no repositório público:

Figura 33 - Qrcode de Acesso a análise exploratória dos Dados da BR-408



<https://github.com/ErisonBarros/BR-408-Highway-Domain-Database>

Fonte: Autor (2022)

7.1.1 Abordagem Metodológica

Inicialmente buscou-se identificar os tipos de usos/ocupação e os fatores mais sensíveis a ocupações irregulares sobre faixas de domínios das rodovias. A partir deles foi

criada uma metodologia baseada na dinâmica do espaço-tempo para entender o processo de ocupação irregular, que se baseia num conjunto de dados socioeconômicos, de infraestruturas e de uso/ocupação do solo extraído da desagregação dos dados dos setores censitários em grade estatística, no entorno da BR-408/PE. Em seguida os dados vetoriais foram transformados em dados normalizados, categorizados, reclassificados e transformados em dados *raster* de 8 *bytes* sem sinal.

A mudança que se pretende estudar se refere à cobertura do solo baseada em produtos do Mapbiomas, associados aos dados dos levantamentos topográficos cadastrais da faixa de domínio, onde as classes Florestal/ Formação Natural não Florestal, Agropecuária, Áreas não Vegetadas e Corpos d' água relativa às margens da rodovia são convertidas em algum outro tipo de uso e cobertura, como por exemplo, ocupações irregulares sobre a faixa de domínio.

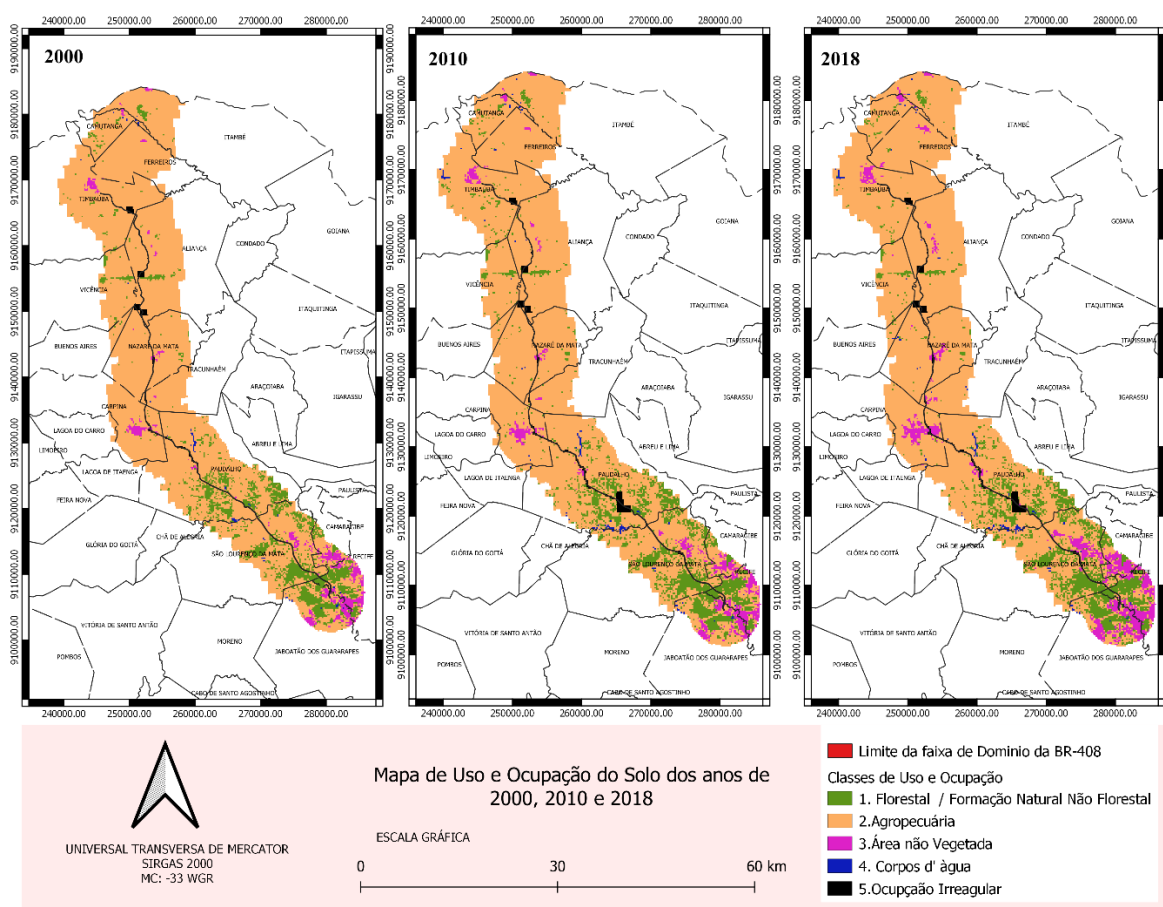
Então, para constatar o grau de influência dos índices na mudança na cobertura do solo às margens da rodovia, adotou-se o modelo de mudança de uso do solo, o *Land Change Modeler* (LCM). Para isso, foram utilizadas variáveis do censo demográfico de 2000 e 2010 baseadas nas três dimensões do Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) proposto pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em 2018.

Essas variáveis são denominadas no modelo como variáveis estáticas e variáveis dinâmicas. Algumas delas estão associadas à espacialização das infraestruturas que influenciam o fenômeno, como por exemplo: distância à rodovia, unidades de conservação, empreendimentos de influência e tipo de uso e ocupação. Para extração do uso e ocupação dos territórios marginais à rodovia em estudo utilizaram-se os dados do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas, 2020).

Os dados de uso e ocupação foram associados a informações do mapeamento da faixa de domínio da BR-408/PE dos anos de 2000, 2010 e 2018, obtidos a partir da classificação supervisionada das ocupações irregulares de 2000 e 2010, de imagens associadas às classes de uso e ocupação do solo do Projeto Mapbiomas e validadas pelo Levantamento Topográfico Cadastral da Faixa de domínio, realizado pelo DNIT em 2018. A cobertura foi extraída do MAPBIOMAS e a ocupação irregular foi extraída da interpretação das imagens do Google Earth para os anos de 2000 e 2010 e de 2018 do PE3D.

A partir dos dados geospaciais disponibilizados pelo DNIT-PE foram levantadas as principais questões acerca do tema e foi investigado se a proximidade física pode propiciar efeitos positivos ou negativos a essa população, assim como a natureza das interações sociais entre os moradores que vivem à margem dessa rodovia (Figura 34). Buscou-se assim, entender o comportamento dos mesmos em relação à ocupação irregular dessas faixas de domínio.

Figura 34 - Mapa de Cobertura e Ocupação do Solo de 2000, 2010 e 2018 da BR-408/PE.



Fonte: Autor (2022)

Para possibilitar a aplicação do modelo LCC foi necessário transformar as informações socioeconômicas, de infraestrutura e demográficas disponibilizadas e agregadas em unidades de área (polígonos) que representam setores censitários e

municípios, em uma grade estatística.

Com isso, trabalhou-se com os dados socioeconômicos adotando-se como unidade espacial a grade estatística, desagregando os dados dos setores censitários da área de influência da BR-408/PE. As variáveis socioeconômicas foram convertidas em grades que permitem uma combinação direta das mesmas com outros dados de diferentes naturezas, mas com o mesmo padrão espacial.

O sistema de células regulares serve como repositório para dados estatísticos georreferenciados (TRAINOR, 2010). Oferece ainda, algumas vantagens em relação às formas de disseminação de dados agregados baseadas em setores censitários ou municípios. Pequenas em comparação às outras unidades, as células oferecem melhor resolução espacial e, consequentemente, melhor adaptação a outras camadas de informação (GUZMÁN; SCHENSUL; ZHANG, 2013). A grade estatística permite abstrair limites político-administrativos, o que lhes atribui estabilidade temporal, uma vez que as células não variam ao longo do tempo.

No QGIS, foi utilizada a grade estatística disponibilizada pelo IBGE e a metodologia adotada no trabalho de Bueno (2014). A transferência dos dados do Universo do Censo Demográfico de 2000 e 2010 (população residente, domicílios ocupados e situação do domicílio) para a grade estatística se deu por uma abordagem híbrida definida por Bueno (2014), que combina técnicas de agregação e de desagregação. Para a abordagem de desagregação utilizaram-se técnicas de transferência dos dados existentes de uma unidade espacial para outra, por meio da criação de um denominador espacial comum entre essas unidades (PLUMEJEAUD et al., 2010).

Os dados de uso e cobertura da terra de 2000 e 2010 incorporados às células da grade são provenientes do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias). A escolha das classes de uso adotadas foi baseada nas classes disponíveis no projeto e de relevância ao trabalho. As principais variáveis que influenciam na ocupação desordenada da faixa de domínio da BR-408/PE, nas quais cada polígono corresponde às seguintes cinco classes de categorias de uso e cobertura presentes neste estudo, são: Florestal, Formação Natural Não Florestal, Agropecuária, Área Não vegetada, Corpos d' Água e classe ocupações irregulares sobre a faixa de Domínio.

As mudanças devem ocorrer nas áreas mais propícias, definidas por um conjunto de

variáveis espacialmente independentes identificadas no processo de análise exploratória e de calibração da modelagem. Para a escolha das variáveis explicativas do modelo foi imprescindível compreender o histórico da ocupação e a revisão bibliográfica. As variáveis explicativas foram assim definidas a partir da disponibilização dos dados do censo e pela mudança no uso do solo para os anos de 2000 e 2010 (Tabela 4).

Tabela 4 - Variáveis utilizadas para os Anos de 2000 e 2010 para BR-408/PE.

Sigla	Variáveis socioeconômicas/Infraestrutura/ambientais	Unid.	Fonte
Dist_Br	Distância a BR-408. Medida a partir do eixo da BR-408	m	PE3D/DNIT
dist_ocup_agri	Distância das ocupações para áreas de agricultura	m	PE3D/DNIT
dist_ocup_pasto	Distância das ocupações para áreas de pasto	m	PE3D/DNIT
dist_ocup_urb	Distância das ocupações para áreas urbanas	m	IBGE
DP	Densidade populacional. Dados dos setores censitários do ano de 2000 e de 2010. Atribuídos à grade estatística e normalizado no pixel.	hab/km ²	Grade Estatística IBGE
P_ÁGUA	Percentual de DPPs (*) com abastecimento de água da rede geral.	%	Censo IBGE
P_ESG	Percentual de DPPs(*) com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial.	%	Censo IBGE
P_LIXO	Percentual de DPPs(*) com lixo coletado por serviço de limpeza.	%	Censo IBGE
RNMPr	Rendimento nominal mensal dos Responsáveis por Domicílio	%	Censo IBGE
RPC	Renda per capita (apenas dos responsáveis pela família)	%	Censo IBGE
V1	Percentual de Domicílios particulares precários	%	Censo IBGE
V3	Percentual de domicílios particulares com banheiro ou sanitário sem esgotamento sanitário via rede geral de esgoto, pluvial ou fossa séptica	%	Censo IBGE
V4	Percentual de DPPs(*) sem banheiro	%	Censo IBGE
V5	Percentual de DPPs(*) com lixo não coletado	%	Censo IBGE
V7	Percentual de DPPs(*) alugados	%	Censo IBGE
V21	Percentual de responsáveis por DPPs sem rendimento nominal mensal	%	Censo IBGE
V7	Percentual de DPPs alugados	%	Censo IBGE
V8	Percentual de DPPs com mais de 4 moradores	%	Censo IBGE
V22	Percentual de responsáveis por DPPs com rendimento nominal mensal de até 3 salários-mínimos	%	Censo IBGE
P_ALFAC	Percentual de Chefes de Família Alfabetizado	%	Censo IBGE
P_ALFAP	Percentual de Pessoas alfabetizadas	%	Censo IBGE
OCORR	Ocorrências das ocupações Irregulares sobre a Faixa de Domínio	%	PE3D/DNIT
DSBR	distancia (km) dos setores censitários para o eixo da BR	%	PE3D/DNIT/IBGE

(*) DPPs - Domicílios Particularmente Permanentes

Fonte: Autor

7.1.2 Resultados da Abordagem Metodológica

A interseção espacial da grade estatística agregando as variáveis dos censos demográficos relacionadas aos dados socioeconômicos e de infraestrutura de 2000 e 2010, normalizados e categorizados em classes, permitem a comparação direta entre as camadas categóricas, adotando-se a dimensão de 200 x 200 m para o pixel. Essas comparações são realizadas a partir da seleção de técnicas de álgebra de mapas. Verificou-se em seguida a variação das classes do Mapbiomas para os anos estudados. A partir das camadas de classes de uso do solo e cobertura da terra, foi calculado o percentual da área de cada classe em relação à área total de cada célula (Tabela 5).

Tabela 5 - Distribuição das Células, por Classes de Uso e cobertura da Terra, seguindo situação de ocupação para o Ano de 2000 e 2010.

Classes	2000 (ha)*	2010 (ha)*	$\Delta(h)$	2000(%)	2010(%)	$\Delta (%)$
1. Florestal / Formação Natural						
Não Florestal	11288,00	12652,00	1364,00	9,86	11,05	1,19
2. Agropecuária	98744,00	96036,00	-2708,00	86,27	83,91	-2,37
3. Área não Vegetada	3476,00	4024,00	548,00	3,04	3,52	0,48
4. Corpos d' água	312,00	540,00	228,00	0,27	0,47	0,20
5. Ocupação Irregular sobre Faixa de Domínio	636,00	1204,00	568,00	0,56	1,05	0,50

(*)1 ha corresponde a uma área de 100 x100 m = 10000 m²

Fonte: Autor

Os mapas reclassificados relativos ao mapa de uso e cobertura do solo de 2000 (mapa inicial) e mapa de Uso e cobertura do Solo de 2010 (mapa final) foram utilizados para calcular a Matriz de Transição (Tabela 06). As taxas de mudança foram obtidas com o cálculo da matriz de transição que é a quantia total de mudança para cada tipo de transição da cobertura da terra, levando em conta o período temporal da simulação (diferença de tempo em anos entre 2000 e 2010) por meio de uma operação de tabulação cruzada.

Tabela 6 - Matriz de Transição LCC BR-408/PE

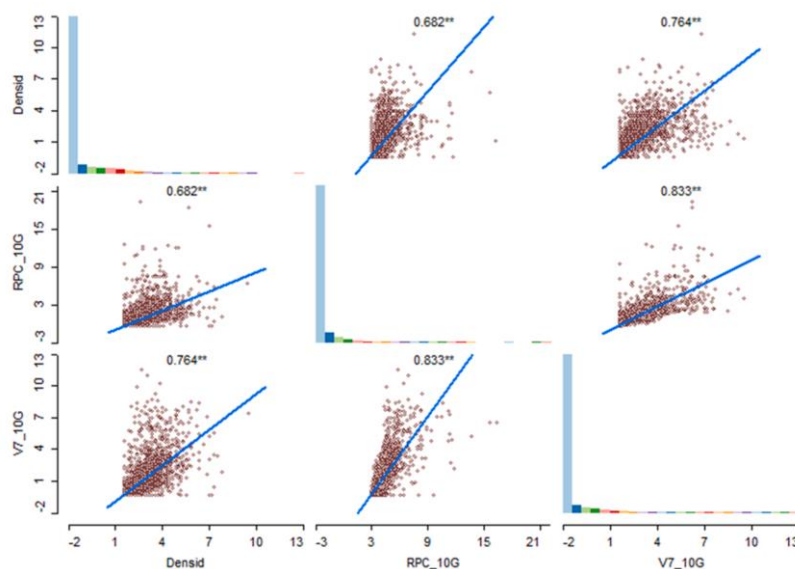
Classes	1. Florestal / Formação Natural Não Florestal	2. Agropecuária	3. Área não Vegetada	4. Corpos d' água	5. Ocupação Irregular
1. Florestal / Formação Natural Não Florestal	0,843	0,145	0,006	0,005	0,006
2. Agropecuária	0,031	0,951	0,002	0,002	0,005
3. Área não Vegetada	0,000	0,112	0,885	0,001	0,002
4. Corpos d' água	0,089	0,167	0,012	0,731	0,000
5. Ocupação Irregular	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

Fonte: Autor

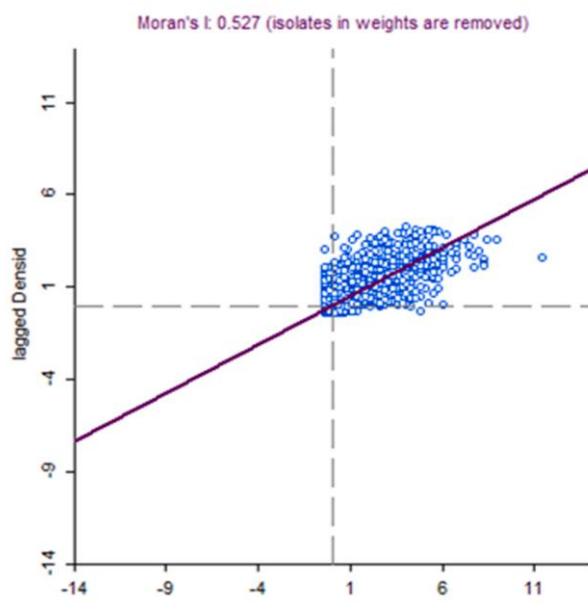
A matriz analisa as mudanças no uso e cobertura do solo entre 2000 e 2010, mostrando que áreas como floresta (0,6%), agropecuária (0,5%) e áreas urbanizadas (0,2%) têm uma baixa probabilidade de se tornarem ocupações irregulares na faixa da BR-408/PE. Além disso, não houve reversão dessas ocupações irregulares para outras classes, indicando ausência de ações do Estado para mudar essa situação nesse período.

A partir das células contidas nas áreas de *buffer* de 5 km, foram selecionadas as células que estão no interior da faixa de domínio para estudar o comportamento das mesmas em relação a sua dependência espacial. Observou-se o comportamento das células para os dados socioeconômicos para o ano de 2010. Verificou-se a partir da matriz de correlação de Pearson para as variáveis indicadas na Tabela 4, uma forte correlação (r maior que 0,7) para a densidade populacional e densidade habitacional. Verificou-se ainda, a existência de correlação espacial dessas células, a partir do índice de Moran Local, como pode ser visto pelo *software* Geoda para as células atingidas por ocupações irregulares (Figura 35).

Figura 35 - Correlação das Principais Variáveis do Modelo



Índice local de Moran para densidade populacional



Fonte: Autor

A figura mostra a correlação entre variáveis-chave de um modelo por meio de gráficos de dispersão. Os coeficientes de correlação (como 0,682, 0,764 e 0,833) indicam relações positivas e moderadas/fortes entre as variáveis, como densidade populacional ("Densid"), "RPC_10G" e "V7_10G". A linha azul representa a tendência linear, destacando a interdependência entre essas variáveis no modelo.

Para entender o comportamento das variáveis, o potencial de transição de uso e ocupação do solo foi modelado por dois métodos: *Artificial Neural Network* (ANN) e *Logistic Regression* (LR). Para validação, o resultado simulado de 2018 (mapa) foi comparado com o mapa obtido em 2018 a partir do levantamento topográfico georreferenciado do direito da faixa de domínio fornecido pelo DNIT, observado pela ANN e pela LR.

O módulo simulador realizou o procedimento para avaliar a mudança no uso do solo usando os seguintes dados de entrada: Mapa *raster* do estado inicial; Mapa *raster* de fatores (variáveis); e o Modelo. O mapa *raster* do estado inicial (ano 2000) contém informações sobre as categorias de cobertura do solo. O mapa *raster* dos fatores contém informações sobre variáveis explicativas. O modelo é um preditor que calcula os potenciais de transição no estado dos fatores e o atual uso do solo.

Assim, o módulo não utiliza regras de transição implícitas, mas os potenciais de transição gerados pelo modelo. Um efeito de vizinhança é alcançado durante o treinamento. Por exemplo, a regressão logística apresenta um coeficiente para cada vizinho e esses coeficientes afetam a transição potencial. Se o modelo não adotar os efeitos de vizinhança, o simulador deve ser responsável apenas pelos padrões gerais.

RESULTADOS LCM NA BR-408/PE

Os resultados da modelagem foram avaliados a partir da comparação dos dados das ocupações irregulares do Programa PROFAIXA fornecidos pelo DNIT, em associação com as classes de uso e cobertura da terra do ano de 2018, em comparação com resultado do modelo produzido pela simulação do MOLUSCE para o ano de 2018 das classes de uso e cobertura da terra. A validação permite a verificação da precisão da simulação. O MOLUSCE incorpora três tipos de validação: Estatísticas *Kappa*; Validação por estimativa do erro; e Validação do mapa de erros. A avaliação da precisão é obtida por meio de coeficientes de acordo a Matriz de Confusão (ou matriz de erro), que pode ser expresso como acordo total ou para classes individuais.

A matriz de confusão foi formada por um arranjo do quadrado dos números

dispostos em filas e colunas que expressam o número de unidades da amostra de uma categoria relativa particular - inferido pelo modelo, em comparação com a categoria verificada atualmente (mapa de uso do solo de 2018).

Dentre as medidas derivadas da matriz de confusão, há a índice *Kappa*, que representa uma técnica multivariada discreta utilizada para avaliar a precisão temática e utiliza todos os elementos da matriz de confusão em seu cálculo. O coeficiente *Kappa* (K) é uma medida do real acordo (indicado pelos elementos diagonais da matriz de confusão) menos o acordo por acaso (indicado pelo produto total da linha e coluna, que não inclui entradas não reconhecidas), ou seja, como na medida em que a classificação esteja de acordo com os dados de referência (Cohen, J., 1960). O coeficiente *Kappa* é calculado usando a seguinte expressão:

Equação 16

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 + \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}$$

Onde K é uma estimativa do coeficiente *Kappa*; x_{ii} é o valor na linha i e coluna i ; x_{i+} é a soma da linha i e x_{+i} é a soma da coluna i da matriz de confusão; n é o número total de amostras e c o número total de classes.

Embora o coeficiente *Kappa* seja muito utilizado na avaliação da exatidão de mapeamentos, não existe uma fundamentação teórica para recomendar quais os níveis mínimos aceitáveis deste coeficiente numa classificação. Entretanto, a Tabela 7 apresenta níveis de desempenho da classificação para o valor de *Kappa* obtido, normalmente aceitos pela comunidade científica.

Tabela 7 - Índice *Kappa* e o correspondente desempenho da classificação.

Índice Kappa	Desempenho
< 0	<i>Péssimo</i>
$0 < k \leq 0,2$	<i>Ruim</i>
$0,2 < k \leq 0,4$	<i>Razoável</i>
$0,4 < k \leq 0,6$	<i>Bom</i>

$0,6 < k \leq 0,8$	<i>Muito Bom</i>
$0,8 < k \leq 1,0$	<i>Excelente</i>

Fonte: Fonseca (2000)

Na modelagem, verificou-se que as estimativas de uso do solo embasadas em ANN e LR foram satisfatórias, especialmente quando as áreas de classe não previstas (urbanizadas) foram substituídas por classes de ocupação irregulares. A análise igualmente mostra certa semelhança entre os mapas simulados pelo RNMLP e LR e os classificados para o ano de 2018 (real).

Os modelos propostos na pesquisa foram validados com o valor de referência dos *pixels* do mapa de uso de 2018. A precisão dos modelos na previsão do comportamento de mudança de uso/ocupação para 2018 foi verificada a partir a matriz de confusão usando o índice *Kappa*. Foram calculadas três tipos de estatísticas (Tabela 8) *Kappa* (K), Localização *Kappa* (Kloc), e *Kappa Histogram* (Khist) com base nos métodos e algoritmos de mudança de paisagem do *plugin* MOLUSCE.

Tabela 8 - Validação dos modelos

	Rede Neural Artificial (RNA)	Regressão Logística (LR).
% de Exatidão	94,541	94,359
Kappa (overall)	0,811	0,811
Kappa (histo)	0,923	0,920
Kappa (loc)	0,886	0,880

Fonte: Autor

Na distribuição das células por classes de uso e cobertura do solo, de acordo com a ocupação em 2000 e 2010 foram observadas ineficiências na supervisão das ocupações irregulares pelo DNIT, uma vez que não houve transição da classe de ocupação irregular para outras classes. Consequentemente, houve apenas o crescimento da classe de ocupação irregular sobre o direito de passagem da BR-408/PE, entre 2000 e 2010, de cerca de 0,5%.

O *MOLUSCE* gerou o mapa de erros, que contém informações sobre previsões

imprecisas no raster simulado. O mapa de erros foi construído comparando o mapa simulado e o mapa de referência para o ano de 2018, no qual o modelo aceita um erro de 5%. O modelo aplicado é um preditor que calcula os potenciais de transição em fator condição e uso do solo para os anos 2000 e 2010.

Diante disso, foi reconhecido que as mudanças de classe seguiram o comportamento explicado na análise exploratória, na qual a correlação e a dependência espacial da densidade populacional influenciaram a precisão da previsibilidade do modelo. Como segue, a pressão exercida pela periferia dos centros urbanos (áreas não cobertas) é devida à necessidade de expandir espaços para comércio e habitação.

O uso e ocupação do solo relacionado a áreas não cobertas e ocupações irregulares na faixa de domínio ocupadas, como mostra a Tabela 5, revela crescimento da mesma ordem, 0,48% e 0,50% entre 2000 e 2010. Além disso, o modelo revela uma relação robusta entre o crescimento irregular de ocupações e o crescimento no uso de áreas não previstas. Além disso, revela uma diminuição de 2,37% nas áreas ocupadas pela agricultura e criação de gado e um crescimento de 1,19% no uso do solo e ocupação durante os mesmos anos. Houve um crescimento entre 2000 e 2018 de 2,73% em áreas não vegetadas (urbanizadas), bem como um crescimento de 0,57% em ocupações irregulares. Em contraste, houve uma redução em uso agrícola de 4,55%. Essa redução foi devida à recuperação da vegetação (Floresta / Formação Natural Não Florestal), à redução de áreas de uso agrícola para o crescimento de áreas não vegetadas (urbanizadas), bem como a possíveis falhas na classificação do MAPBIOMAS.

Em relação à classe da área urbana, o mapa simulado APENDICE 01 indicou expansão, mais especificamente nas partes periféricas dos aglomerados urbanos coincidindo com o mapa de referência, assim como com o mapa simulado por ANN. Com relação aos dados do censo socioeconômico e de infraestrutura, observou-se a necessidade de melhorar a desagregação dos dados por outros métodos de interpolação, tais como o vizinho mais próximo, média ponderada, *kriging* ou *bi-linear*.

Dada a possibilidade comprovada de desenvolver cenários para prever ocupações irregulares na faixa de domínio de rodovias, é necessário melhorar a qualidade dos dados agregados das células rasterizadas. Para esse fim, foram utilizadas na BR-104/PE pesquisas com indicadores que podem potencialmente substituir os dados do censo em outras

rodovias federais brasileiras, tais como o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), disponibilizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) que incorpora as dimensões da infraestrutura; humana e mão-de-obra/renda, também disponível para os anos 2000 e 2010.

7.2 Modelo LCM para Rodovia BR-104/PE

O modelo de simulação é o mesmo já adotado para simular o processo de mudança de uso e ocupação do solo das margens da BR-408/PE. O modelo busca verificar quais variáveis espaço-temporais, sociais e econômicas e de infraestrutura agregadas à grade estatística ou ao município podem modelar o comportamento das ocupações irregulares.

Então, resolveu-se aplicar a metodologia de interação das mudanças das classes de uso do solo da vizinhança das células no tempo, associadas às ocupações irregulares sobre a faixa de domínio para possibilitem a interpretação do comportamento espacial no trecho da BR-104/PE.

Ao contrário do Modelo LCM da Rodovia BR-408/PE, testou-se a viabilidade do uso do Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) agregado ao município e não ao setor censitário e o valor da terra nua, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Colonização de Reforma Agrária – INCRA. Para tanto, os dados de cobertura da terra de 2000, 2010 e 2018 e das ocupações irregulares sobre a faixa de domínio da rodovia foram interpretadas para os anos de 2000 e 2010. O levantamento cadastral das ocupações sobre Faixa de Domínio da BR-104/PE do Programa PROFAIXA do ano de 2018 foram utilizados para calibrar e avaliar o modelo.

A simulação procurou apresentar uma metodologia para estudar o comportamento espacial das ocupações irregulares baseado nas dinâmicas de uso e ocupação do solo para o período investigado. Essa baseia-se em técnicas de desagregação espacial com a intenção de avaliar se os dados que explicam a ocorrência das ocupações irregulares em uma resolução espacial de menor escala, para um determinado período e uma área de estudo, são capazes de explicar a distribuição espacial do fenômeno.

7.2.1 Abordagem Metodológica

Uma variedade de fatores de mudança na cobertura solo pode ser encontrada na literatura. Esses fatores variam entre modelos focados em tipos específicos de mudança versus modelos abrangentes (ou seja, aqueles que representam todos os tipos de mudança na cobertura solo em um área de estudo). Frequentemente, essas variáveis são agrupadas por similaridade e avaliadas individualmente. Diante disso, a partir da aplicação à BR-408/PE, verificou-se a possibilidade de utilizar ao invés de variáveis agregadas aos setores censitários, usar o IVS agregado ao município, associado ao valor da terra nua e à densidade demográfica. No entanto, para isso foi necessário projetar todos os dados no mesmo Sistema de Referência Geodésico e de Projeção, assim como, no mesmo padrão espacial (*raster*), de mesma dimensão (tamanho de *pixel*) e normalizados. Os dados foram recortados para uma fronteira de um *buffer* de 5 km (Tabela 9).

Tabela 9 - Conteúdo e fonte de dados para o LCM BR-104/PE

Classes	Tipos de Dados	Ano	Fonte de Dados	Resolução
Distribuição da População	Raster	2000 e 2010	The Gridded Population of World Version 4 (GPWv4)	1 x 1 km
IVS	Shapefile	2000 e 2010	IPEA	200 x 200 m
Limite dos Municípios	Shapefile	2010	IBGE	1/100.000
Valor de Terra Nua (VTN)	Shapefile	2018	INCRA	1/100.000
Ocupações Irregulares DNIT/PE	Shapefile	2018	DNIT	1/1000
Cobertura do Solo	Raster	2000 e 2010	MAPBIOMAS	1:100.000
Projeto PE3D	Raster	2016	APAC	1:5000
Ocupações irregulares Extraído de Imagem do Google Earth	Raster	2000 e 2010	Google Earth	200 x 200 m

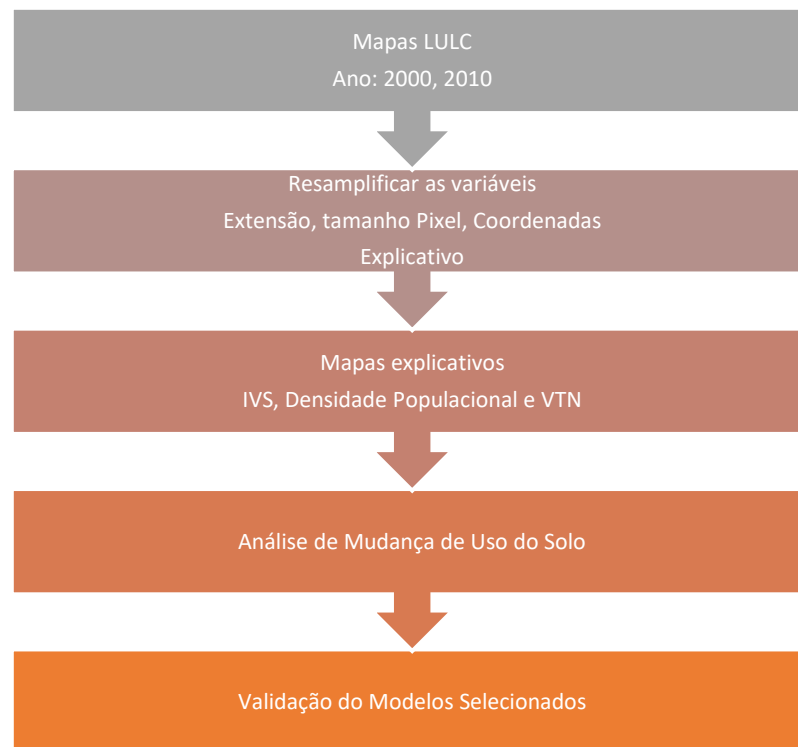
Fonte: Autores (2021)

Com relação aos dados do MAPBIOMAS foram utilizadas as seguintes categorias de uso e cobertura, as quais foram agrupadas em cinco classes: Florestal, Formação Natural Não Florestal, Agropecuária, Área Não vegetada, Corpos d' Água e a classe ocupações irregulares sobre a faixa de domínio.

O modelo LCM apresentou uma análise da relação da mudança de uso e cobertura da terra com as áreas de alta suscetibilidade a ocupações irregulares sobre a faixa de domínio da BR-104/PE. Com ele buscou-se elencar as mudanças dos usos e coberturas da terra que estão sobre áreas de alto risco de ocupação irregular, dando destaque para as áreas urbanas, devido à grande presença de pessoas que podem estar sobre locais com alta suscetibilidade de serem afetados por ocupações irregulares. Observou-se que a expansão demográfica se direcionou para locais inapropriados, provavelmente pela falta de planejamento e fiscalização, fixando-se nas faixas de domínio.

Com o intuito de analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra entre 2000 (Instante Inicial: T1) e 2010 (Instante Final: T2) com previsões para 2018 (Instante Estimado: T3), e sua relação com as áreas suscetíveis a ocupações irregulares sobre a faixa de domínio, a presente pesquisa passou por cinco etapas (Ver Figura 36).

Figura 36 - Etapas para construção de um modelo de uso do solo da BR-104



Fonte: Autores, 2022

Primeiramente foi necessário definir os objetivos da aplicação, assim como, a definição da escala espacial e temporal, os tipos de uso do solo, assim como os fatores

determinantes de mudança para o modelo pretendido. Em seguida houve a preparação do banco de dados e o preenchimento do espaço celular. O espaço celular é uma estrutura matricial generalizada onde cada célula está associada a vários tipos de atributos, sejam eles classes de uso/cobertura da terra ou fatores determinantes (IVS, VTN e População). O objetivo consistiu em homogeneizar informações provenientes de diferentes fontes, em formatos distintos (dados vetoriais, matriciais e outros planos celulares), agregando-os em uma mesma base espaço-temporal. (*pixel* de 200 x 200 m).

Os dados vetoriais para serem usados no modelo LUCC foram transformados em *raster*. A transformação necessitou da utilização de duas técnicas de normalização dos dados (Tabela 9), reclassificados e transformados em dados *Raster* de 8 bytes sem sinal.

Figura 37 - Normalização e rasterização dos dados descritivos

Numeric value Ex: RNMP						
1	2	3	4	5	6	7
0	0-50	50 -100	100 - 300	300 - 500	500-1000	1000<

VARIABLES COM %					
1	2	3	4	5	6
0	2-20	20-40	40-60	60-80	80-100

Fonte: Autores

7.2.2 Método de Desagregação Espacial

O IBGE dispõe de dados estatísticos de censos anteriores, junto com as fronteiras administrativas (ou seja, registros de mudanças nas fronteiras administrativas ao longo do tempo) usados para publicá-los durante longos períodos. No entanto, usar esses dados ao observar as mudanças ao longo do tempo continua sendo um grande desafio, na maior parte devido a dificuldades em lidar com os limites das unidades administrativas que foram usadas para publicar os dados.

Os dados populacionais agregados a unidades administrativas fixas não são uma forma ideal de informação sobre contagens populacionais e/ou densidade. Em primeiro lugar, essas representações são mais sensíveis a problemas de unidade de área modificáveis, no sentido de que os resultados de uma análise baseada em dados agregados por unidades administrativas podem depender da escala, forma e arranjo das unidades, ao invés de

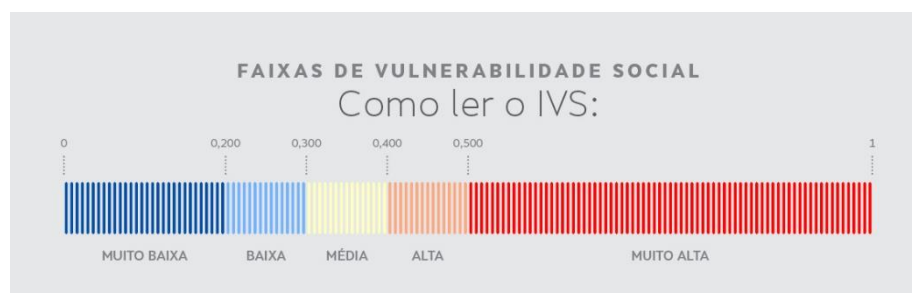
capturar a variação teoricamente contínua na população subjacente. Embora as representações baseadas em *raster* também sejam afetadas por esses problemas, elas oferecem tamanhos regulares de mesmas unidades, e considerando uma alta resolução, pode-se lidar melhor com os problemas de escala (VINCENT *et al.*, 2001).

As variáveis explicativas foram definidas com base nas inconsistências encontradas no Censo Demográfico de 2000, uma vez que há pouca consistência entre os respectivos conjuntos de micro dados. Isto se deve, em primeiro lugar, a mudanças ocorridas no conjunto das informações coletadas: inclusão e exclusão de variáveis, alterações no nível de detalhe com o qual os quesitos são investigados, etc.

Diante disso, adotou-se a estratégia do uso de índices agregados aos municípios ao invés dos setores censitários, devido a problemas encontrados nos dados censitários. O índice adotado foi o IVS, com o objetivo de sinalizar o acesso, a ausência ou a insuficiência de alguns “ativos” na região estudada. O IVS é composto de três subíndices que o compõe: i) Infraestrutura Urbana; ii) Capital Humano; e iii) Renda e Trabalho. Esses subíndices representam três grandes conjuntos de ativos, cuja posse ou privação determinam as condições de bem-estar das populações nas sociedades contemporâneas (IPEA, 2018). O IVS se caracteriza como uma pesquisa bibliográfica e documental, utilizando-se de materiais provenientes de órgãos como IPEA, Atlas de Vulnerabilidade, IBGE e Órgãos Governamentais que promovem relatórios estaduais.

Assim, optou-se por trabalhar com os anos de 2000 a 2010, para os municípios cortados pela rodovia, tendo como base o IVS, valor de terra nua VTN, densidade populacional. De acordo com o IPEA a leitura dos indicadores dar-se-á da seguinte forma: (Figura 38)

Figura 38 - Faixas do IVS



Fonte: IPEA (2018)

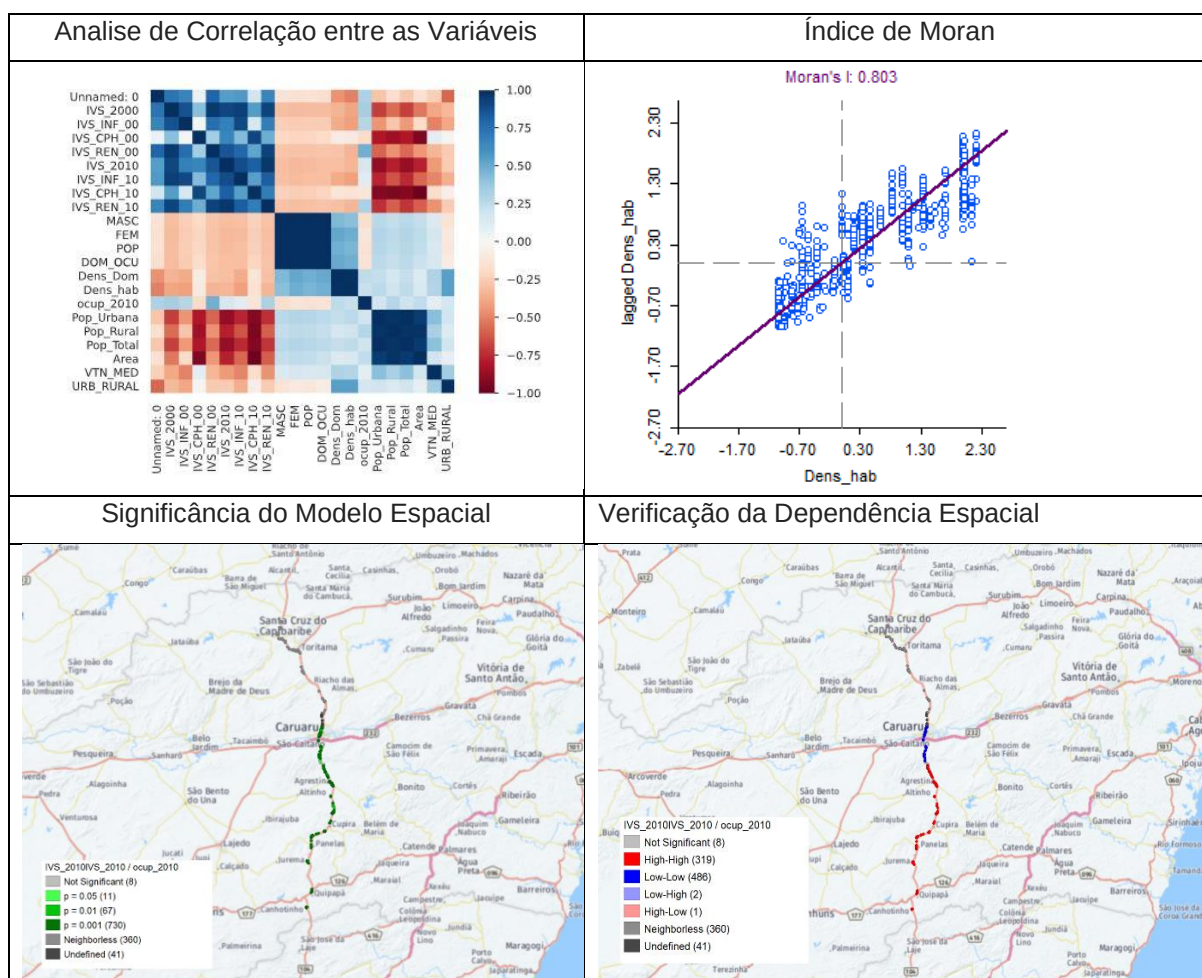
A Figura 38, ilustra a forma de ler o IVS. Percebe-se que quanto mais próximo de 0, menor é a vulnerabilidade social e quanto mais próximo de 1, maior a vulnerabilidade. Entretanto, a partir de 0,5 já é muito alta, ou seja, já pode ser considerada de extrema vulnerabilidade.

7.2.3 Análise Exploratória dos dados

Ao examinar os dados previamente disponibilizados pelas instituições, conseguiu-se fazer um entendimento básico de sua estrutura e das relações existentes entre as variáveis analisadas. Essa etapa foi fundamental, pois uma análise descritiva detalhada permitiu familiarizar-se com os dados, organizá-los e sintetizá-los de forma a obter as informações necessárias do conjunto de dados para responder as questões referentes às ocupações irregulares nas BR-104/PE. A análise exploratória dos dados consistiu em explorar as correlações, histogramas e transformações necessárias visando estabelecer relações potenciais a partir de diferentes métodos (regressão linear, logística, espacial, etc.). Estas análises foram realizadas nos *softwares* R e GeoDA. (ver Figura 39)

A literatura mostra que as mudanças devem ocorrer nas áreas mais propícias, definidas por um conjunto de variáveis espacialmente independentes identificadas no processo de análise exploratória e calibração da modelagem. Para a escolha das variáveis explicativas do modelo foi imprescindível compreender o histórico das ocupações e a revisão bibliográfica.

Figura 39 -Análise Exploratória dos dados Socioeconômicos - BR-104



Fonte: Autor, 2021

7.2.4 Modelo LCM para estudar o comportamento das Ocupações irregulares da Faixa de Domínio da BR-104/PE

A vulnerabilidade é um conceito facilmente relacionado à fragilidade e a interdisciplinaridade conferida a ele, envolve o seu uso em variadas áreas do conhecimento. Diante disso, Raitz (1998), afirma que é necessário reconhecer que existe relação entre o uso das margens das rodovias e as características topográficas, sociais e políticas que sustentam sua construção e utilização. Compreender a evolução das relações políticas e sociais entre a margem da rodovia e a rodovia propriamente dita, requer um exame das mutualidades mais amplas entre o corredor da rodovia, o campo através do qual passam os viajantes e os moradores que ocupam as margens daquela rodovia.

Para isso, a existência de padrões de segregação socioespacial discrepantes evidencia o território como um fator de grande importância na produção e disseminação das desigualdades sociais. Essa constatação justifica a crescente demanda por informações cada vez mais detalhadas e desagregadas geograficamente. Ainda, o desafio é ir além da simples espacialização de índices para o diagnóstico das áreas de exclusão/inclusão social. Mas sim, descobrir não apenas onde, mas no que se deve intervir com maior ênfase mediante as diferentes realidades que compõe a cidade e o campo (GENOVEZ; CÂMARA; MONTEIRO, 2002). O gradiente rural-urbano oferece uma estrutura ecológica apropriada para a compreensão de questões sociais relevantes para a sustentabilidade e planejamento de políticas.

Para Valencia (2008), as mudanças do uso e da cobertura do solo não acontecem ao acaso em uma região. Estas mudanças estão em constante dinamismo e podem ser determinadas por dois tipos de impulsores: Socioeconômicos e Biofísicos. Segundo Kuhlman (2008), esses fatores de mudanças atuam em escalas espaciais locais, regionais e globais. Os tipos de impulsores de mudança do uso do solo são considerados em função da sua variação no período da simulação: impulsores de mudanças dinâmicos e impulsores de mudanças estáveis.

Esse enfoque exploratório e prospectivo dos Modelos LCM permite que os modelos sejam usados como ferramentas de suporte ao planejamento e análise ambiental e têm se tornado um importante instrumento de auxílio ao ordenamento territorial.

7.2.5 Classificação e Detecção de mudanças de Uso e Cobertura da Terra

Os mapeamentos do uso e cobertura da terra foram realizados pelo MAPBIOMAS. Com a interseção espacial da grade estatística agregando ao IVS de 2000 e 2010, normalizados e categorizados em classes de *pixel*. A partir da seleção de técnicas de álgebra de mapas, ou seja, comparação direta entre as camadas categóricas, adotando-se a dimensão de 200 x 200 m para o *pixel*, verificou-se a variação das classes para os anos estudados e foi calculado o percentual de área de cada classe em relação à área total de cada célula (Tabela 10).

Tabela 10 - Distribuição das Células, por Classes de Uso e cobertura da Terra, seguindo situação de ocupação para o Ano de 2000 e 2010.

Classes	2000 (km2)	2010 (km2)	Δ(km2)	2000%	2010%	Δ %
1. Floresta	219,12	240,92	21,80	13,84	15,22	1,38
2. Formação Natural não Florestal	0,32	0,68	0,36	0,02	0,04	0,02
3. Agropecuária	1322,68	1287,04	-35,64	83,54	81,29	-2,25
4. Área Não Vegetada	32,84	45,44	12,60	2,07	2,87	0,80
5. Corpo d' água	0,56	1,48	0,92	0,04	0,09	0,06
6. Ocupação sobre a Faixa de Domínio	7,80	7,76	-0,04	0,49	0,49	0,00

Fonte: Autoria, 2021

A Tabela 10 mostra que não houve transição da classe das áreas ocupadas irregularmente sobre a faixa para os anos de 2000 a 2010. Isso não significa que não houve mudanças da cobertura da terra, nesse período, apenas houve a verificação de que classe de ocupação irregular sobre a faixa de domínio teve sua área constante entre os períodos. Assim como, os resultados das demais classes revelaram transformações equivalentes pela mesma unidade de área.

Para entender o fenômeno é necessário analisar outros parâmetros como a matriz de transição.

7.2.6 Matriz de Transição

Tomando como dados de entrada os mapas de uso de cobertura da solo para os anos de 2000 (inicial) e 2010 (final), foi realizado o cálculo das taxas de transição com base em Cadeias de Markov, que informam sobre a quantidade de mudanças a serem simuladas. Como produto foi gerada a matriz de transição (Tabela 1), que contém as probabilidades de uma determinada classe permanecer a mesma ou mudar para outras classes durante certo intervalo de tempo. A Matriz de Transição possibilita conhecer a probabilidade de uma classe mudar para outra ou permanecer a mesma em um dado ano. Nessa perspectiva, foi feita uma previsão de médio prazo, considerando um intervalo de dez anos. O ano de 2000 foi definido com base no ciclo de atualização.

Tabela 11 - Matriz de Transição para os Anos de 2000 e 2010 para áreas da BR-104/PE

	1. Florestal	2. Formação Não florestal	3. Agropecuária	4. Área não vegetada	5. Corpos d' água	6. Ocupação Irregular
1. Florestal	0,717	0,001	0,279	0,002	0,000	0,000
2. Formação Não florestal	0,000	0,250	0,650	0,125	0,000	0,000
3. Agropecuária	0,063	0,000	0,924	0,011	0,000	0,000

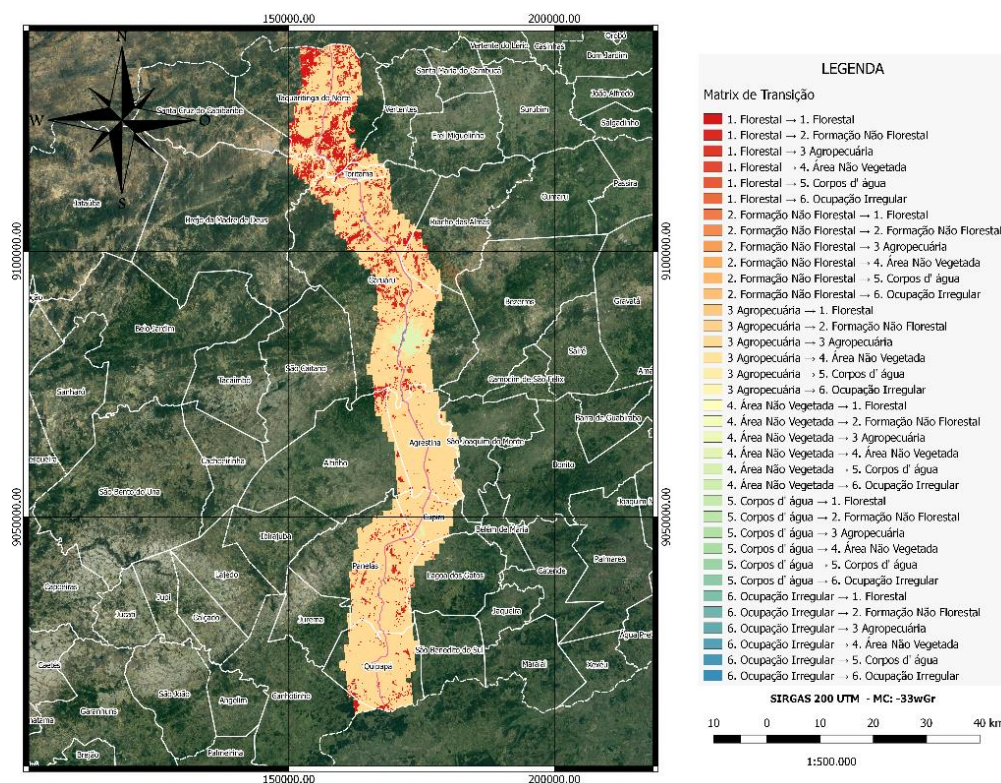
4. Área não vegetada	0,000	0,000	0,080	0,918	0,001	0,000
5. Corpos d' água	0,000	0,071	0,351	0,071	0,500	0,000
6. Ocupação Irregular	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,995

Fonte: Autoria, 2021

O LCM baseia-se na caracterização de cada *pixel* quanto à máxima probabilidade de transição a ele associada e gera como produto um mapa contínuo da vulnerabilidade à mudança. Assim, é possível criar um mapa *raster* (Figura 40) que representa o potencial de probabilidade de transição baseado nas entradas de uso e cobertura do solo de 2000 e 2010.

Esse mapa pode ser gerado para os anos seguintes a partir da calibração e validação do modelo. Ele pode apoiar para cada região geográfica das células nas imediações das faixas de domínio, ações e políticas que consigam diminuir a probabilidade das classes de uso e cobertura mudarem para a classe de ocupação irregular. Para isso é necessário identificar os limites que restringem as ações e políticas públicas transversais dos poderes municipal, estadual e federal. No contexto da pesquisa, o objetivo é fornecer meios para que os órgãos responsáveis encontrem estratégias que sejam suficientes e adequadas ao longo do tempo, para manter os benefícios que os modelos de uso e cobertura da terra podem proporcionar ao monitoramento das margens das rodovias.

Figura 40 - Mapa de Potencial de Transição 2000 a 2010



Fonte: Autoria, 2021

As premissas de ações e políticas públicas podem ser comparadas ao longo do tempo e do espaço. Por exemplo, os gestores das faixas de domínio devem ser capazes de explorar como as diferenças entre cenários de uso e cobertura da terra se acumulam ao longo do tempo. Se as diferenças se acumularem e se desenvolverem principalmente no longo prazo devidas a não-linearidades, então, dadas às incertezas, a escolha inicial da opção de ação e política pública pode não ser tão significativa.

Dada a necessidade de apoiar a tomada de decisão que é adaptável às diversas situações que uma rodovia corta o território, os gestores das faixas de domínio também devem ser capazes de observar os efeitos de suas ações e políticas públicas ou mudar restrições de uso de determinadas áreas em algum momento no futuro, para ver se medidas corretivas estão trazendo efeitos positivos ao processo de controle.

7.2.7 Calibração e Validação

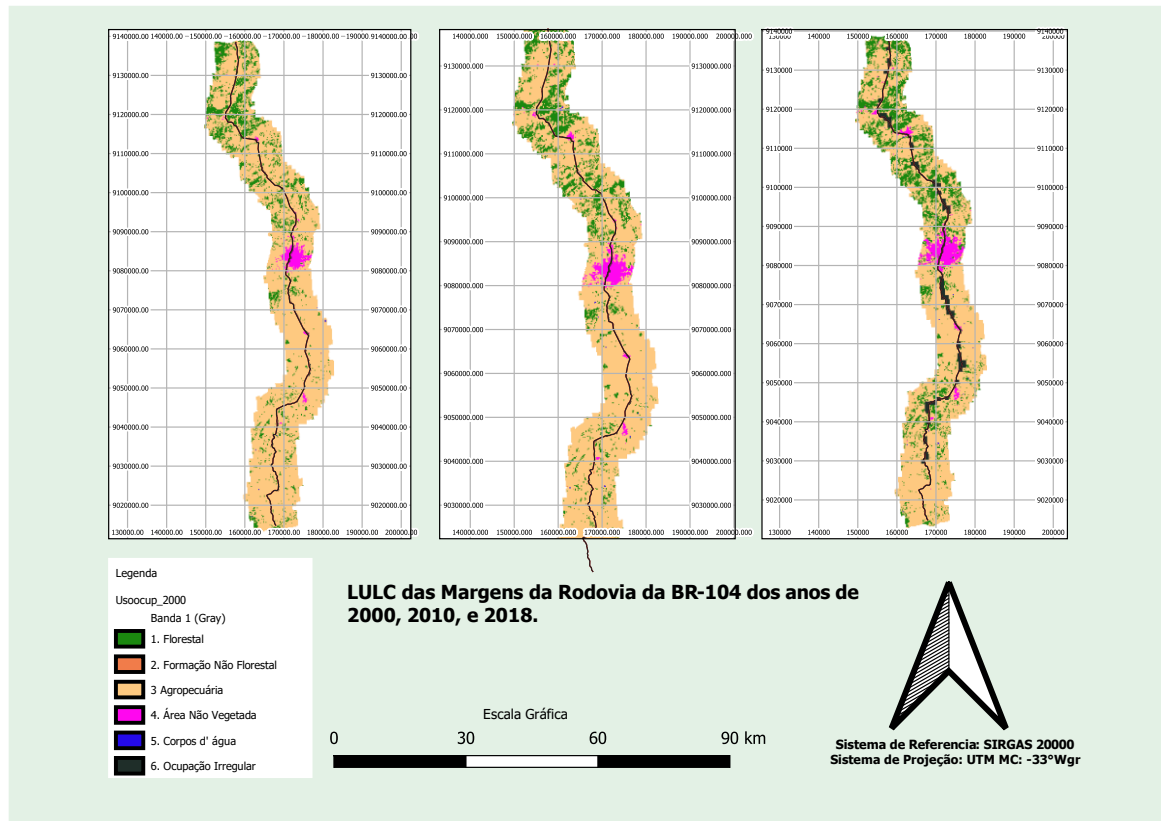
Na calibração do modelo foram utilizados para ambos os modeladores os mapas de Uso do MAPBIOMAS de entrada dos anos de 2000 e 2010 e os mapas dos determinantes espaciais, IVS 2010, VTN e População agregados ao município. Nesses mapas, as mudanças têm valor 1 e todo o resto da paisagem valor nulo, dessa forma a estrutura comum das paisagens que se mantém inalterada no período não influencia nos índices de validação. Para fins de análise, a validação foi separada entre validação quantitativa e validação espacial. Para a validação quantitativa, utilizou-se o mesmo modelo calibrado.

A validação permite verificar a precisão da simulação. O *plugin* do Qgis *MOLUSCE* tem três tipos de validação: Estatísticas *Kappa*, validação por estimativa do erro e validação do mapa de erros. A avaliação da acurácia foi obtida por meio de coeficientes de concordância derivados da matriz de confusão (ou matriz do erro), sendo que esses podem ser expressos como concordância total ou para classes individuais. O desempenho dos modelos foi comparado por meio dos índices da estatística *Kappa* (*K*), *Kappa* diferenciada entre acertos quantitativos (*K_histo*) e de localização espacial (*K_location*) (SCHNEIDER; GIL PONTIUS, 2001).

7.2.8 Análise da Mudança da Cobertura do Uso do Solo

A mudança da análise LULC foi verificada através da avaliação dos ganhos, mudanças líquidas e perdas experimentadas por diferentes categorias (classes) utilizando a análise de mudanças na LCM da BR-104/PE. A avaliação das mudanças espaciais e temporais entre várias classes durante o período 2000, 2010 e 2018 foi analisada (Figura 41 e Tabela 12). As transformações "de para" são resumidas como perda, ganho e mudança líquida da LULC na Figura 42 e na Figura 43. O ganho da LULC para cada classe foi determinado a partir do resultado da persistência e do valor total da coluna, enquanto a perda é da linha total e da persistência.

Figura 41 - LULC das Margens da Rodovia da BR-104/PE dos anos 2000, 2010 e 2018.



Fonte: Autor 2022

A mudança da avaliação do Uso do solo e cobertura do solo (LULC) foi computada usando o modelo LCM. A análise da mudança foi realizada utilizando os mapas classificados (2000, 2010 e 2018) e a LULC prevista (2018 e 2030) para demonstrar o padrão de mudanças. A dinâmica LULC em cada período de estudo foi avaliada utilizando os valores numéricos extraídos do MAPBIOMAS com a reclassificação das ocupações irregulares sobre a faixa de domínio. Para adquirir o padrão de mudanças, as imagens classificadas de períodos consecutivos foram tabuladas cruzadas e comparadas entre si. A matriz de probabilidade foi feita entre 2000 e 2010, 2010 e 2018, 2018 e 2030 usando LCM. O percentual de mudança e a taxa de mudança foram determinados para as categorias LULC usando as Equações (18) e (19) respectivamente, para determinar a quantidade de mudanças experimentadas entre os períodos das diferentes categorias LULC.

Equação 17

$$\text{Percentual de Mudança(\%)} = \frac{Ay - Ax}{Ax} * 100$$

Equação 18

$$Taxa\ de\ mudança\ (m^2/ano) = \frac{Ay - Ax}{T}$$

Onde: Ax é a área de LULC (m²) de uma imagem de cobertura terrestre anterior, Ay é a área de LULC (m²) de uma imagem de cobertura terrestre posterior e T é o intervalo de tempo entre Ax e Ay, em anos.

Tabela 12 - A cobertura de área da LULC, porcentagem, e taxa de mudanças nas margens da BR-104/PE entre 2000, 2010, e 2018.

		ÁREA						MUDAÇAS					
		2000		2010		2018		2000-2010		2010-2018		2000-2018	
Classes	Pixel	%	[m ²]	%	[m ²]	%	[m ²]	%	Taxa de Mudança [m ² /ano]	%	Taxa de Mudança [m ² /ano]	%	Taxa de Mudança [m ² /ano]
Florestal	1	13,84	219120000	15,22	240920000	20,63	326640000	9,95	2180000	35,58027561	10715000	49,07	5973333,33
Formação Não Florestal	2	0,02	320000	0,04	680000	0,09	1400000	112,50	36000	105,8823529	90000	337,50	60000,00
Agropecuária	3	83,54	1322680000	81,29	1287040000	70,92	1122840000	-2,69	-3564000	12,75795624	-20525000	-15,11	11102222,22
Área não vegetada	4	2,07	32840000	2,87	45440000	3,90	61720000	38,37	1260000	35,82746479	2035000	87,94	1604444,44
Corpos d' água	5	0,04	560000	0,09	1480000	0,08	1280000	164,29	92000	13,51351351	-25000	128,57	40000,00
Ocupação Irregular	6	0,49	7800000	0,49	7760000	4,39	69440000	-0,51	-4000	794,8453608	7710000	790,26	3424444,44
TOTAL		100,00	1583320000	100,00	1583320000	100,00	1583320000						

(*) A porcentagem e a taxa de mudança foram calculadas usando as Equações (18) e (19), respectivamente.

Fonte: Autor 2022

7.2.9 Resultados e discussões sobre a BR-104/PE

Com objetivo de aprofundar a análise sobre a BR-104/PE, buscou-se extrair mais parâmetros. A partir do pacote R *Open Land* de código aberto utilizado para a análise de séries temporais de uso e cobertura da terra (LUC), que inclui suporte para verificação da consistência e carregamento dos dados *raster* espaço-temporais e plotagem espacial sintetizada, diversas métricas de mudança (LUCC) foram verificadas (Apêndice 2).

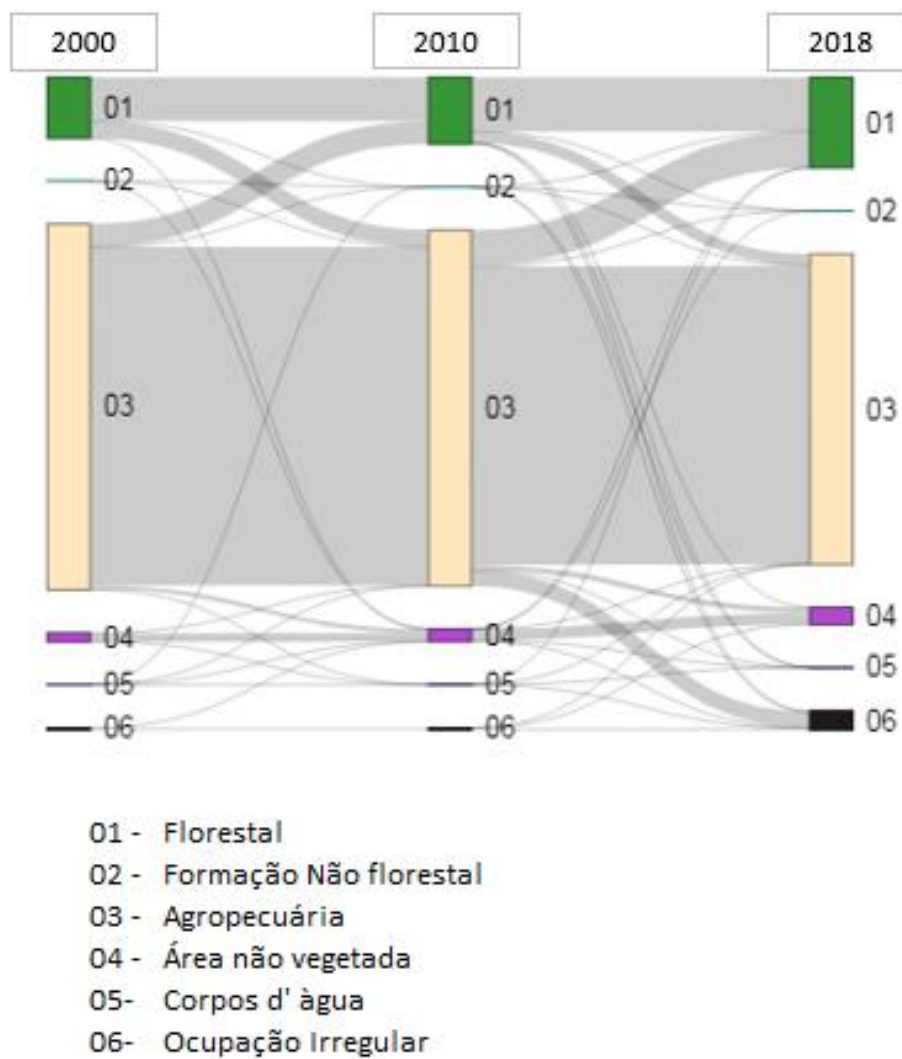
Com esse pacote foram elaborados gráficos e mapas que permitem descrever e identificar a magnitude e a distribuição espacial das mudanças. Os resultados obtidos mostram: i) deterioração da agricultura em prol das outras classes; ii) mudanças importantes na agricultura e nas trocas espaciais nas áreas florestais; e iii) aumento considerável nas áreas ocupadas irregularmente nas

margens da rodovia no período de 2010 a 2018.

Dentre essas mudanças, foi verificado o comportamento da cobertura do solo pelos dados do MapBiomas para os anos de 2000, 2010 e 2018 (Figura 42), a partir das mudanças dos *pixels* ao decorrer dos anos. Várias métricas de mudança de LUC (LUCC) em intervalos de tempo regulares e irregulares foram ser extraídas e visualizadas por meio dos diagramas de *Sankey* e acordes de uma ou várias etapas.

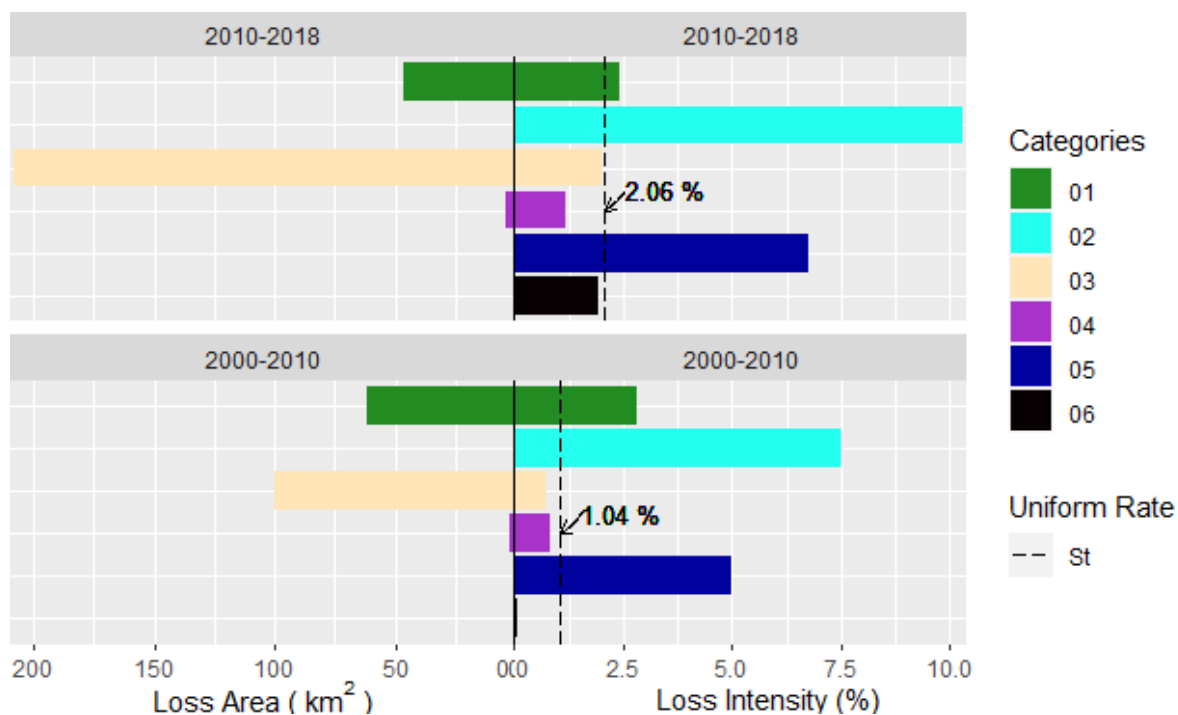
A Análise de Intensidade (IA) é um método quantitativo para analisar mapas de LUC em várias etapas de tempo, usando matrizes de tabulação cruzada, onde cada matriz resume a mudança de LUC em cada intervalo de tempo. Essa métrica foi capaz de avaliar a partir de uma inteligência Artificial (IA) em três níveis, o desvio entre a intensidade de mudança observada e a intensidade da mudança uniforme hipotética. Assim, cada nível detalha as informações fornecidas pelo nível de análise anterior. Primeiro, o nível de intervalo indica como o tamanho e a taxa de mudança variam ao longo dos intervalos de tempo. Em segundo lugar, o nível da categoria, foram examinados para cada intervalo de tempo, como o tamanho e a intensidade das perdas brutas e dos ganhos brutos em cada categoria variaram. Terceiro, o nível de transição determina para cada categoria como o tamanho e a intensidade das transições de uma categoria variam entre as outras categorias disponíveis para essa transição. Em cada nível, o método testou a estacionariedade dos padrões ao longo dos intervalos de tempo, conforme recomendado por Aldwaik e Pontius, (2012).

Figura 42 - Infográfico de Transição para os anos de 2000, 2010 e 2018.



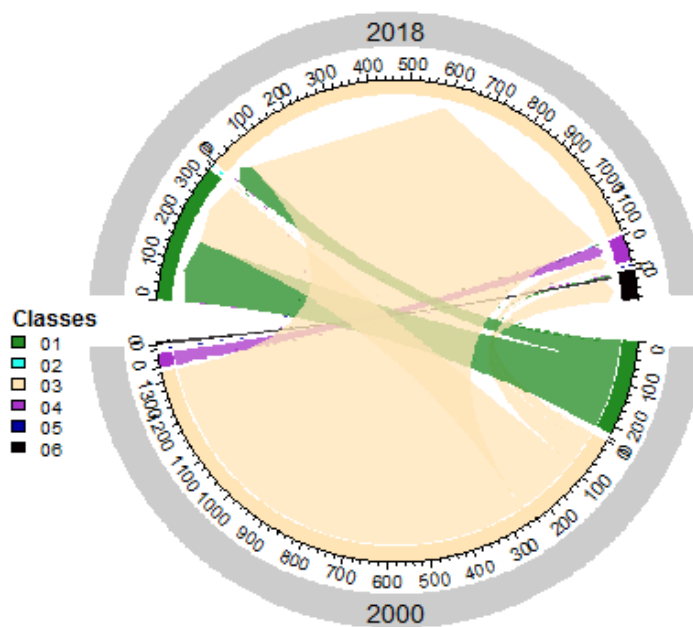
Fonte: Autor, 2022

Figura 43 - Gráfico de Perda de Intensidade e de área do LULC da BR-104/PE



Fonte: Autor, 2022

Figura 44 - Sankey das mudanças LULC



Fonte: Autor, 2022

O gráfico de perdas e ganhos (Figura 45) apresenta o quanto cada classe de uso e cobertura ganhou e perdeu área no intervalo de tempo analisado. O mesmo possibilita apreender quais classes contribuíram para as alterações observadas no momento T2. Vale ressaltar que as análises foram feitas utilizando classificação do MAPBIOMAS do uso e cobertura da terra, que é uma generalização da realidade. Nesse procedimento, embora com uma boa avaliação da exatidão global e do índice *Kappa*, houve algumas confusões de classificação entre os alvos analisados, mas que não prejudicaram os objetivos da simulação. O modelo de detecção de mudanças apresenta o local em que uma classe mudou para outra. Diversos resultados podem ser gerados combinando as classes trabalhadas.

Para esta pesquisa foram gerados modelos de mudança, considerando as transições: florestal para urbano; formação não florestal para agropecuária; e área não vegetada (área urbanizada) para ocupações irregulares. Essas transições foram escolhidas a partir dos seguintes critérios:

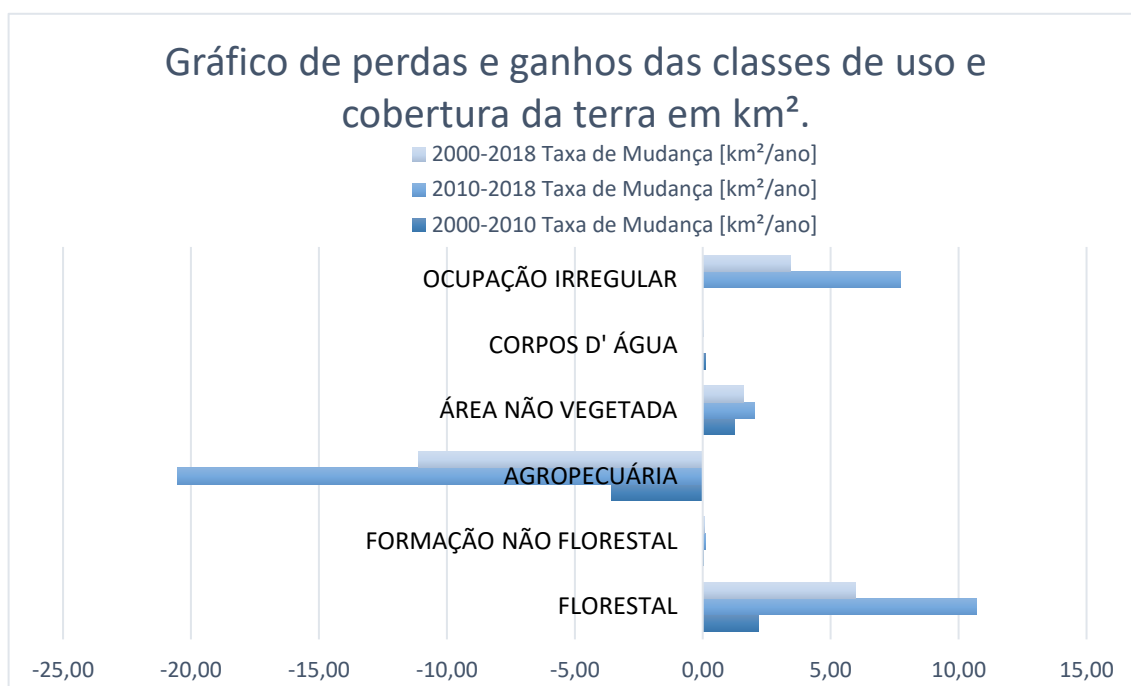
- i) No gráfico de perdas e ganhos, observa-se que a área não vegetada foi a que teve o maior ganho de área;
- ii) As classes, florestal e não florestal, foram as que mais contribuíram para a expansão da área urbana;
- iii) As classes, formação não vegetada e agropecuária são importantes para compreender a dimensão do impacto das ocupações irregulares.

Por sua vez, os modelos de tendência espacial de mudança indicam a direção para onde as mudanças de uso e cobertura da terra, estão se dirigindo. Para este tipo de produto, foram trabalhadas as mesmas transições utilizadas nos modelos de detecção de mudanças. O acréscimo da população se concentrou principalmente nos centros urbanos atravessados pela BR-104/PE.

Para alcançar o desenvolvimento sustentável nas imediações das rodovias e verificar o desenvolvimento desordenado das regiões urbanas e cidades, é necessário que as autoridades responsáveis pelo desenvolvimento urbano e pela gestão territorial gerem tais modelos de planejamento para que cada pedaço da faixa de domínio da rodovia possa ser usado da maneira mais racional e ideal em consonância com a realidade do Modelo LCM. Isso requer informações de uso/cobertura da terra presentes e passadas das áreas marginais às rodovias.

Figura 45 - Gráfico de perdas e ganhos das classes de uso e cobertura da terra em ha

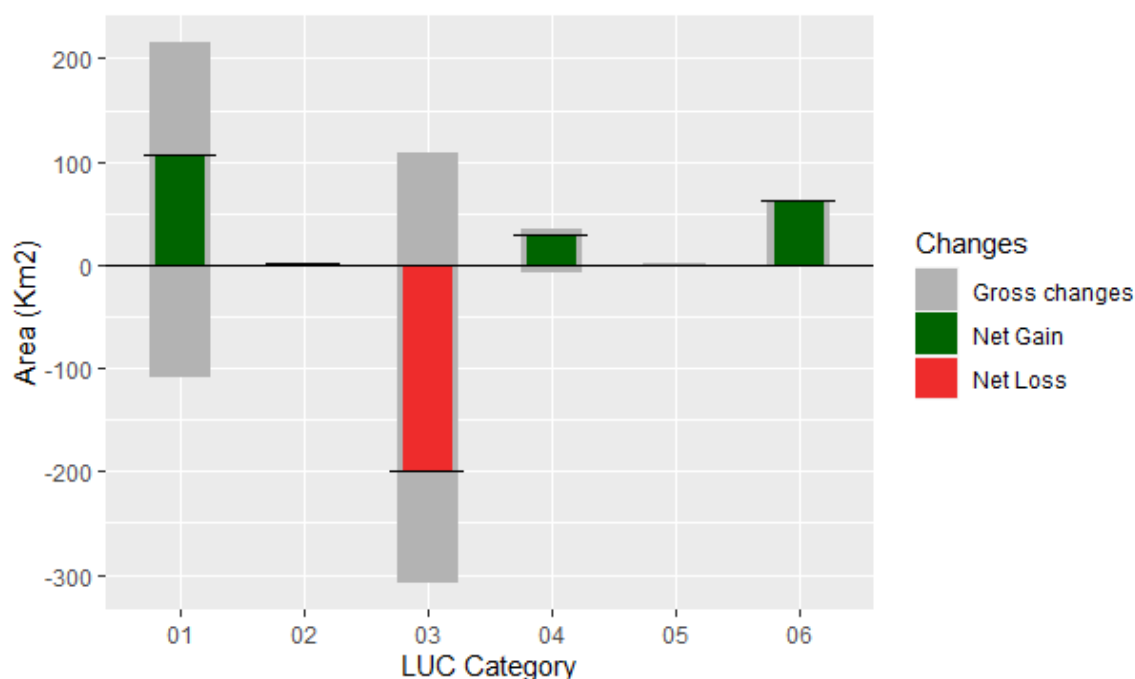
Fonte: Autor (2022)



Visto que a classe agropecuária foi a que mais perdeu sobre outros usos e coberturas da terra no intervalo de tempo analisado, no gráfico de contribuições gerado com o pacote *Open Land R* (Figura 46), observa-se que as classes, Florestal, Formação Não Florestal, Área não vegetada e Ocupação Irregular ocuparam em maior proporção, respectivamente.

O crescimento das áreas ocupadas irregularmente sobre a rodovia depende do retrocesso social e econômico. Essa é a razão básica pela qual os levantamentos socioeconômicos são realizados. Esse tipo de levantamento inclui conjuntos de dados espaciais e não espaciais. Os mapas LULC gerados pelo MAPBIOMAS adicionados à classe ocupação irregular sobre a faixa de domínio desempenham um papel importante e primordial no planejamento, gestão e programas de monitoramento em nível local, regional e nacional. Esse tipo de informação, por um lado, proporciona uma melhor compreensão dos aspectos de utilização da terra nas margens da rodovia e, por outro, desempenha um papel importante na proposição de políticas e programas necessários ao planejamento do desenvolvimento dessas regiões.

Figura 46 - Gráfico de Intensidade de Mudança da BR-104/PE



Fonte: Autor 2022

(*) Gerado no pacote Open Land R

A falta de um modelo teórico de AC impede as autoridades responsáveis pela gestão territorial das margens da rodovia criar simulações realistas das possíveis áreas de ocupação, visto que a falta de monitoramento e estudos sobre fatores sociais, econômicos e demográficos impedem a criação de políticas e o lançamento de programas habitacionais em consonância com a realidade de cada região.

Os mapas LULC gerados nos territórios marginais também ajudam a estudar as mudanças que estão acontecendo no entorno dessas rodovias. Se houver informações de metro a metro sobre o uso do solo/cobertura do solo das margens das rodovias, pode-se ajudar a propor políticas e lançar programas que melhorem os fatores relacionados aos problemas sociais que pressionam a ocupação dessas faixas.

Os programas computacionais usam técnicas para determinar quais *pixels* estão relacionados e os agrupa em classes. Diante disso é possível verificar que as variáveis usadas, IVS Infraestrutura Urbana, IVS Capital Humano e IVS Renda e Trabalho e VTN exercem influência indireta na taxa

de crescimento da população e consequentemente tornam atrativas as ocupações irregulares. A comparação dos modelos Autômatos Celulares (AC) presentes na modelagem com o *plugin MOLUSCE* do QGIS, demonstra uma alta capacidade de previsão em situações de alta desagregação dos dados geoespaciais. Mas dependendo do tamanho da informação e da capacidade de processamento, existem etapas operacionais complexas, que tornam a aplicação menos favorável. Verifica-se que a região teve duas classes de IVS no período de 2000 a 2010. Com o aperfeiçoamento das pesquisas censitárias e amostrais da região as margens da rodovia BR-104/PE houve a desagregação em mais de uma classe, IVS médio. Verificam-se também mais ocupações irregulares sobre a faixa de domínio, em regiões com maior densidade populacional e com aparentes problemas habitacionais, bem como em regiões que detém maior número de domicílios alugados.

No Apêndice 2 desta Tese estão apresentadas todas as memórias de cálculo (Mapas de Potencial de Transição, Relatório de classificação cruzada entre o modelo e o mapa de uso e cobertura de 2018).

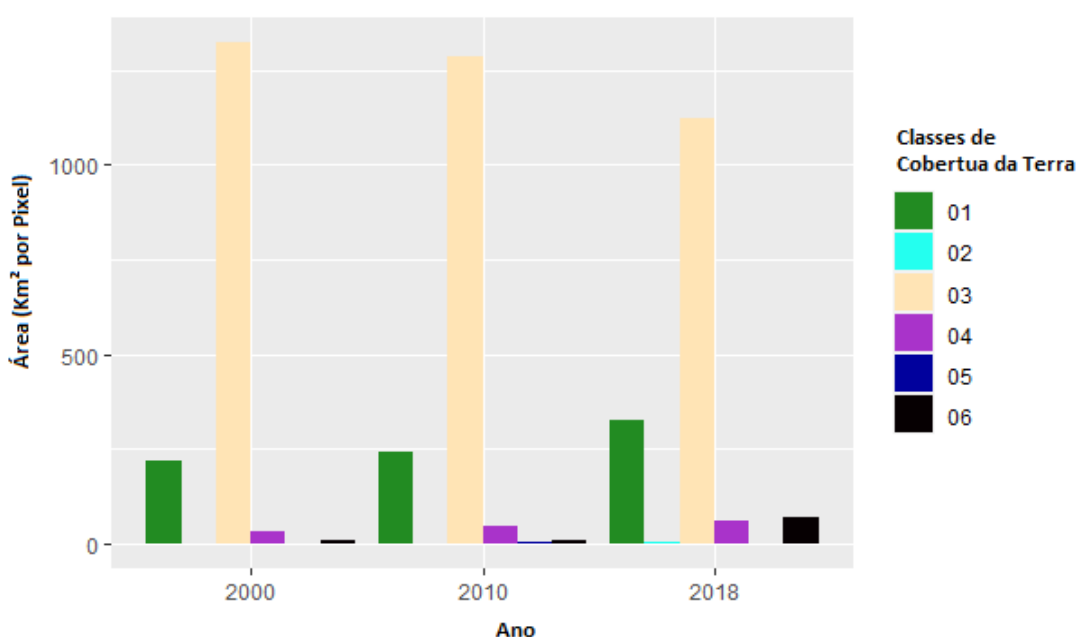
Já na análise exploratória dos dados, verificou-se que a taxa de ocupações irregulares é diretamente impulsionada pela taxa de crescimento da população, e que o bem-estar econômico e social e as mudanças populacionais são impulsionadas pela acessibilidade rodoviária. Verificou-se também que as variáveis territoriais, nesse sentido são variáveis extrínsecas que controlariam a taxa de crescimento da população local, pois com a adição de outras variáveis ao modelo não foram encontrados resultados relevantes. Isso se deve a questões específicas do tipo de modelo adotado (LCM), uma vez que os autômatos celulares usados nesse tipo de modelagem possuem uma estrutura bastante simples e são capazes de modelar diversos fenômenos complexos por meio de regras simples.

Em nível regional, acessibilidade rodoviária afeta indiretamente a taxa de crescimento populacional através do crescimento econômico e das mudanças nas oportunidades de emprego, embora o efeito seja complexo. Pode ser positivo ou negativo e variar com o grau de ruralidade do território marginal a rodovia.

As mudanças no uso do solo dependem da história das condições sociais e econômicas e do contexto ecológico da paisagem, e não progridem de forma linear, conforme a verificação dos dados. Ao longo do período de 18 anos, as principais tendências na paisagem estudada incluem a perda e o aumento da cobertura florestal, que permaneceu quantitativamente semelhante ao longo do tempo devidos ao uso reduzido da

terra agrícola antrópica e ao aumento da cobertura antrópica não agrícola, respectivamente. As mudanças mínimas na cobertura florestal, de 1,36 % de 2000 a 2010 (Tabela 10) destacam a recuperação da floresta para uma condição quantitativa maior à que foi avaliada há 18 anos (Figura 47). Isso talvez se deva aos avanços da legislação ambiental ou ao método de classificação do *pixel* na interpretação da vegetação. Verificou-se que as áreas agropecuárias tiveram contribuição no aumento das áreas ocupadas irregularmente sobre as rodovias. Isso se deve à necessidade de as sedes das propriedades serem construídas mais próximas das margens da rodovia com o intuito de extrair um maior valor comercial da propriedade.

Figura 47 - Gráficos de Cobertura do Solo dos Anos 200,2010 e 2018



Fonte: Autor 2022

Pela ótica da estatística clássica, o valor médio e a variância são idênticos para as duas situações: uso dos setores censitários (desagregados) e o uso do IVS (agregados). Entretanto, segundo a avaliação no espaço, a primeira possui um comportamento espacial muito desaglomerado, enquanto a segunda situação apresenta uma estrutura ou correlação espacial.

A combinação de dados de cobertura do solo com os mapas de IVS, densidade populacional e valor da terra nua constituem importantes ferramentas de diagnóstico das

ocupações irregulares. A variabilidade das ocupações irregulares tende a acompanhar as diversas camadas mapeadas, por isso, é importante conhecer o grau de influência que tais atributos exercem sobre o fenômeno. Nesse contexto, duas formas principais de variabilidade devem ser detectadas: espacial e temporal, como recomenda Carvalho (2001).

A sistematização do índice segue o princípio proposto no qual o índice de vulnerabilidade social, apresentado por Cutter (2003), em que dados socioeconômicos e demográficos usados em nível desagregado (dados do modelo LCM da BR-408/PE por setores censitários) são analisados através de um método analítico de fatores, de modo que centenas de variáveis são reduzidas a um pequeno conjunto de fatores independentes que representem a maior porcentagem da variância. Em outras palavras, isso torna possível selecionar as variáveis (e combinações destas) que são mais determinantes na definição dos perfis de vulnerabilidade na área estudada.

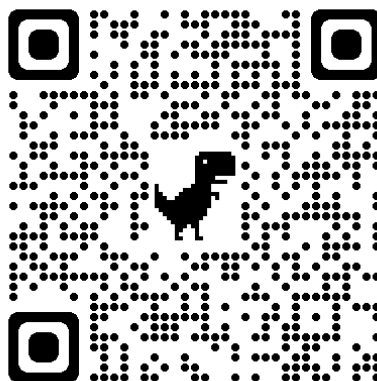
Desse modo, cada fator (variáveis dos setores censitários) é visto como tendo igual contribuição à vulnerabilidade geral e são escalonados de modo que os valores mais próximos a 1 indiquem maiores níveis de vulnerabilidade e valores menores que 1 diminuam a vulnerabilidade geral. Destaca-se que as variáveis que compõem o índice podem ser associadas de forma aditiva simples e sem ponderação, desde que normalizadas ou convertidas em um *score*, e selecionadas a partir da região municipal, no caso IVS. Conforme conclui Cutter *et al* (2003), fatores assim construídos são consistentes com a literatura sobre riscos mais ampla, e os índices desenvolvidos com esse método têm explicado cerca de 75% da variância estatística em diferentes áreas de estudo.

A pouca variabilidade espacial associada aos atributos socioeconômicos e de infraestrutura podem facilitar a álgebra dos mapas, mas pode ter dificultado a identificação do potencial de transição das células. Com as informações referentes às ocorrências de ocupações irregulares sobre a faixa de domínio, foi possível observar relações entre a espacialização do fenômeno e seus impactos com a suscetibilidade espacial e a vulnerabilidade social de forma integrada.

7.3 Modelo LCM para Rodovia BR-101/PE

Os dados e os resultados estão disponíveis no repositório com o seguinte endereço eletrônico:

Figura 48 - Qrcode de acesso aos Dados do Resumo da BR-101/PE

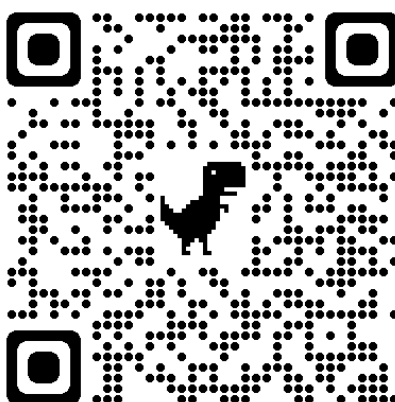


<https://zenodo.org/record/6975391#.YvT6OnbMLrc>

Fonte: Autor (2022)

A descrição dos dados e a metodologia da análise exploratória e as demais estatísticas estão contidas no repositório público:

Figura 49 - Qrcode de Acesso à análise exploratória dos Dados da BR-101/PE



https://github.com/ErisonBarros/Repositorio_BR101

Fonte: Autor (2022)

7.3.1 Abordagem Metodológica da BR-101/PE

Para criar um instrumento de gestão e ordenamento territorial das faixas de domínio é necessário estudar o comportamento do uso e cobertura do solo das áreas lindeiras à rodovia, no caso presente, da BR-101/PE.

Para detecção das transformações, os dados do MAPBIOMAS já utilizados nas modelagens da BR-408/PE e da BR-104/PE já se mostraram interessantes para aplicação em ambientes de monitoramento contínuo e de precisão satisfatória para aplicação em rodovias estaduais e federais, visto que as mesmas são disponibilizadas pela *web* ou por meio do *plugin* do Qgis *MapBiomas Collection*. Esse *plugin* permite adicionar os mapas anuais de uso e cobertura do solo do Projeto MapBiomas (<http://mapbiomas.org/>), como uma coleção da camada WMS. Isso pode tornar a aplicação dessa modelagem muito interessante para criação de centros de controle e monitoramento das infraestruturas rodoviárias, possibilitando através de rotinas baseadas na dinâmica temporal das mudanças da cobertura da terra das margens de rodovias, gerar informações que subsidiaram políticas públicas e ações de fiscalização pontual em trechos rodoviários.

A detecção de qual variável ou indicador seria utilizado para monitorar a faixa de domínio dependeria da regionalidade da rodovia, da disponibilidade de dados históricos fornecidos hoje pelo MAPBIOMAS, escala dos dados disponibilizados. É muito importante avaliar e prever as mudanças de LULC com base nos dados históricos do Mapbiomas e *Land Change Modeler* (LCM). Qual modelo de uso e cobertura da terra melhor responde as questões abordadas:

- (i) Qual foi a tendência de mudança de LULC na área de estudo no passado (2000–2010) e quais classes de LULC foram mais afetadas?
- (ii) Que padrões de crescimento e mudança podem ser esperados no futuro?
- (iii) Quais são os principais fatores determinantes da mudança de LULC na faixa de domínio da rodovia?

O modelo da Cadeia de Markov (CA) é estocástico, o que requer pares de imagens classificadas (LULC) para derivar o potencial de transição para as previsões futuras com base na quantidade de mudança histórica (EASTMAN, 2012). A combinação de autômatos

celulares e Cadeia de Markov pode simular a dinâmica espaço-temporal da mudança de LULC. O modelo prevê transições de uma célula de um LULC para outra dependendo de dados físicos e socioeconômicos (TONG, *et al.*, 2012, LI *et al.*, 2015). O processo de validação do modelo passa pela classificação cruzada do dado simulado e comparação com os dados reais (mapa de referência). Portanto, para avaliar os fatores de mudança do passado e simular o futuro, a metodologia proposta passa por utilizar dados validados.

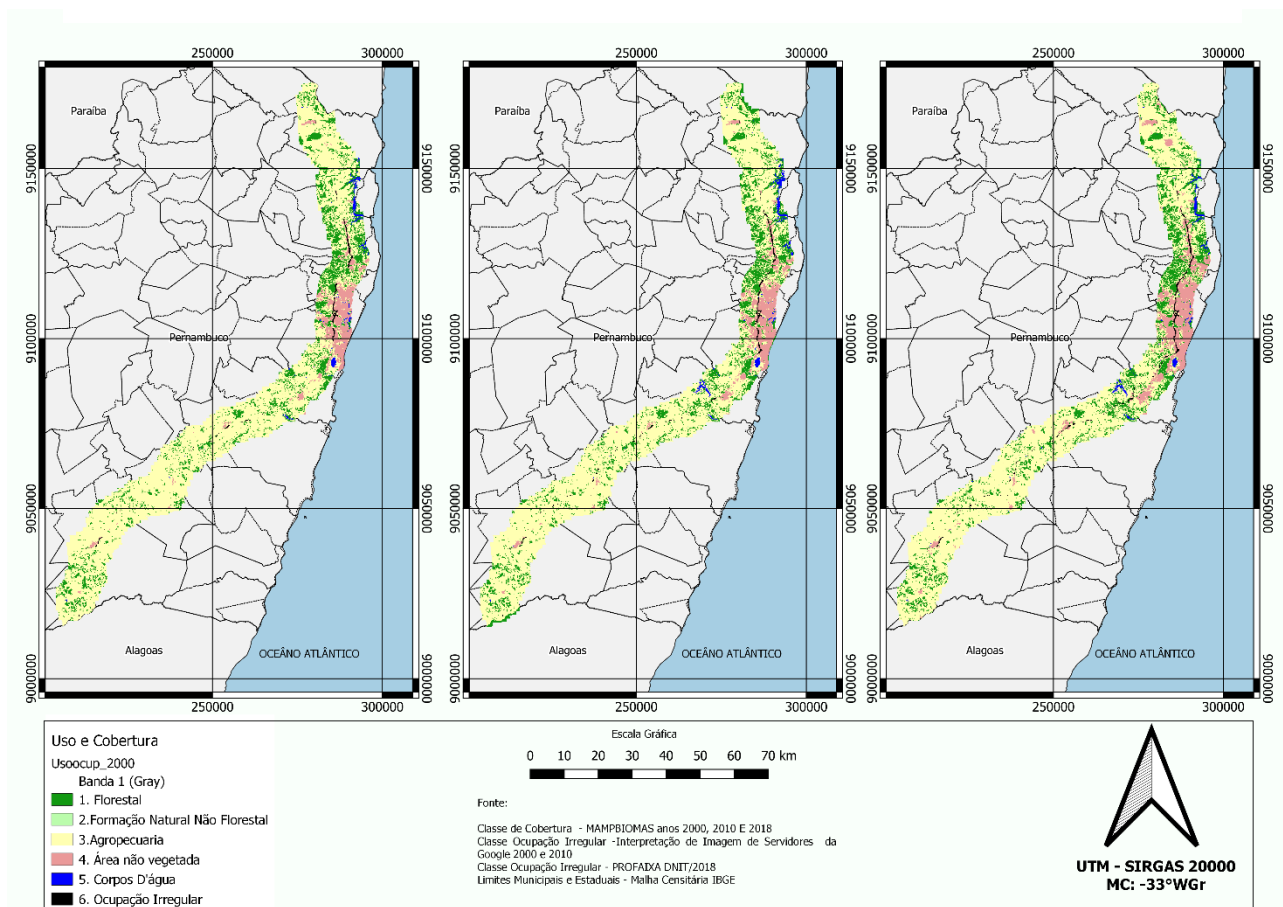
Dados de sensoriamento remoto, particularmente imagens *Landsat*, fornecem uma possibilidade adequada para monitoramento de mudanças LULC, particularmente para países em desenvolvimento onde as tecnologias geoespaciais ainda não estão bem desenvolvidas (LETA; DEMISSIE; TRÄNCKNER, 2021).

Como as questões da pesquisa apresentadas nos estudos das BR-408/PE e BR-104/PE foram demonstradas significativas nesta Tese, optou-se pela repetição das mesmas já adotadas. Como diferença apenas utilizou-se o refinamento adotado na metodologia da BR-104/PE, que ao invés de utilizar os setores censitários adotou-se o Índice de Vulnerabilidade Social – IVS. Vale salientar que adoção da metodologia proposta pelo modelo da BR-104/PE vai de encontro com a literatura de análise dados espaciais, que sempre propõem a utilização de dados cada vez desagregados. Mas em virtude da capacidade de processamento optou-se pela adoção dessa metodologia.

Os dados de uso e cobertura foram associados a informações do mapeamento da faixa de domínio da BR-101/PE dos anos de 2000, 2010 e 2018, obtidos da classificação supervisionada das ocupações irregulares de 2000 e 2010, a partir de imagens associadas às classes de uso e cobertura da Terra do Projeto Mapbiomas e validadas pelo Levantamento Topográfico Cadastral da faixa de domínio realizado pelo DNIT em 2018. A ocupação irregular da faixa de domínio foi extraída por fotointerpretação das imagens do Google Earth relativas aos anos de 2000 e 2010. Para 2018, foram utilizados os dados do mapeamento do DNIT, assim como, dados do Projeto de Mapeamento PE3D (Figura 50).

A partir de dados geoespaciais da rodovia federal, BR-101/PE, situada na Zona da Mata de Pernambuco disponibilizados pela Superintendência Regional do Estado Pernambuco do DNIT, foram criados os cenários para utilização no QGIS.

Figura 50 - Cenários de Uso e Cobertura da Terra - Margens da BR-101/PE



Fonte: Autor (2022)

A partir do estudo realizado na BR-408/PE e BR-104/PE, verificou-se a possibilidade de realizar uma análise exploratória nos dados da BR-101/PE, uma vez que trata-se de uma rodovia mais heterogênea do que as outras rodovias citadas. Então a partir do uso do IVS, foram recortados os dados para uma fronteira de um *buffer* de 5 km (Tabela 13)

Tabela 13 - Conteúdo e fontes de dados para o LCM na BR-101/PE

Classes	Tipos de Dados	Ano	Fonte de Dados	Resolução
Distribuição da População	Raster	2010	The Gridded Population of World Version 4 (GPWv4)	1 x 1 km
IVS	Shapefile	2000 e 2010	IPEA	200 x 200 m
Limite dos Municípios	Shapefile	2019	IBGE	1/100.000
Valor de Terra Nua (VTN)	Shapefile	2018	INCRA	1/100.000
Ocupações Irregulares DNIT/PE	Shapefile	2018	DNIT	1/1000
Cobertura do Solo	Raster	2000, 2010 e 2018	MAPBIOMAS	1:100.000
Projeto PE3D	Raster	2016	APAC	1:5000
Ocupações irregulares Extraído de Imagem do Google Earth	Raster	2000 e 2010	Google Earth	200 x 200 m

Fonte: Autor (2021)

De posse dos dados do MAPBIOMAS e das experiências exaustivas dos modelos adotados nas BR-408/PE e BR-104/PE foi realizado o recorte da área e a reclassificação dos *pixels* de acordo a tabela de categorias de uso e cobertura, as quais foram agrupadas em seis classes (Quadro 3)

Quadro 3 - Reclassificação das Classes do MAPBIOMAS

Pixel	Classes de Cobertura	Fonte
1	Florestal	MAPBIOMAS
2	Formação Natural Não Florestal	MAPBIOMAS
3	Agropecuária	MAPBIOMAS
4	Área Não vegetada	MAPBIOMAS
5	Corpos d' Água	MAPBIOMAS
6	Ocupações irregulares sobre a faixa de domínio	Fotointerpretação do Serviço de Imagens do Google Earth

Fonte: Autor (2021)

O mapeamento da vulnerabilidade socioeconômica, infraestrutural e ambiental requereu, primeiramente, a sistematização de um índice que pudesse ser correlacionado com as informações relativas à suscetibilidade espacial das ocupações irregulares na faixa de domínio da rodovia. Então para a modelagem da BR-101/PE adotou-se a simplificação a partir da IVS médio, ao invés das componentes IVS Infraestrutura Urbana, IVS Capital Humano e IVS Renda e Trabalho. Essa simplificação não acarretou grandes perdas ao modelo, uma vez que nas análises exploratórias dos dados foram observadas fortes correlações entre os mesmos. Isso se deve a definição do cálculo do IVS. O IVS é o resultado da média aritmética dos subíndices: IVS Infraestrutura Urbana, IVS Capital Humano e IVS Renda e Trabalho, e cada um deles entra no cálculo do IVS final com o mesmo peso.

A sistematização do índice seguiu os princípios apresentados no desenvolvimento do *Social Vulnerability Index*, apresentado por Cutter *et al.* (2003), em que dados socioeconômicos e demográficos usados em nível desagregado (no modelo da BR-408/PE como grade estatística e no modelo BR-104/PE como setores censitários) são analisados através de um método analítico de fatores, de modo que centenas de variáveis são reduzidas a um pequeno conjunto de fatores independentes que representem a maior porcentagem da variância. Isso torna possível selecionar as variáveis (e combinações dessas) que são mais determinantes para a definição dos perfis de vulnerabilidade da área estudada.

Os fatores preponderantes apontados por Cutter *et al.* (2003) são relativos à renda, estrutura do local de moradia e perfil da população (gênero, faixa etária, etc.). Esses fatores são colocados em um modelo aditivo para computar a pontuação de sumário (o índice propriamente dito), adotado sem assumir aprioristicamente a importância relativa de cada fator para a soma total.

Desse modo, cada fator é visto como tendo igual contribuição à vulnerabilidade geral e são escalonados de modo que valores positivos indiquem maiores níveis de vulnerabilidade e valores negativos diminuam a vulnerabilidade geral. Destaca-se que as variáveis que compõem o índice podem ser associadas de forma aditiva simples e sem ponderação contanto que normalizadas ou convertidas em um *score*, e selecionadas a partir de análise fatorial. Cutter *et al.* (2003) conclui que os fatores assim construídos são consistentes com a literatura sobre riscos e os índices desenvolvidos com este método explicam 75% da

variância estatística em diferentes áreas de estudo. Diante dessa análise, foi utilizado o mapa de índice de vulnerabilidade Social – IVS para categorizar e rasterizar o mapa vetorial fornecido pelo IPEA.

A categorização consistiu em fazer rasterização do mapa vetorial de Índice de vulnerabilidade social- IVS conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Categorização e Rasterização do Mapa de IVS.

Intervalo	Pixel
0 – 0,200	1
0,200 - 0,300	2
0,300 – 0,400	3
0,400 – 0,500	4
0,500-1	5

Fonte: Autor (2022)

Para que as camadas *raster* pudessem ser analisadas de forma sistemática, tanto como vetor, quanto como *raster*, as entradas foram padronizadas. Isso é necessário, para que a técnica possa ser replicada em outras situações e com outros *softwares* de modelagem. Diante disso alguns elementos dos metadados dos *raster* geoespaciais precisam estar compatíveis, se não a modelagem do fenômeno se torna impossível para os *softwares* com as entradas do Qgis *plugin* MOLUSCE e do *software* R. (Quadro 5). Já os dados geoespaciais vetoriais devem estar no mesmo sistema de referência e projeção e com os atributos no formato decimal ou inteiro.

Quadro 5 - Compatibilidade das Canadas Raster

Metadado	Descrição
Sistema de Referência de Coordenadas (SRC)	Sistema de Projeção: UTM
Extensão	Compatível entre os Mapas
Largura e Comprimentos	Compatível entre os Mapas
Tipo de Dado	Inteiro de 8 Bits sem Sinal
Extensão	GeoTIFF
Origem	Compatível entre os Mapas

Fonte: Autor, 2022.

Contudo, houve a necessidade de padronizar os dados de densidade populacional, pois os dados brutos do *The Gridded Population of World Version 4* (GPWv4) dizem pouco ou quase nada sobre o comportamento de uma variável população, tornando necessário o uso de técnicas para organizar e resumir os dados, como a distribuição de frequências. Então houve a necessidade de serem categorizados em classes. Para calcular a amplitude das classes, são necessários o número de classes e sua amplitude total, conforme Equação 20 a seguir:

Equação 19

$$\textit{Amplitude das Classes} = \frac{\textit{Amplitude Total}}{\textit{n}^{\circ} \textit{ de classes}}$$

Sendo que:

Equação 20

$$\textit{Amplitude Total} = \textit{Maior Valor} - \textit{Menor Valor}$$

As classes são formadas pelo limite inferior (Li) e limite superior (Ls) e podem ser expressas da seguinte forma:

Equação 21

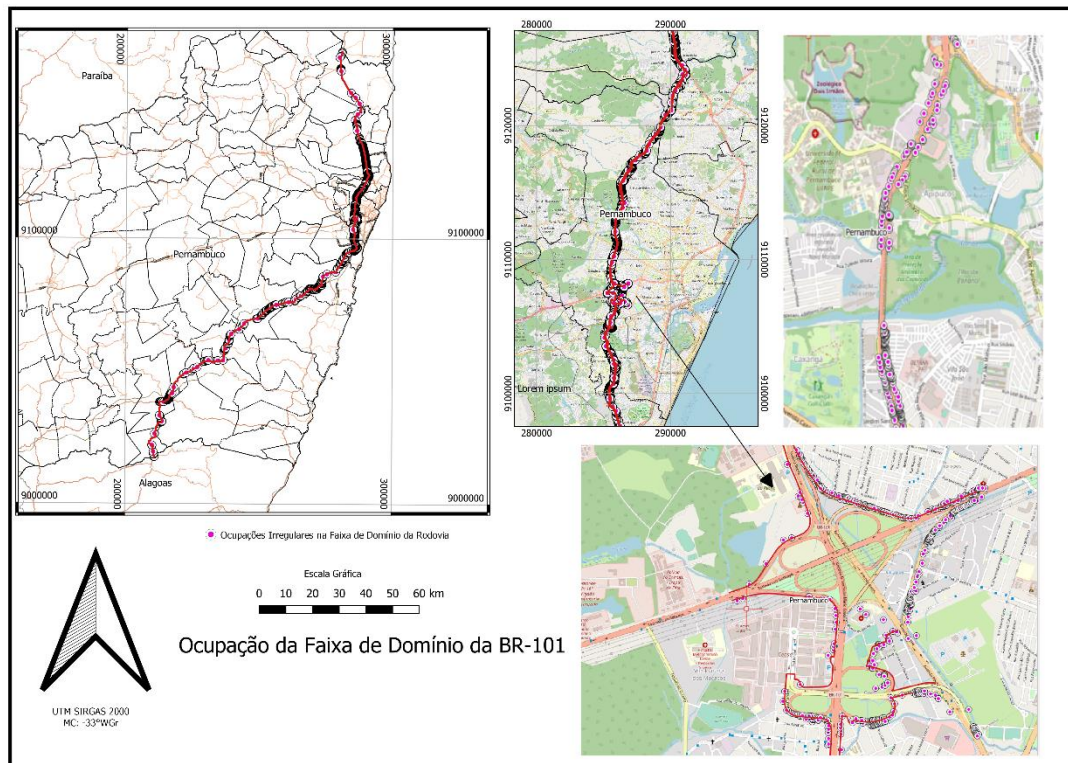
$$Li \vdash Ls$$

Isso indica que o intervalo contém os valores maiores ou iguais a Li e menores que Ls, ou seja, é o intervalo [Li, Ls). A primeira classe começa com Li sendo o menor valor dos dados. Para obter Ls, Li é somada à amplitude das classes. As demais classes são obtidas de forma semelhante, considerando o Li como o valor Ls da classe anterior.

7.3.1 Análise Exploratória dos dados

A análise descritiva detalhada com visualização sobre diversos serviços de mapas na Web das ocorrências de ocupação irregular permitiu familiarizar-se com os dados, organizá-los e sintetizá-los de forma a obter as informações úteis do conjunto de dados para

Figura 51 - Análise e Visualização de Mapas na WEB

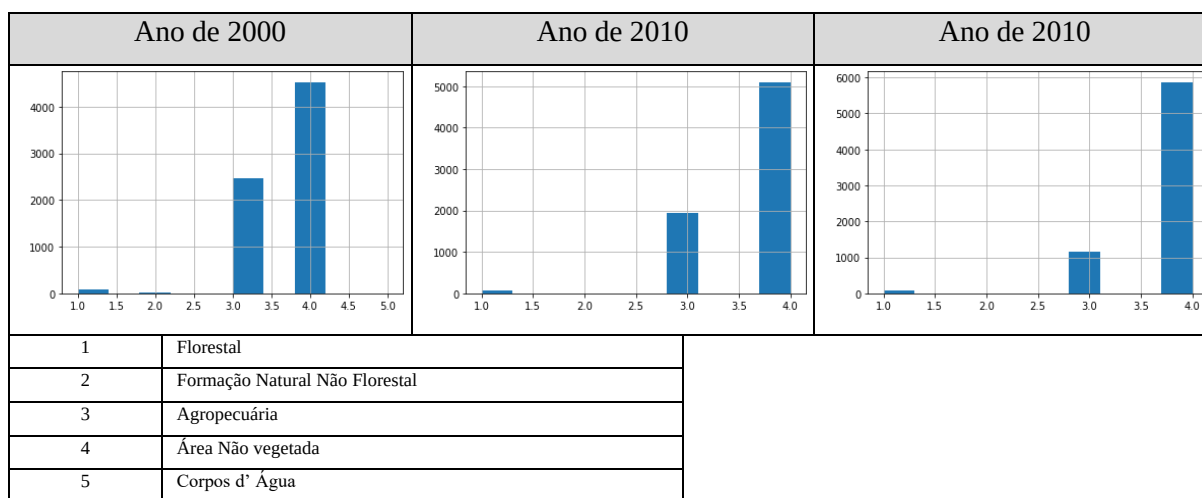


responder as questões referentes às ocupações irregulares nas BR-101/PE.

Fonte: Autor (2022)

A partir dos dados de 2000, 2010 e 2018 tabulados foram observadas ocorrências de ocupações irregulares sobre a faixa de domínio. Diante dessa análise, verificou-se que nos últimos anos houve um decaimento das ocupações irregulares foto interpretáveis na classe agropecuária e um crescimento das ocupações nas áreas urbanas (Área Não vegetada) (Figura 52).

Figura 52 - Frequência das Ocupações em Relação às Classes de Cobertura da Terra



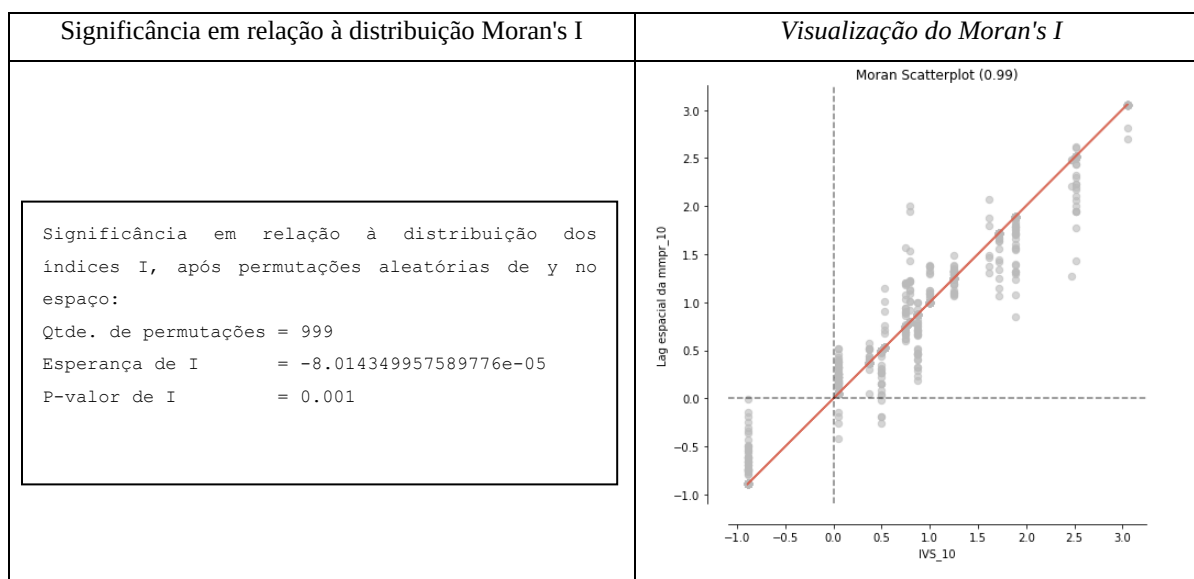
Fonte: Autor (2022)

Diante disso e das experiências adquiridas nos estudos da BR-408/PE e BR-104/PE, observou-se de forma pontual a correlação espacial do fenômeno para o ano de 2010, visto que as informações dos indicadores e censitárias tinham uma melhor integridade. Para isso foi aplicado o cálculo do Índice de Moran Univariado e obteve-se o valor de 0,992 com autocorrelação positiva, conforme dados do Apêndice 3.

A ferramenta de Autocorrelação Espacial (*Global Moran's I*) é uma estatística inferencial, o que significa que os resultados da análise são sempre interpretados dentro do contexto de sua hipótese nula. O valor do Índice de Moran's que deve ser avaliada por um teste de hipótese sobre a aleatoriedade da distribuição dos valores de y no espaço.

Na prática, o valor do índice calculado é um valor normalizado: calcula-se sua esperança teórica, calcula-se seu desvio-padrão teórico, e o Moran's I é o z-score. É a partir dessa estatística que se aceita ou rejeita a hipótese inicial (H_0) de os dados de y estão distribuídos no espaço de forma aleatória.

Figura 53 – Análise do Moran's I Univariado Global



Fonte: Autor (2022)

Percebeu-se que o índice obtido é bem maior que a média esperada, e é significativo em relação a um grau de significância de 5% ($p\text{-valor} = 0,001 < 5\%$). Conclui-se assim, que o valor de Moran's I = 0.992 é estatisticamente significativo, e que existe autocorrelação espacial positiva para a variável IVS do ano de 2010 (ivs_10.)

Com a decomposição do Índice de Moran de forma a construir uma medida localizada de autocorrelação, buscou-se encontrar pontos de calor “*hot spots*” e pontos de frio “*cold spots*”, que são regiões em que se encontram respectivamente pontos com maior e menor correlação espacial. Foi feito um *scatterplot* que divide as áreas em quatro grupos:

- High-high: 1º quadrante (em vermelho no gráfico),
- Low-high: 2º quadrante,
- Low-low; 3º quadrante (em amarelo no gráfico), e
- High-low: 4º quadrante.

O parâmetro p é o $p\text{-valor}$ que caracteriza o limite de significância no Moran's Local:

- Os pontos são coloridos de vermelho se forem considerados “*hot spots*”.

- Os pontos são coloridos de azul escuro se forem considerados “cold spots”.

Os pontos ainda podem ser coloridos de amarelo ou de azul claro, se forem respectivamente “High-Low” ou “Low-High”. Os pontos em cinza não se caracterizam nem como “hot spots” nem como “cold spots”. Foi considerando como parâmetro de referência estatística o p igual a 5%.

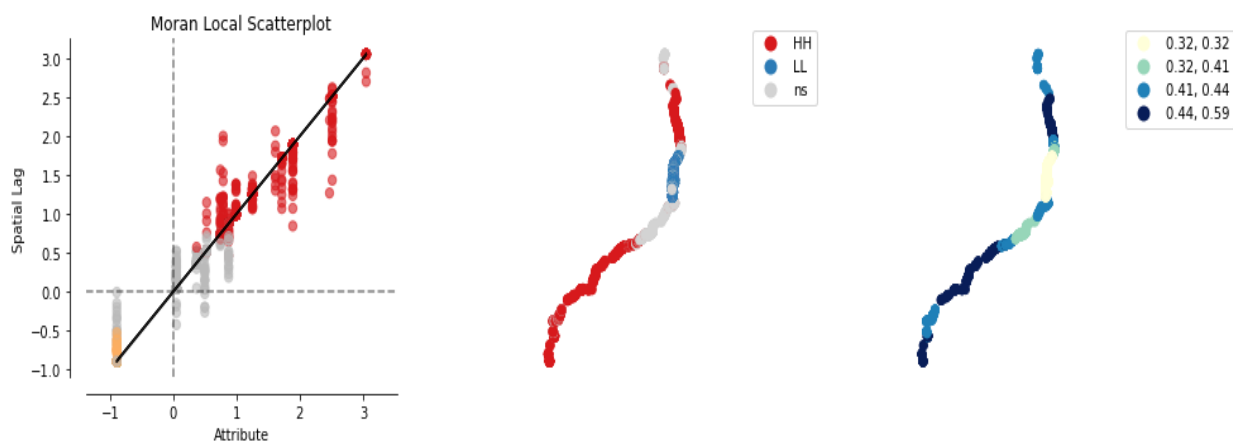


Figura 54 - Visualizações lado a lado do Moran's I univariado local.

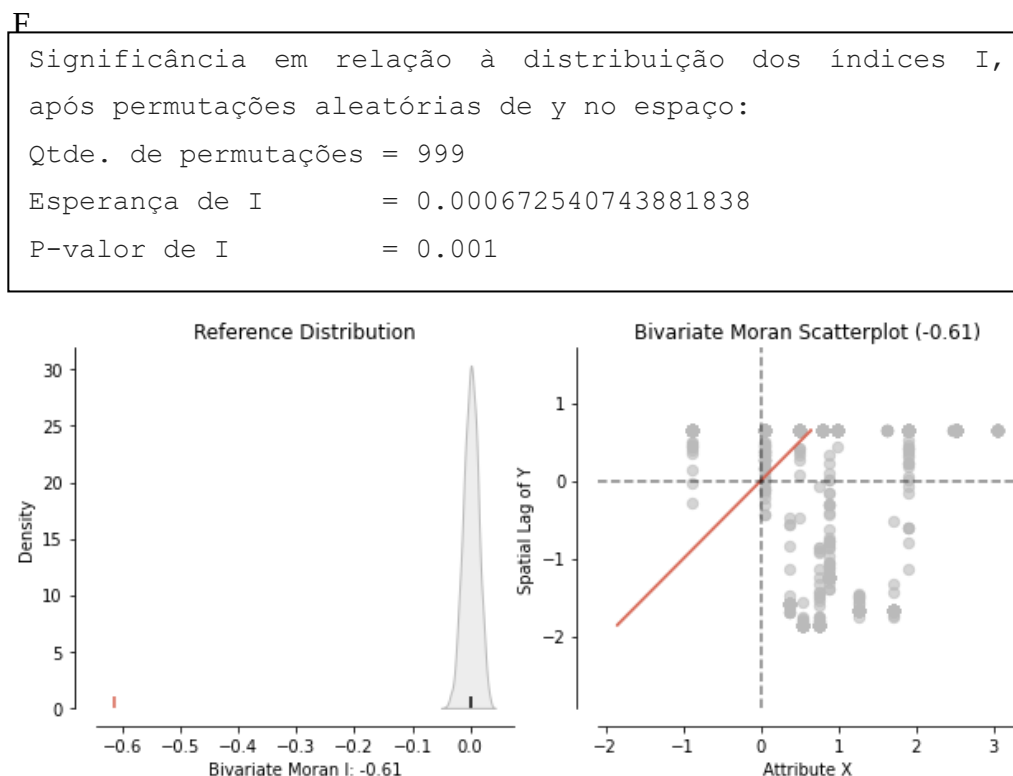
Fonte: Autor (2022)

Observando os mapas percebe-se que os pontos em Azul da 3ª coluna têm uma tendência de ter alto valor de IVS, ao passo que na região que tem pontos amarelos apresenta uma tendência de baixo valor de IVS. Percebe-se a existência de uma forte tendência na Região Metropolitana do Recife (LL= menor IVS) e na região sul da Rodovia (HH= Alto IVS). Isso mostra o reflexo das ocupações irregulares em relação às variáveis trabalhadas nos modelos da BR-408/PE e BR-104/PE, onde os fatores socioeconômicos, de infraestrutura e meio ambiente podem afetar no número de ocupações em relação ao indicador IVS.

Assim, optou-se por analisar de forma bivariada o fenômeno, utilizando o Índice de Moran Bivariante do IVS e da Densidade Populacional. No cálculo bivariado, foi feita uma análise espacial entre as variáveis IVS e Densidade Populacional para verificar o grau de correlação espacial dessas duas variáveis. Foi obtido o valor de -0.61 de autocorrelação

negativa. Foram utilizadas as permutações para rejeitar a hipótese nula (H_0) de aleatoriedade espacial dos y com significância (p -valor) de 5% (Figura 55).

Figura 55 - Resultado da Significância Bivariate Moran's I



Fonte: Autor (2022)

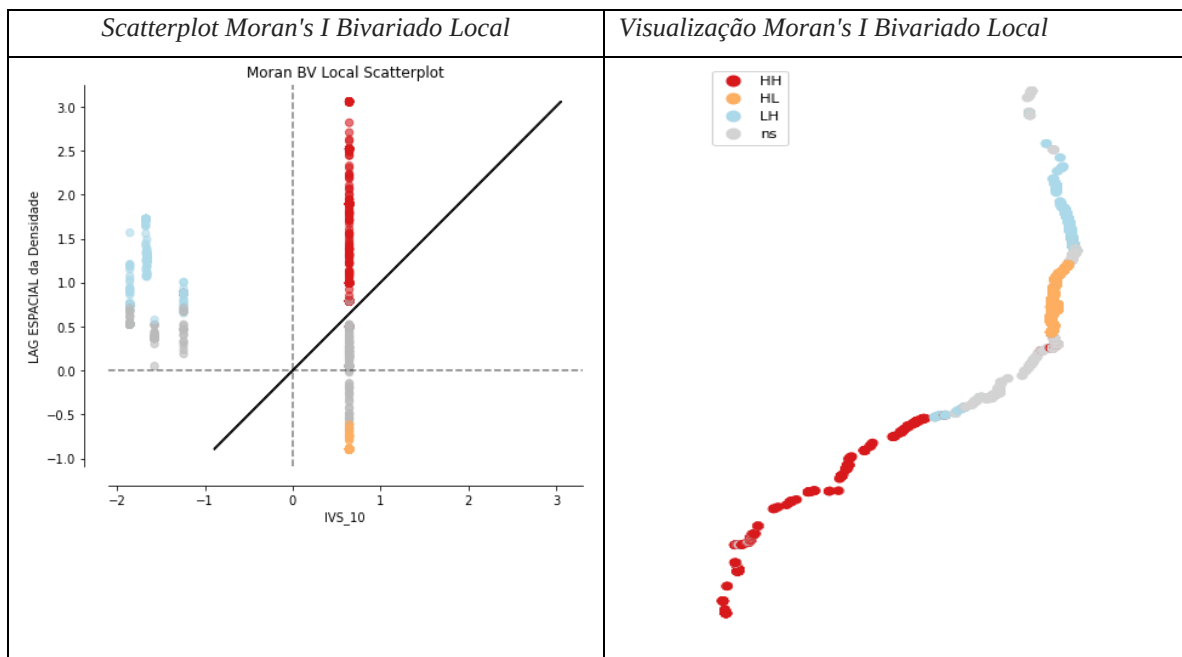
Percebemos que o índice obtido é bem maior que a média esperada, e é significativo em relação a um grau de significância de 5% (p -valor = $0.001 < 5\%$). Então existe uma correlação espacial negativa entre o IVS e a Densidade para o ano de 2010. Verificando *Moran's I Bivariado Local*, obteve-se a seguinte análise:

Os pontos afastados dos centros urbanos apresentam uma tendência a ter regiões de Baixa densidade populacional, ao passo que os próximos aos centros urbanos têm uma tendência a revelarem regiões de alta IVS vizinhas de regiões de alta densidade populacional.

Neste sentido, a análise multitemporal das mudanças de uso e cobertura da terra através do modelo LCM aliada ao mapeamento de suscetibilidade a ocupações irregulares são recursos que podem contribuir com a temática, visto que os mesmos possibilitam inferir quais classes de uso e cobertura estão sobre áreas de alta suscetibilidade a ocupações

irregulares.

Figura 56 -Scatterplot e Visualização Moran's I Bivariado Local



Fonte: Autor (2022)

7.3.2 Detecção de mudanças no Uso e Cobertura da Terra

A partir da metodologia já definida nas outras rodovias, houve comparação direta entre as camadas categóricas, adotando-se a dimensão de 200 x 200 m para o *pixel*. Então, verificou-se a variação das classes para os anos estudados e foi calculado o percentual de área de cada classe em relação à área total de cada célula (Tabela 14).

Como resultado, verifica-se um crescimento de 0,22% entre o período de 2000 a 2010 das áreas ocupadas irregularmente, em contrapartida houve crescimento da mesma ordem de grandeza em relação aos corpos d'água. Isso se deve provavelmente a algum erro de classificação do MAPBIOMAS ou devido a problemas no dia da extração da imagem.

Tabela 14 Distribuição das Células, por Classes de Uso e cobertura da Terra, seguindo situação de ocupação para o Ano de 2000 e 2010

Classes	2000 (sq.km)	2010 (sq.km)	Δ (sq.km)	2000%	2010%	Δ %
1. Florestal	403,88	407,68	3,8	18,01	18,18	0,17
2. Formação Não Florestal	3,24	3,36	0,12	0,14	0,15	0,01
3. Agropecuária	1645,04	1612,24	-32,8	73,35	71,89	-1,46
4. Área Não Vegetada	152,96	171,12	18,16	6,82	7,63	0,81
5. Corpos d' água	22,28	28,08	5,8	0,99	1,25	0,26
6. Ocupação Irregular	15,28	20,2	4,92	0,68	0,90	0,22

(*) Sq.km= Km²

Fonte: Autor (2022)

A Matriz de Transição da BR-101/PE

Com os dados de entrada dos mapas de uso de cobertura da terra para os anos de 2000 (inicial) e 2010 (final), foi realizado o cálculo das taxas de transição com base em Cadeias de Markov, que informam sobre a quantidade de mudanças a serem simuladas. Como produto, é gerada a matriz de transição (Tabela 15) que contém as probabilidades de uma determinada classe permanecer a mesma ou de mudar para outras classes durante certo intervalo de tempo.

Tabela 15 - Matriz de Transição para os Anos de 2000 e 2010 para BR-101/PE

	1.Florestal	2.Formação Não Florestal	3. Agropecuária	4. Área Não Vegetada	5. Corpos d' água	6. Ocupação Irregular
1. Florestal	0,88	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00
2. Formação Não florestal	0,32	0,25	0,25	0,02	0,16	0,00
3. Agropecuária	0,03	0,00	0,95	0,02	0,00	0,00
4. Área não vegetada	0,00	0,00	0,05	0,94	0,00	0,01
5. Corpos d' água	0,03	0,03	0,06	0,02	0,86	0,00
6. Ocupação Irregular	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,99

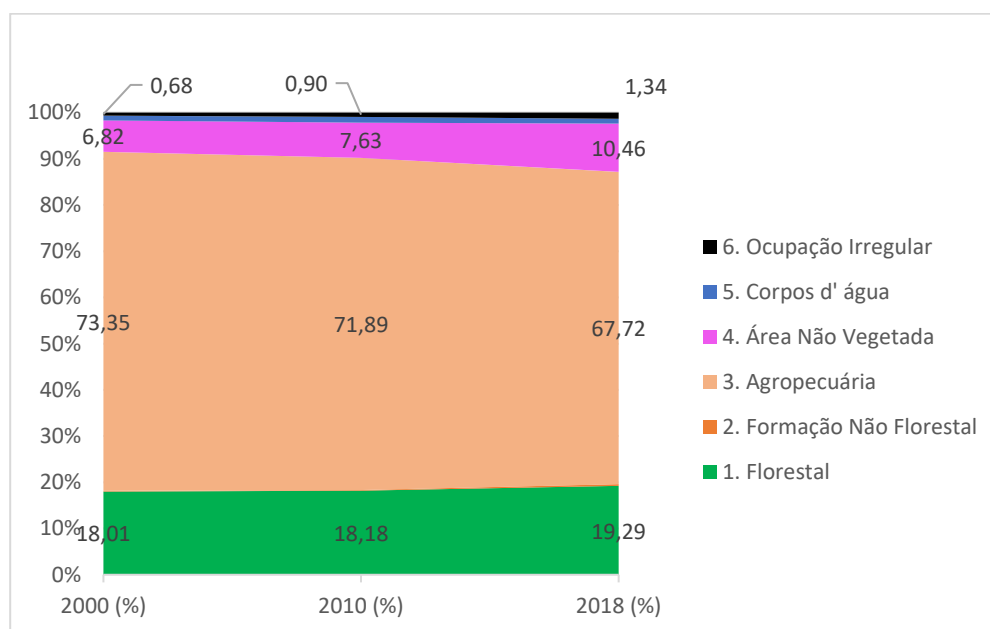
Fonte: Autor (2022)

Verifica-se com essa matriz que existem tendências de probabilidade que o *pixel* que está classificado como ocupação irregular no ano de 2010 tem a probabilidade de 99% de permanecer como ocupação irregular em 2018, se não houver nenhuma mudança na dinâmica socioeconômica, de infraestrutura e ambiental, principalmente em relação a ações

relacionadas à gestão dessas faixas de domínio. Assim como, um *pixel* que representa áreas não vegetadas (áreas urbanas) tem uma chance de 1% de se tornar uma ocupação irregular sobre a faixa de domínio da rodovia.

Verifica-se graficamente (Figura 57) que as maiores mudanças ocorreram na classe área urbana, pois se percebe um ligeiro crescimento dessa classe. As demais classes apresentam diferenças mínimas em relação aos períodos analisados.

Figura 57 - Dinâmica do padrão de uso e cobertura do solo na BR-101/PE



Fonte: Autor (2022)

Com análise cruzada das imagens *raster* de 2010 e 2018 observou-se como se procederam as mudanças dos *pixels*. Assim, também foi possível mapear as transições entre os *pixels* de 2000 a 2010 e de 2010 a 2018. A partir do *software Fragstats* foi possível mapear a quantidade de mudanças e no Qgis conseguiu-se visualizar onde aconteceram. Visto que algumas mudanças são imperceptíveis ao olho do observador, esse tipo de análise permite identificar quais tipos de mudanças *pixel a pixel*. Na Tabela 16 é possível verificar neste tipo de relatório quais área o gestor precisa atuar. Principalmente nas áreas de *Pixel* que mudam de 4 para 6 e nos *pixels* que permanecem no intervalo de tempo com o valor de *pixel* 6. Diante do cruzamentos com outro níveis de informações é possível estabelecer ações ou políticas públicas que estão associados com essa mudanças ou permanência.

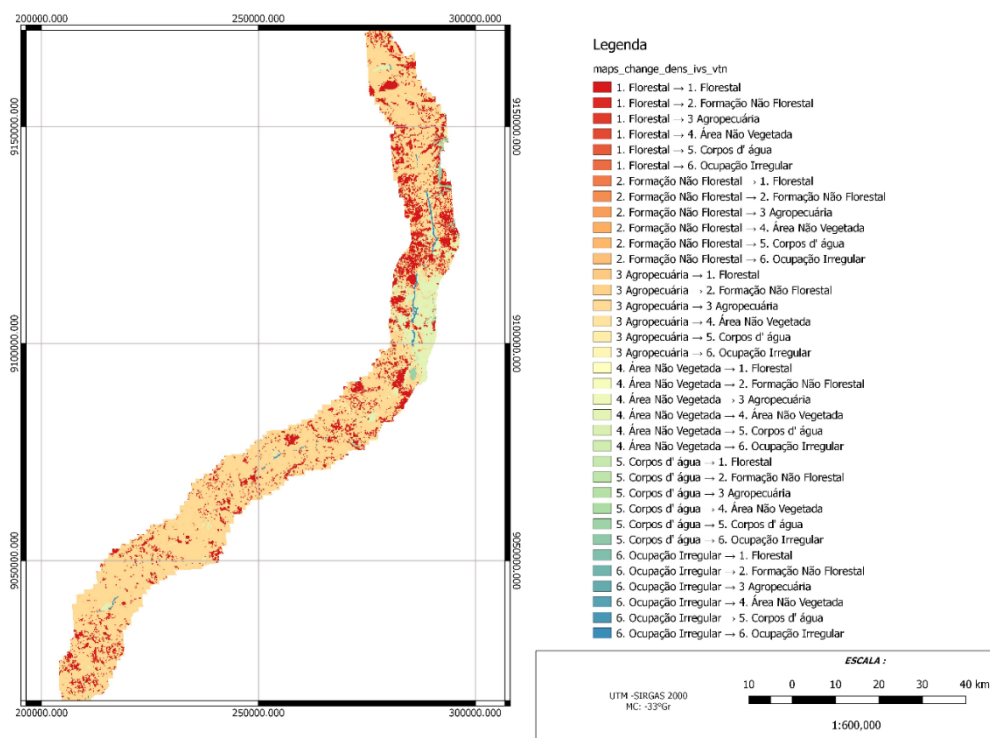
Tabela 16 - Relatório de mudanças do Pixel no Tempo 2010 a 2018

	Period	DE	PARA	km2	Qt. Pixel	Interval	Ano Inicial	Ano Final
1	2010-2018	1	1	375,4	9385	8	2010	2018
2	2010-2018	1	2	0,2	5	8	2010	2018
3	2010-2018	1	3	30	750	8	2010	2018
4	2010-2018	1	4	1,24	31	8	2010	2018
5	2010-2018	1	5	0,4	10	8	2010	2018
6	2010-2018	1	6	0,56	14	8	2010	2018
7	2010-2018	2	1	0,8	20	8	2010	2018
8	2010-2018	2	2	0,52	13	8	2010	2018
9	2010-2018	2	3	1,52	38	8	2010	2018
10	2010-2018	2	4	0,04	1	8	2010	2018
11	2010-2018	2	5	0,48	12	8	2010	2018
12	2010-2018	3	1	55,32	1383	8	2010	2018
13	2010-2018	3	2	2,28	57	8	2010	2018
14	2010-2018	3	3	1483,4	37085	8	2010	2018
15	2010-2018	3	4	65,96	1649	8	2010	2018
16	2010-2018	3	5	1,4	35	8	2010	2018
17	2010-2018	3	6	3,88	97	8	2010	2018
18	2010-2018	4	1	0,04	1	8	2010	2018
19	2010-2018	4	2	0,28	7	8	2010	2018
20	2010-2018	4	3	2,8	70	8	2010	2018
21	2010-2018	4	4	167,16	4179	8	2010	2018
22	2010-2018	4	5	0,04	1	8	2010	2018
23	2010-2018	4	6	0,8	20	8	2010	2018
24	2010-2018	5	1	0,84	21	8	2010	2018
25	2010-2018	5	2	4,72	118	8	2010	2018
26	2010-2018	5	3	1,08	27	8	2010	2018
27	2010-2018	5	4	0,28	7	8	2010	2018
28	2010-2018	5	5	21,16	529	8	2010	2018
29	2010-2018	6	6	20,2	505	8	2010	2018

Fonte: Gerada pelo Software Fragstats

O *MOLUSCE* permitiu a criação do mapa de mudanças (mapas *raster*) de cada tipo de *pixel* no qual é possível detectar onde e como aconteceu a mudança no interior da área estudada. (Figura 58)

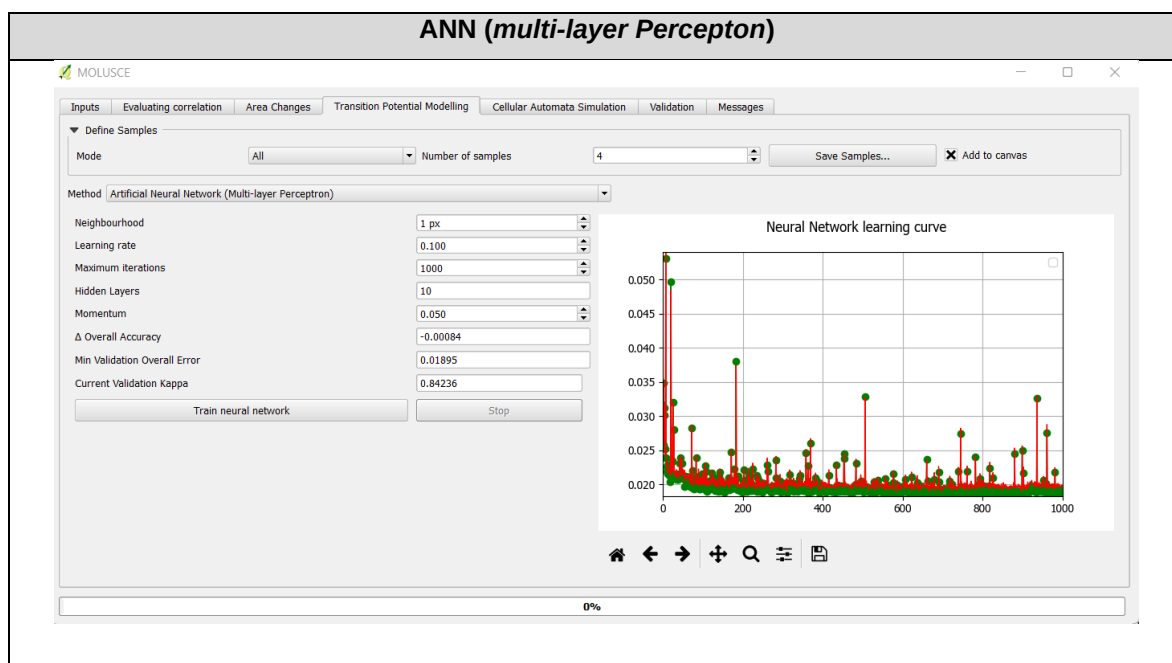
Figura 58 - Mapa de Mudanças de Pixel



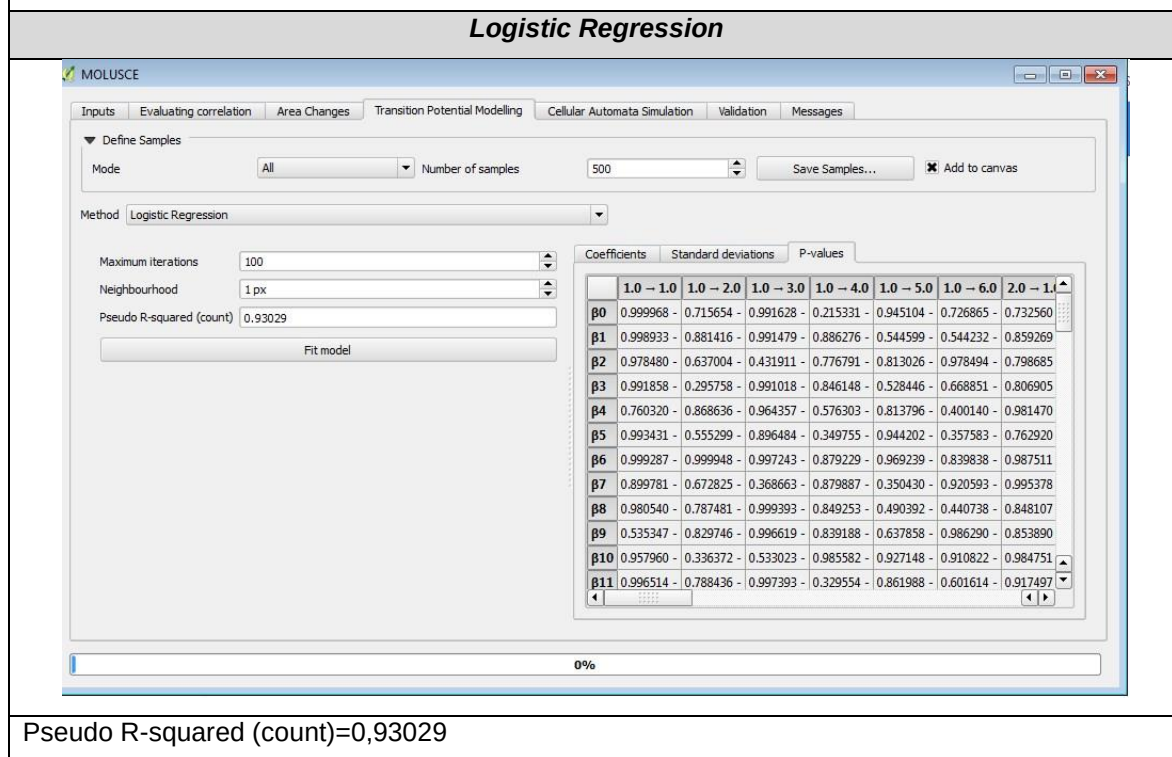
Fonte: Autor (2022)

Assim como ocorreu na BR-408/PE e BR-104/PE, foi adotado como modelo de potencial de transição, o ANN (*Multi-layer Perceptron*) e o *Logistic Regression* do plugin do MOLUSCE do QGIS com os respectivos parâmetros. (Figura 59)

Figura 59 - Parâmetros da Modelagem do Potencial de Transição



Corrente Validação Kappa: 0,84236



Pseudo R-squared (count)=0,93029

Fonte: Autor (2022)

Os demais produtos do modelo estão disponíveis no Apêndices 03, assim como, no repositório público disponibilizado.

7.3.3 Validação dos Modelos da BR-101/PE

Os modelos propostos na pesquisa foram validados com o valor de referência dos *pixels* do mapa de uso de 2018 adicionado da classe ocupação irregular da faixa de domínio, onde foi verificada a partir a matriz de confusão, usando o índice *Kappa*, a precisão do modelo na previsão do comportamento da mudança do uso/cobertura para o ano 2018. Então, foram aplicadas para BR-101/PE três tipos de estatísticas (Tabela 8): *Kappa* (K), *localização Kappa* (Kloc), e *Kappa Histogram* (Khist).

Figura 60 - Validação dos Modelos para a BR-101

	ANN (multi-layer Perceptron)	Logistic Regression
Porcentagem de Acertos	92,124113	92,20439
Kappa (overall)	0,83218	0,833440
Kappa (histo)	0,90526	0,90960
Kappa (loc)	0,91927	0,91732

Fonte: Autor (2022)

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões deste estudo destacam a relevância de modelos dinâmicos para compreender e prever ocupações irregulares nas faixas de domínio rodoviário. Os resultados demonstram que áreas vulneráveis podem ser identificadas com precisão, permitindo intervenções estratégicas fundamentadas em evidências.

A literatura que embasou esta pesquisa revelou o imenso potencial do uso de modelos dinâmicos LUC. Esses modelos já vêm sendo adotados em diversas áreas e objetivos, como na modelagem da expansão urbana, em estudos ambientais, estudos de bacias hidrográficas, climáticos, queimadas etc. Esta Tese demonstrou a hipótese de que essa variedade de modelos e técnicas pode ser adotada no monitoramento e previsão das ocupações das faixas de domínio das rodovias, já que se torna praticamente inviável economicamente monitorar com a mesma escala e periodicidade todo território da faixa de domínio, mesmo com o uso de geotecnologias de aquisição de dados espaciais como: Lidar, Sensoriamento Remoto, aerofotogrametria (aeronaves e Drones/Vantes) posicionamento por satélite (GNSS) e topografia clássica.

A partir do referencial teórico e metodológico construído, aplicado nas rodovias BR-408/PE, BR-104/PE e BR-101/PE, através das técnicas de agregação ou desagregação das variáveis exploradas no LCM, podem-se analisar na escala apropriada, os dados disponíveis para desenvolvimento de um modelo capaz de projetar cenários futuros de ocupações irregulares. A partir desse modelo é possível definir estratégias e ações para mapear com maior frequência e técnica, os trechos mais susceptíveis a ocupações dessas rodovias.

O esforço para se calibrar o modelo, parametrizar dados, selecionar variáveis e as evidências obtidas pelos cruzamentos da simulação com as imagens do PE3D e do levantamento topográfico cadastral das ocupações do Programa PROFAIXA, conduziu ao aprimoramento do conhecimento dos fatores direcionadores das mudanças da cobertura e uso do solo nas margens das rodovias trabalhadas entre 2000, 2010 e 2018.

O processo de aperfeiçoamento do entendimento do comportamento do fenômeno das ocupações irregulares das faixas de domínio a partir das análises exploratórias dos dados e da localização das ocupações nos tempos (t_1 , t_2 e t_3) permitiram definir a escolha das

principais variáveis que deveriam ser parametrizadas (melhor forma de categorização) no LCM.

A pesquisa bibliográfica inicialmente apontou indícios das variáveis que poderiam estar relacionadas ao fenômeno. Como as rodovias são infraestruturas extensas e cortam uma grande diversidade de situações, houve a necessidade no primeiro instante, de trabalhar com os setores censitários do IBGE para a rodovia BR-408/PE. No entanto, essa escolha exigiu um grande esforço computacional e metodológico para desagregar as variáveis censitárias associadas ao espaço geográfico do setor censitário nas grades estatísticas.

Na rodovia BR-104/PE, a simulação foi realizada utilizando os Indicadores de Vulnerabilidade Social (infraestrutura urbana; capital Humano e Renda e Trabalho). A comparação com a simulação utilizando os dados desagregados dos setores censitários como adotados na BR-408/PE, revelou diferenças irrelevantes em relação ao Índice *Kappa*.

Com intuito de extrair melhores conclusões a respeito do uso de dados agregados ao estado e não mais ao setor censitário, foi adotado na BR-101/PE, o IVS, agora como média resultante das três componentes identificadas na metodologia do IPEA. Ao final não houve comprometimento nos resultados em relação ao nível de concordância ou reprodutividade entre as duas técnicas de inferência.

As variações nas metodologias aplicadas trouxeram na análise da validação dos modelos, resultados satisfatórios. Isso se deve aos estudos de análise espacial, que utilizam áreas delimitadas por polígonos fechados (classes de uso, setores censitários e manchas de diversas variáveis) partirem do pressuposto de haver homogeneidade interna, ou seja, mudanças importantes só acontecem nos limites. Segundo Câmara *et al.* (2001), essa é uma premissa nem sempre verdadeira, dado que frequentemente as unidades de levantamento são definidas por critérios operacionais (setores censitários) ou políticos (municípios) e não há qualquer garantia que a distribuição do evento seja homogênea dentro destas unidades. É comum que grupos sociais distintos estejam agregados em uma mesma região de coleta – favelas e áreas nobres – resultando indicadores calculados que representam a média entre populações diferentes, como é o caso das áreas estudadas.

Para isso, foram necessários estudos de outras técnicas de ajuste de distribuições para minimizar as distorções dos cálculos simples de indicadores populacionais que podem levar a distorções nos indicadores utilizados neste estudo. Assim, a utilização de outros métodos

estatísticos para avaliar a coerência da modelagem pode subestimar o nível de concordância.

Com o aprimoramento das técnicas e da metodologia proposta nesta tese, torna-se mais viável o controle e a gestão estratégica das faixas de domínio rodoviárias. A razão é que possibilita ao gestor do território definir os *clusters* (agrupamento de situações de ocupação irregular), baseados nas variáveis preponderantes da LCM. A segmentação da rodovia em trechos baseados na similaridade, “*Cluster Analysis*”, permite atribuir comparações de importância de uma determinada característica do trecho sobre a outra. Os agrupamentos dessas características em segmentos rodoviários facilitam ao gestor da faixa de domínio, a definição de estratégias de auxílio à tomada de decisão.

A classificação desses segmentos rodoviários por indicadores de suscetibilidade as ocupações irregulares modeladas pelas tendências de mudanças simuladas no uso e cobertura da terra (LUCC) podem ajudar a propor ações estratégicas com prioridade nas áreas mais sensíveis ao fenômeno.

A compreensão da dinâmica do uso e cobertura do solo nas áreas lindeiras às rodovias permite prever, monitorar e validar as escolhas das variáveis ou indicadores propostos na revisão da literatura. A metodologia proposta é menos arbitrária, do que os métodos de estatísticas multivariadas que usam, por exemplo, as partes interessadas (*stakeholders*) para definição de importância de um conjunto de variáveis / indicadores.

A metodologia proposta nesta tese contribui para identificar no primeiro intervalo de tempo (t_1 e t_2) para os mapas de uso e cobertura do solo associado às variáveis estáticas e dinâmicas, quais fatores tiveram maior ou menor contribuição para aquele *pixel* ou grade mudar de um estado inicial (classe) de cobertura do solo para uma classe denominada ocupação irregular sobre a faixa de domínio da rodovia, denominada de probabilidade de transição.

O método apresentado permite criar situações adversas às situações propostas no instante final do intervalo (t_2) para estudar o comportamento das ocupações em diferentes cenários. Para isso, novas pesquisas deveriam ser realizadas sobre a matriz de transição para o intervalo (t_2 e t_3), que no caso teriam a sua validação com a disponibilidade da classificação do Mapbiomas do ano de 2030, do censo demográfico de 2022 ou Índice de Vulnerabilidade Social deste mesmo ano (t_3).

Ao testar o modelo em três rodovias com características espaciais e temporais distintas de forma satisfatória, demonstra-se que a forma de representação da realidade utilizada na pesquisa, autômatos celulares, possibilita testar uma ação estratégica ou política pública com prioridade em neutralizar, por exemplo, os fatores que têm afetado as mudanças da cobertura das áreas lindeiras das três rodovias estudadas, como: densidade populacional, fatores socioeconômicos, infraestrutura e ambientais ou a resultante IVS, e o valor da terra nua (VTN).

As estruturas dos autômatos celulares se mostraram capazes de modelar o fenômeno de características complexas como o das ocupações irregulares, por meio das regras simples disponibilizadas pelo modelo LCM. Os autômatos celulares permitem ao modelador fazer variações com os *rasteres* de entrada que representam as variáveis, como forma de criação de cenários futuros. Isso possibilita ao gestor identificar a intensidade de mudança da variável que pode afetar a expansão das classes de uso e cobertura do solo.

Na pesquisa, embora tenha sido possível observar o aumento de classes de uso do solo que agem como fatores agravantes no surgimento e/ou aceleração das ocupações irregulares, como é o caso da classe “Área não Vegetada”, houve também na série temporal analisada, uma constante permanência das ocupações irregulares.

Sendo assim, as análises da associação entre alterações de uso e o surgimento de novas ocupações se tornou um requisito crítico para a avaliação de ocupações sobre a margem das rodovias. Isso leva à conclusão de que se houve alguma estratégia de planejamento e gestão do território contra essas ocupações nos anos anteriores a 2000, as mesmas se mostraram ineficientes.

Os resultados deste estudo podem ser utilizados para fornecer evidências empíricas sobre os padrões e indicadores que vão identificar as principais forças motrizes da dinâmica LULC em nível de margem de rodovia em próximas simulações. Podem também, apoiar o gestor ou gestores das faixas de domínio, a melhorar as ações e políticas de uso do solo na direção do desenvolvimento sustentável.

A indicação dessas variáveis iniciais incluídas no modelo, já vão nortear as prioridades dos gestores de como diminuir os impactos das mudanças da cobertura do solo nas margens de rodovias. Acredita-se, a partir dos dados analisados, que a inclusão de algumas outras

variáveis, como a espacialização dos dados de habitação e preço de imóveis rurais e urbanos possa trazer um avanço sobre a análise proposta nesta tese.

Na tese, também ficou clara a necessidade da disponibilização de dados cadastrais e censitários desagregados para uma mais eficiente aplicação do modelo na escala local. Nessa perspectiva, os municípios atravessados por rodovias necessitam registrar quantos domicílios ou estabelecimentos comerciais estão localizados principalmente nas margens das rodovias. Objetiva-se com isso, buscar mecanismos de ordenamento das ocupações, que definam limites legais aos posseiros ou proprietários que vivam ou vierem a ocupar os territórios marginais às rodovias. Como sugestão, por não haver dados da situação jurídica (posse ou propriedade) dos imóveis das margens de rodovias, verificar em trabalhos futuros, se as ações de regularização fundiária que ocorrem em regiões próximas, exercem influência pela compatibilização dos limites físicos dos imóveis com os limites legais do registro de imóveis.

Deve-se frisar em estudos complementares a esta pesquisa, voltados ao planejamento e ordenamento territorial e à qualidade ambiental urbana, a necessidade de aplicar cenários de expansão domiciliar ou comercial, na análise das ocupações irregulares sobre as margens das rodovias nos trechos urbanos. Essas análises devem demonstrar para onde e quanto as cidades podem crescer na direção das rodovias, sem configurar ocupações irregulares. Assim, se permitirá a formulação de um planejamento e gestão urbana ambientalmente sustentável, a partir de indicadores que expressem a capacidade de autorregulação da paisagem, mediante o controle do uso e cobertura do solo.

Nesse sentido, a atuação dos órgãos responsáveis pela gestão das faixas de domínio de rodovias, não devem ser direcionados apenas à geração de soluções tecnológicas de aquisição de dados, mas a soluções metodológicas baseadas em análises dos dados e em evidências verificadas em cenários.

Para isso o DNIT precisa continuar investindo em geotecnologias para espacializar fenômenos, assim como aperfeiçoar o registro de ocorrências de ocupações irregulares, acidentes de trânsito e atropelamentos para poder estudar relações espaciais e temporais confiáveis. Precisa também continuar evoluindo no desenvolvimento de sistemas que transformem a localização no trecho rodoviário (Sistema de Referência Linear- SRL) em

coordenadas geográficas, visto que só assim será possível fazer o cruzamento de informações com outras bases georreferenciadas e disponibilizadas por outras instituições.

Concluindo, com o uso da metodologia proposta facilita-se o monitoramento contínuo e a fiscalização desse patrimônio público de grande área e distribuição espacial. O modelo propicia a integração com outros sistemas de gestão territorial Nacional, estadual ou municipal, que associado aos dados socioeconômicos disponibilizados e gerenciados por um Sistema de Informações Geográficas (SIG) possibilita ao órgão responsável pela gestão da malha rodoviária nacional, um monitoramento eficiente e inovador de suas faixas de domínio.

Para estudos futuros, recomenda-se aprofundar a análise da dinâmica de uso e cobertura do solo, considerando perdas e ganhos, mudança líquida e permuta de mudanças, por meio das matrizes de transição, no sentido de observar a existência de fatores externos que influenciam as rápidas mudanças entre os diferentes períodos e trechos das rodovias.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL C, GREEN G M, GROVE J M, EVANS T P, SCHWEIK C M, 2002, ``A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice'', General Technical Report NE-297, Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability, and prevention natural disaster in development countries. *Geomorphology*, v. 47, n. 2-4, 2002, p. 107- 124.

ALDWAIK S, PONTIUS R (2012) Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landsc Urban Plann* 106:103–114

ALMEIDA, C. M. Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP) / C. M. Almeida. – São José dos Campos: INPE, 2003. 321p. – (INPE-10567-TDI/942/A).

ALMEIDA, C. M. Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP) / C. M. Almeida. – São José dos Campos: INPE, 2003. 351p. – (INPE-10567-TDI/942/A). Acessado em 04/03/2022. Disponível em:
http://www.dsr.inpe.br/geu/Teses%20de%20Doutorado/Tese_Claudia_Almeida.pdf

ALMEIDA, C. M.; GLERIANI, J. M.; CASTEJON, E. F.; SOARES-FILHO, B. S. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 22, n. 9, p. 943-963, 2008.

ALMEIDA, C.; BATTY, C.; MONTEIRO, A.M.; CAMARA, G.; SOARES-FILHO, B.S.; CERQUEIRA, G.; PENNACHIN, C. 2003. Stochastic Cellular Automata Modelling of Urban Land Use Dynamics: Empirical Development and Estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*

ALMEIDA, C.; MONTEIRO, A.M.; CAMARA, G.; SOARES-FILHO, B.S.; CERQUEIRA, G.;

PENNACHIN, C.; BATTY, C. 2002. GIS and remote sensing as tools for simulation of urban land use change. In: Third International Symposium Remote Sensing of Urban Areas. Istanbul, Tu: Istanbul Tech. Un. and Regensburg Un. pp. 387-394.

ANDERSSON, Claes; RASMUSSEN, Steen; WHITE, Roger. Urban settlement transitions. *Environment and Planning B*, v. 29, n. 6, p. 841-866, 2002.

ANTONI JP, JUDGE V, VUIDEL G, KLEIN O (2018) Constraint Cellular Automata for Urban Development Simulation: An Application to the Strasbourg-Kehl Cross-Border Area. pp 293–306 "archives-XLII-4-W8-15-2018

BROWN DG, VERBURG PH, PONTIUS RG JR, LANGE MD (2013) Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Curr Opin Environ Sustain* 5:452–457. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.012>

ASIA AIR SURVEY; NEXT GIS. MOLUSCE : Modules for Land Use Change Evaluation. 2012.

ATKINSON, P. M.; TATNALL, A.R.L. Introduction neural networks in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, v.18, n.4, 699-709, 1997.

BAKER, W.L. 1989. A review of models of landscape change. *Landscape Ecology*, 2(2): 111- 33.

BARNI, P. E.; FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A. 2012. Desmatamento no sul do Estado de Roraima: padrões de distribuição em função de Projetos de Assentamento do INCRA e da distância das principais rodovias (BR-174 e BR-210). *Acta Amazonica INPA Manaus*. vol. 42(2).

BARREDO, J. I., KASANKO, M., MCCORMICK, N. & LAVALLE, C. (2003) Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64, 145-160.

BATISTA, R. Impactos das Ocupações Irregulares em Faixas de Domínio. *Revista de Infraestrutura*, v. 12, n. 3, p. 25-40, 2019.

BATTY, M. & XIE, Y. (1994) From Cells to Cities. *Environment and Planning B: Planning and*

Design, 21, 31-48.

BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. "Urban systems as cellular automata". *Environment and Planning B*, v.24, n.2, p.159-164, March 1997

BATTY, M.; XIE, Y.; SUN, Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, v.23, p. 205-233, 1999.

BATTY, MICHAEL. Building a science of cities - *Cities*, Volume 29, Supplement 1, Pages S9-S16; March 2012.

BATTY, MICHAEL. *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. The MIT press, 2007a.

BATTY, Michael. *Planning support systems: progress, predictions, and speculations on the shape of things to come*. 2007.

BATTY, MICHAEL; XIE, YICHUN; SUN, ZHANLI. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, environment and urban systems*, v. 23, n. 3, p. 205-233, 1994.

BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. *Socio-Economic Planning Science*, v. 8, p. 13-17, 1977.

"Berlin, Heidelberg, pp 3-54

PLATA ROCHA W (2010) Descripción, análisis y simulación del crecimiento urbano mediante tecnologías de la información geográfica. El caso de la Comunidad de Madrid. Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía"

BERTUSSI, G. L.; ELLERY JUNIOR, R. Infraestrutura de transporte e crescimento econômico no Brasil. *Journal of Transport Literature*, v. 6, n. 4, p. 101-132, 2012.

Bonham-Carter, G. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. New York: Pergamon, 1994. 414 p.

BONHAM-CARTER, G. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*.

- Pergamon, New York, 1994, 414 pp. BURROUGH,
- BONTEMPS S, HEROLD M, KOOISTRA L ET AL (2012) Revisiting land cover observation to address the needs of the climate modeling community. *Biogeosciences* 9:2145–2157. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2145-2012>
- BORGES, C. A. R. F.; FERREIRA, L. V. O processo de desflorestamento nas rodovias do estado do Pará: Um estudo de caso da rodovia Transamazônica (BR-230). *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*. Curitiba. 2011. p. 2796, CD- Rom.
- BRANDÃO, Artur Caldas. Princípio da Vizinhança Geodésica no Levantamento Cadastral de Parcelas Territoriais. 2003. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2003. "
- BRASIL (2002) Código Civil Brasileiro. LEI Nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002, Brasília, DF.
- BRASIL (2005) Manual para ordenamento do uso do solo nas faixas de domínio e lindeiras das rodovias federais. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 106p. (IPR. Publ.,712). 1.
- BRASIL (2005a) Instruções de proteção ambiental das faixas de domínio e lindeiras das rodovias federais. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. (IPR. Publ., 713). 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 161p.
- "BRASIL, MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Portaria no 1 de 30 de outubro de 2013. Institui a iniciativa estratégica responsável pela elaboração e proposição do Plano Estratégico de Geoinformações de Transportes - PEGEO. Diário Oficial da União, 31 de outubro de 2013."
- BRASIL. Lei no 12.379 de 6 de Janeiro de 2011. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Viação - SNV. Brasília, Diário Oficial da União, 7 de janeiro de 2011.
- BRIASSOULIS, H. Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches. Lesvos, Greece. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acessado: 20/11/2019.

BUARQUE, S. C. Metodologia e técnicas de construção de cenários. Textos para discussão nº939, p. 71, 2003.

BUARQUE, Sergio C. Metodologia e Técnicas de Construção de Cenários Globais e Regionais. Texto para discussão. No. 939. ISSN 1415-4765. IPEA. Brasília, fevereiro de 2003.

BUENO, M. DO C. Grade estatística: uma abordagem para ampliar o potencial analítico de dados censitários. p. 239, 2014.

BURROUGH, P. Dynamic Modelling And Geocomputation. In: P. Longley, M. Batty and R. McDonnel. Geocomputation: A Primer. London, John Wiley & Sons. 1998

CAMPBELL JB (1983) Mapping the land: aerial imagery for land use information

CARVALHO, G. A. Contribuições metodológicas ao Planejamento Urbano: comparação de métodos de análise multivariada e modelos de mudança da paisagem urbana - aplicações na Regional Pampulha - Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFMG. 2015, 155 p.

CARVALHO, G. Cenários Futuros para Cidades Inteligentes, 1 Edição, Trilha Treinamento e Consultoria, 2019. ISBN 978-65-80750-00-9, São Paulo, 2019.

CECCHINI, A., & VIOLA, F. (1990). Eine Stadtbausimulation. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, 36, 159±162.

CHAN, JONATHAN CHEUNG-WAI; CHAN, KWOK-PING; YEH, ANTHONY GAR-ON. Detecting the nature of change in an urban environment: A comparison of machine learning algorithms. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 67, n. 2, p. 213-225, 2001.

CHU, HONE-JAY; WU, CHEN-FA; LIN, YU-PIN. Incorporating spatial autocorrelation with neural networks in empirical land-use change models. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 40, n. 3, p. 384-404, 2013.

cities. Environment and Planning B, v. 26, p.751-761, 1999. Merlin, P. Méthodes quantitatives et

espace urbain. Paris: Masson et Cie Éditeurs, 1973. 190 p.

CIVCO, Daniel L. Artificial neural networks for land-cover classification and mapping. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 7, n. 2, p. 173-186, 1993.

CLARK LABS. Land Change Modeler for ArcGIS Software Extension (2.0). Worcester, 2017. Disponível em: <<https://clarklabs.org/land-change-modeler-for-arcgis/>>. Acesso em: set. 2017.

CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, v. 24, n. 2, p. 247-261, 1997.

CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, v. 24, n. 2, p. 247-261, 1997.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de Rodovias 2017. Disponível em <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>. Acesso em: 10 jan. 2018.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960. DOI: 10.1177/001316446002000104

COSTA, J. Criação de Cenários de Expansão urbana com recursos a Autômatos Celulares no apoio ao Planejamento e Gestão Territorial: Cabeceiras de Bastos (Norte de Portugal), 2010.126f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográficas e Ordenamento Territorial) – Departamento de Geografia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

COSTA, TALITA STAEL; CARNEIRO, ANDRÉA FLÁVIA; SILVA, RENATA MIRANDA. Uso da ISSO 19.152 e do CITYGML para modelagem do Cadastro 3D. Anais do COBRAC 2016 - Florianópolis –SC – Brasil - UFSC – de 16 a 20 de outubro 2016"

COUCLELIS, H. From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24: (1997). 165-174.

CUTTER, S. L. The vulnerability of science and the science of vulnerability. *Annals of the*

Association of Americans Geographers, Washington, v.93, 2003.

D'ANTONA, A.; DO, M.; DIAS BUENO, C. Human and Physical Dimensions of Land Use/Cover Change In Amazonia: Towards Sustainability View project Atlas do Observatório das Migrações em São Paulo View project. 2016.

DE BENITO, B. Pando; DE PEÑAS, J. Giles. Greenhouses, land use change, and predictive models: MaxEnt and Geomod working together. In: Modelling Environmental Dynamics. Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 297-317.

DE LIMA, Tiago França Melo et al. Modelagem de sistemas baseada em agentes: Alguns conceitos e ferramentas. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 5279-5286.

de SHERBININ, Alex; BALK, Deborah; YAGER, Karina; JAITEH, Malanding; POZZI, Francesca; GIRI Chandra; WANNBO, Antoinette. A CIESIN thematic guide to social science applications of remote sensing. Nova York: Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), 2002.

de SHERBININ, Alex; BALK, Deborah; YAGER, Karina; JAITEH, Malanding; POZZI, Francesca; GIRI Chandra; WANNBO, Antoinette. A CIESIN thematic guide to social science applications of remote sensing. Nova York: Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), 2002.

DIAS T. L., CÂMARA, G., DAVIS JR. , C. A. Modelos espaço-temporais. In: Bancos de dados geográficos. INPE - São José dos Campos ± 2005. Acessado em março de 2013. Disponível em: <http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris%401912/2005/07.01.19.53/doc/cap4.pdf>

DIAS, T. D. L.; OLIVEIRA, M. DA P. G. DE; CÂMARA, G. S. C. Problemas de escala e a relação área - indivíduo em análise espacial de dados. Informática Pública, v. 4, n. 1, p. 89-104, 2001.

DIMURO, Graçaliz P. et al. Modelos de Markov e Aplicações. VI Oficina de Inteligência Artificial, Pelotas: Educat, p. 37-59, 2002.

DNIT (2009) Ordem de serviço DG 0001/2009.

EASTMAN, J. R. IDRISI Selva Manual. Clark University. Sitio web: www.clarklabs.org, 2012.

EBDON, D. A Review of: “Interactive Spatial Data Analysis. By T. C. BAILEY & A. C. GATRELL”. <http://dx.doi.org/10.1080/02693799608902093>, v. 10, n. 4, p. 511–512, jun. 2007.

EICHER, Cory L; BREWER, Cynthia A. Dasymetric mapping and areal interpolation: implementation and evaluation. *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 28, n. 2, p. 125-138, 2001.

ENGELN, Guy et al. Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. *Environmental monitoring and Assessment*, v. 34, n. 2, p. 203-214, 1995.

ERICKSON, D.L. 1995. Rural land use and land cover change. *Land Use Policy*. 12 (3), pp. 223-236

Escobar F, Van Delden H, Hewitt R (2018) LUCC Scenarios. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geo-matic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 81–97

FEITOSA, F. DA F.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Compatibilização de dados censitários para análises temporais com o auxílio de imagens Landsat. XII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 2657–2664, 2005.

FERNANDES, Luiz Gustavo L.; PORTUGAL, Marcelo Savino; NAVAUX, Philippe OA. Previsão de séries de tempo: redes neurais artificiais e modelos estruturais. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, v. 26, n. 2, p. 253-276, 1996.

FERNANDES, R. M. D. S. Deslocamento(s) e impactos sociais (negativos) na zona de fronteira Brasil/Bolívia: considerações acerca do anel rodoviário de Corumbá/MS, uma infraestrutura atinente a rota bioceânica. *Entre-Lugar*, v. 9, n. 17, p. 136–162, 2018.

FIGUEIRA, Cleonis Viater. Modelos de regressão logística. Dissertação de Mestrado . Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

FREITAS, S. R.; HAWBAKER, T. J.; METZGER, J. P. Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 259,

n. 3, p. 410–417, 2010.

FURTADO, Bernardo Alves; VAN DELDEN, Hedwig. Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública. 2011.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICA E APLICADA - IPEA . Acessado em março de 2022.

Disponível em: http://www.ipea.gov.br/sites/000/2/publicacoes/tds/td2_1576_Web.pdf

GABE, M. Flexibilização do perímetro urbano e suas repercussões sobre a expansão urbana: estudo de Lajeado/RS (1984-2016). p. 208, 2017.

GARCÍA-ÁLVAREZ, D.; TERESA, M.; OLMEDO, C. Land Use Cover Datasets and Validation Tools: Validation Practices with QGIS. [s.l: s.n.].

GENARO, N. et al. A neural network-based model for urban noise prediction. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 128, n. 4, p. 1738-1746, 2010.

GENOVEZ, P. C. et al. A ANÁLISE ESPACIAL DA DINÂMICA DE EXCLUSÃO / INCLUSÃO SOCIAL EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP (1991-. p. 1–25, 2003.)

GEOGHEGAN J (1998) “Socializing the Pixel” and Pixelizing the Social” in Land-Use and Land-Cover Change. In: National Research Council (ed) People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science. National Academies Press, pp 51–69

GEOGRAPHICAL SCIENCES COMMITTEE et al. Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements. National Academies Press, 2014.

GERALDO OLIVEIRA, E.; MIZIARA, F.; FERREIRA, M. E. 2015. Fatores determinantes e cenários futuros sobre a expansão da cana-de-açúcar na região de Cerrado no Centro-Oeste Mineiro. Ateliê Geográfico (UFG), v. 9, p. 79-103.

GODET, M; ROUBELAT, F. “Creating the Future: The use and misuse of o scenarios”. In: Long Range Planning. vol. 29, n 2, p.164-171, 1996."

GODOY, M. & SOARES-FILHO, B.S. Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighborhood, Belo Horizonte city, Brazil. In: Paegelow, M. & Camacho, M.T.O. Modelling Environmental Dynamics – advances in geomatic solutions. Springer: Verlag Berlin Heidelberg. 2008. p. 319 -337.

GOODCHILD, Michael F. Research Initiative 1: Accuracy of Spatial Databases. Final Report. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara, 1992.

GRASLAND, C.; MADELIN, M. The Modifiable Areas Unit Problem – Final Report. ESPON - European Spatial Planning Observation Network, 2006.

GREEN, K., KEMPKA, D., AND L. LACKEY. 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 60 (3). Pp. 331-337.

GUTMANN, Myron P.; WITKOWSKI, Kristine; COLYER, Corey; O’ROURKE, JoAnne M.; MCNALLY, James. Providing Spatial Data for Secondary Analysis: Issues and Current Practices Relating to Confidentiality. Population Research and Policy Review, vol. 27, n. 6, p. 639-665, 2008.

GUZMÁN, José Miguel; SCHENSUL, Daniel; ZHANG, Sainan. Understanding Vulnerability and Adaptation Using Census Data. In: MARTINE, George.

HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. International Journey of Geographical Information Science, v 17. n. 3. p. 235-249, 2003.

HARRIS, C. D. e Ullman, E. L. (1945) The nature of cities, Annals, American Academy of Political and Social Sciences, 242: 7-17.

HE, C. et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. Applied Geography, v. 26, n. 3-4, p. 323-345, 2006.

HERMANNNS, Holger. Interactive Markov chains: and the quest for quantified quality. Springer-Verlag, 2002.

HEWITT R, VAN DELDEN H, ESCOBAR F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. Environ Model Softw 52:149-165.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.019>

HOLLER, W. A. Proposta metodológica para a classificação, a análise e o monitoramento das paisagens rurais no município de Caçador (SC), em 2011 e 2014. 2018. 142 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba. Disponível em: < http://www.lactec.org.br/?post_type=menu-capacitacao&p=9545 >. Acesso em: 25 set. 2018.

HOYT, H. 1939. The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. Washington, DC.: Federal Housing Administration.

HSIEH, WILLIAM W. Machine learning methods in the environmental sciences: neural networks and kernels. Cambridge university press, 2009.

IBGE. Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário. Rio de Janeiro: [s.n.].

IBGE. Grade Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>.

IBGE. Grade Estatística: Guia de utilização. Disponível em:<http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 26 out. 2019.

IBISCH, P. L. et al. A global map of roadless areas and their conservation status. Science, [S.L], v. 354, p. 1423-1427, dez. 2016.

ISAAKS, E.; SRIVASTAVA, R. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, 1989."

ISLAM, Md Shahidul; AHMED, Raquib. Land use change prediction in Dhaka city using GIS aided Markov chain modeling. Journal of Life and Earth Science, v. 6, p. 81-89, 2011.

IV, L.; VALENCIA, O. Luis Iván Ortiz Valencia Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo Dissertação submetida ao corpo docente da Faculdade de

Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ , como parte dos requisitos necess. 2008.

JOKAR ARSANJANI J, HELBICH M, BAKILLAH M, HAGENAUER J, ZIPF A (2013) Toward mapping land-use patterns from volunteered geographic information. *Int J Geogr Inf Sci* 27(12):2264–2278. doi:10.1080/13658816.2013.800871

JONES, A.; CLARK, J. Driving forces behind European land use change: an overview. In: The user needs for more harmonized land use information at the national and EU level. Report on the CLAUDE (Coordinating Land Use and Cover Data Analyses in Europe) Workshop. Wageningen: CLAUDE, Concerted Action, EC, 1997. v. DGXII, p. 24-31.2005

JONES, A.; CLARK, J. Driving forces behind European land use change: an overview. In: The user needs for more harmonized land use information at the national and EU level. Report on the CLAUDE (Coordinating Land Use and Cover Data Analyses in Europe) Workshop. Wageningen: CLAUDE, Concerted Action, EC, 1997. v. DGXII, p. 24-31. Lakshmanan,

JULIÃO, R. P. Tecnologias de Informação Geográfica e Ciência Regional - Contributos metodológicos para a definição de modelos de apoio à decisão em desenvolvimento regional. Faculty of Human and Social Sciences, p. 400, 2001.

KAUFMANN, J., STEUDLER, D., Cadastre 2014 – Report of Comission 7 Working Group 7.1 Modern Cadastres. XXI International Congress FIG. England, 1998. "

KAWASHIMA, R. S. et al. Modelagem Dinâmica Espacial como Ferramenta para Simulação de Cenários da Paisagem na Região Portuária da Baixada Santista. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n. 4, 2016.

KUHLMAN, T. Scenarios: Driving forces and policies. In HELMING, K.; PÉREZ-SOBA, M.; TABBUSH, P. (Editors). *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Springer, Berlin. p. 131 -157, 2008.

LACERDA REZENDE, M.; PHILLIPE DE FERNANDES, L. S.; MARCOS RODRIGUES SILVA, A. UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE FATORIAL PARA DETERMINAR O POTENCIAL

DE CRESCIMENTO ECONONÔMICO EM UMA REGIÃO DO SUDESTE DO BRASIL Revista
Economia e Desenvolvimento. [s.l: s.n.]. Disponível em:
<<http://w3.ufsm.br/depcie/arquivos/artigo/5artigomarcelo.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2021.

LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.; MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C. & XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths, *Global Environmental Change*, v.11, p. 261-269, 2001.

LETA, M. K.; DEMISSIE, T. A.; TRÄNCKNER, J. Modeling and prediction of land use land cover change dynamics based on land change modeler (Lcm) in nashe watershed, upper blue Nile basin, Ethiopia. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 7, 1 abr. 2021.

LÉVY, P. 1998. *Cyberculture*. Odile Jacob, France,

LI, S.H.; JIN, B.X.; WEI, X.Y.; JIANG, Y.Y.; WANG, J.L. Using CA-Markov model to model the spatiotemporal change of land use/cover in fuxian lake for decision support. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015, 2, 163–168. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

LI, WEIDONG; ZHANG, CHUANRONG. Linear interpolation and joint model fitting of experimental transiograms for Markov chain simulation of categorical spatial variables. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 24, n. 6, p. 821-839, 2010.

LI, X. & YEH, A. (2002) Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16, 323–343.

LI, X., YANG, Q. & LIU, X. (2008) Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 86, 177-186.

LIU, WEIGUO; SETO, KAREN C. Using the ART-MMAP neural network to model and predict urban growth: a spatiotemporal data mining approach. *ENVIRONMENT AND PLANNING B PLANNING AND DESIGN*, v. 35, n. 2, p. 296, 2008.

LIU, Y. Modelling Urban Development with GIS and Cellular Automata, Boca Raton, CRC Press.2009

MACROPLAN – PROSPECTIVA E ESTRATÉGIA. Construção de cenários e prospecção de futuros – material didático para treinamento. Rio de Janeiro: julho de 1996, mimeo.

MAGDALENO, F. S. O território nas constituições republicanas brasileiras. *Investigaciones Geográficas*, n. 57, p. 114-132, 2005.

MANAKOS I, BRAUN M (2014) Land use and land cover mapping in Europe. In: Practices and trends. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London

MARAFON, M. A. et al. 4a ENACOR-ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA Belo Horizonte-MG-BRASIL-25 a 28 de agosto de 2009 Centro de Convenções Minascentro-Entrada pela Rua Guajajaras GESTÃO DA FAIXA DE DOMÍNIO NO DNIT. [s.l: s.n.].

MARAFON, M. A. et al. 4a ENACOR-ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA Belo Horizonte-MG-BRASIL-25 a 28 de agosto de 2009 Centro de Convenções Minascentro-Entrada pela Rua Guajajaras GESTÃO DA FAIXA DE DOMÍNIO NO DNIT. [s.l: s.n.].

MARAFON, M. A.; VAREJÃO, L. C. S. Gestão da faixa de domínio pelo DNIT. In: 14º Encontro Nacional de Conservação Viária, 2009, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 2009.

MARICATO, E. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: Vozes, 2011. 219 p.

MARTINS, Clitia Helena Backx. Pobreza, meio ambiente e qualidade de vida: indicadores para o desenvolvimento humano sustentável. *Indicadores Econômicos FEE*, Porto Alegre, v. 30, n. 3, p. 171-188, dez. 2002.

MAS, J., KOLB, M., PAEGELOW, M., CAMACHO OLMEDO, M. T., AND HOUET, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages.

Environmental Modelling & Software, 51:94–111. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>.

MASSABKI, J. A. R. et al. Modelagem dos padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo baseada em Autômatos Celulares. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 9, n. suppl 1, p. 361–371, 2017.

MEIRELLES M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Editores Técnicos) *Geomática. Modelos e Aplicações Ambientais*. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília. D. F. Brasil, 2007. Cap. 10, p. 497-528."

"MENESES, B. M.; REIS, E.; VALE, M. J.; REIS, R. Modelling Land Use And Land Cover Changes In Portugal: A Multi-Scale and Multi-Temporal Approach. *Rev. Finisterra*. LIII(107), 2018, pp. 3-26."

MENNIS, J. Generating Surface Models of Population Using Dasymetric Mapping. *Professional Geographer*, v. 55, n. 1, p. 31-42, 2003.

MISHRA, Varun Narayan; RAI, Praveen Kumar; MOHAN, Kshitij. Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*, v. 64, n. 1, p. 111-127, 2014.

MISHRA, Varun Narayan; RAI, Praveen Kumar; MOHAN, Kshitij. Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*, v. 64, n. 1, p. 111-127, 2014.

MOUW, Ted. Visions of The Future: New Directions in Population Research. In: *POPULATION ASSOCIATION OF AMERICA ANNUAL MEETING*, Los Angeles, USA, 2000.

MUSTERD, S. et al. Socioeconomic segregation in European capital cities. Increasing separation between poor and rich. *Urban Geography*, v. 38, n. 7, p. 1062–1083, 2017.

NAGABHATLA, Nidhi; FINLAYSON, C. Max; SELLAMUTTU, Sonali Seneratna. Assessment and change analyses (1987-2002) for tropical wetland ecosystem using earth observation and socioeconomic data. *Eur. J. Rem. Sens*, v. 45, p. 215-232, 2012.

NATIONAL INSTITUTE OF CHILD HEALTH AND HUMAN DEVELOPMENT - NICHD. Goals and Opportunities: 2002-2006, 2002. Disponível em: <https://www.nichd.nih.gov/publications/pubs/dbsb_goals_02to06.cfm>. Acesso em: 12 mai. 2022.

NOBREGA, R. A. A. O Papel das Infraestruturas Ferroviárias nas Mudanças de Uso e Cobertura do O Papel das Infraestruturas Ferroviárias nas Mudanças de Uso e Cobertura do Solo no MATOPIBA The Role of Railway Infrastructures in Land Use and Cover Change in MATOPIBA , Brazil. n. December, 2019.

NOLAN, B.; SALVERDA, W.;CHECCHI, D.; MARX, I. Changing inequalities and societal impacts in rich countries; thirty countries' experiences. (Abigail McKnight, Istvan György Tóth, & Herman Van De Werfhorst, Eds.). Oxford: Oxford University Press.; 2014

O'SULLIVAN, David; TORRENS, Paul M. Cellular models of urban systems. In: Theory and Practical Issues on Cellular Automata. Springer London, 2001. p. 108-116.

OLIVEIRA, S. L. DE. FAIXAS DE DOMÍNIO DAS RODOVIAS: ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS DA DESTINAÇÃO/OCUPAÇÃO. Goiânia - Goiás: 2009

Oxley T, Jeffrey P, Lemon M (2002) Policy Relevant Modelling: Relationships Between Water, Land Use, and Farmer Decision Processes. Integr Assess 3:30–49. <https://doi.org/10.1076/iaij.3.1.30.7413>

PAEGELOW, M.; CAMACHO OLMEDO, M. T. Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling: a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). International Journal of Geographical Information Science, v. 19, n. 6, p. 697-722, 2005.

PAIVA, C. MODELOS TRADICIONAIS TRANSPORTE E TRÁFEGO. ANTP.210 Disponível em <https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/modelos_tradicionais.pdf>. Acessado em: 20/11/2019

PARK, Robert; BURGESS, Ernest W.; MCKENZIE, Roderick D. The City. Chicago: University of Chicago Press, 1925.

PARKER, D. C. et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use e land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 93, n. 2, p. 314-337, 2003.

PEDROSA, B. M. & CÂMARA, G.. Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento. In: DRUCK, S.; CÂMARA G.; MONTEIRO, A. M.; CARVALHO, M. S. (ed). *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília, EMBRAPA, 2004.

PÉREZ-VEGA, Azucena; MAS, Jean-François; LIGMANN-ZIELINSKA, Arika. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, v. 29, n. 1, p. 11-23, 2012.

PERRATON, J.; BAXTER, R. Models, evaluations & information systems for planners. Lancaster: MTP Construction, 1974. 305 p.

Perraton, J.; Baxter, R. Models, evaluations & information systems for planners. Lancaster: MTP Construction, 1974. 305 p.

PETERNELLI, LUIZ ALEXANDRE. Regressão Linear e Correlações - Cap 09. 2007. Acessado em 31/12/2019. Disponível em: <http://www.dpi.ufv.br/~peternelli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>

PHIPPS, M. Dynamical behaviour of cellular automata under constraints of neighbourhood coherence. *Geographical Analysis*, v. 21, p. 197-215, 1989.

PLUMEJEAUD, C. ; PRUD'HOMME, J. ; DAVOINE, P.-A. ; GENSEL, J. Transferring Indicators into Different Partitions of Geographic Space. In: TANIAR, D.; GERVASI, O.; MURGANTE, B.

PARDEDE,E.; APDUHAN, B. O. (eds.) ICCSA'10 Proceedings of the 2010 international conference on Computational Science and Its Applications - Volume Part I. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.

PONTIUS JR, Robert Gilmore et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *The Annals of Regional Science*, v. 42, n. 1, p. 11-37, 2008.

PONTIUS, R. G. J.; CHEN, H. GEOMOD Modeling. Land-use and cover change modeling. Note on GEOMOD modeling available within IDRISI Andes package. 2006.

PORTUGALI, J.; BENENSON, I.; OMER, I. Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city. *Environment and Planning B*, v. 24, n. 2, p. 263- 285, 1997.

PRADO, L.; MIZIARA, F.; FERREIRA, M. E. 2012. Expansão da Fronteira Agrícola e Mudanças no Uso do Solo na Região Sul de Goiás: ação antrópica e características naturais do espaço. *Boletim Goiano de Geografia (Impresso)*, v. 32, p. 1-15.

PRF - BOLETIM ESTATÍSTICO [da] Polícia Rodoviária Federal. Goiânia, 2018. p. 20"

RAITZ, K. (1998) American Roads, Roadside America. *The Geographical Review*, Vol 88, p. 363-387.SAHA,

RIBEIRO, O. (1997) Portugal, o Mediterrâneo e o Atlântico, Lisboa, Livraria Sá da Costa Editora.

ROCHA, F. J.P. S.P. Sistemas Complexos, Modelação e Geosimulação da Evolução de Padrões de Uso e Ocupação do Solo, Doutorado em Geografia, Ciências da Informação Geográfica, 2012.

ROCHA, M. M. Modelagem da Dispersão de Vetores Biológicos com emprego da Estatística Espacial.93f. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia- IME, Rio de Janeiro, 2004.

Salverda, W., Nolan, B., Checchi, D., Marx, I., McKnight, A., György Tóth, I., and Van de Werfhorst, H., editors, 2014, *Changing Inequalities in Rich Countries; Analytical and Comparative Perspectives*. Oxford: Oxford University Press.

SANTOS, É. P. dos; PIROLI, E. L. Detecção de mudanças no uso e cobertura da terra utilizando Land Change Modeler: o caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Rebojo, Pontal do Paranapanema, SP,Brasil. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE."

SANTOS, M. (1997) *A natureza do espaço*. 2ª ed. São Paulo: Hucitec.

SCHUURMAN, NADINE; LESZCZYBSKI, AGNIESZKA; FIEDLER, ROB; GRUND, DARRIN; BELL, Nathaniel. Building an Integrated Cadastral Fabric for Higher Resolution Socioeconomic Spatial Data Analysis. In: RIEDL, Andreas; KAINZ, Wolfgang; ELMES, Gregory A. (Ed.). *Progress in Spatial Data Handling: 12th International Symposium on Spatial Data Handling*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.

SILVA, C. N. Política de ordenamento do território e de urbanismo. Apogeo: revista da Associação de Professores de Geografia, n. 21, p. 31-51, 2001"

SILVA, M. L. A.; ROJAS, S. R. S. Índice de vulnerabilidade social (IVS) das regiões metropolitanas de Belém-PA (RMB) e Manaus-am (RMM). Econ. e Desenv., Santa Maria, v. 33, e1, 2021. DOI 10.5902/1414650961963. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1414650961963>. Acesso em: 07/08/2022"

SKOLE, D. L. Data on global land-cover change: Acquisition, assessment, and analysis. In: Meyer, W. B.; Turner, B. L. II. Ed. Changes in land use and land cover: a global perspective. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. p. 437-471. SOBREIRA, SONG, W., & DENG, X. (2017). Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. Science of the Total Environment, 576, 705-719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.078>

SOUTHWORTH, J.; MARSIK, M.; QIU, Y.; PERZ, S.; CUMMING, G. S.; STEVENS, F.; ROCHA, K.; DUCHELLE, A.; BARNES, G. 2011. Roads as drivers of change: Trajectories across the Tri-National Frontier in MAP, the Southwestern Amazon. Remote Sensing 3: 1047-1066

SPELLERBERG, I.F. Ecological effects of roads and traffic: a literature review. Global Ecology And Biogeography, v.7, 1998; 333p

STRAND GH (2013) The Norwegian area frame survey of land cover and outfield land resources. Nor Geogr Tidsskr 67:24–35. <https://doi.org/10.1080/00291951.2012.760001>
Subedi, P.; Subedi, K.; Thapa, B. Application of a hybrid cellular automaton–Markov (CA–Markov) Model in land-use change prediction: A case study of saddle creek drainage Basin, Florida. Appl. Ecol. Environ. Sci. 2013, 1, 126–132. [CrossRef]

Szantoi Z, Geller GN, Tsendbazar NE et al (2020) Addressing the need for improved land cover map products for policy support. Environ Sci Policy 112:28–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.005>

TARSI, E. As lógicas da exclusão urbana no contexto português : uma perspectiva Sul-NorteUrban

exclusion rationales in Portugal : a South-North perspective. Forum Sociológico, n. 29, 2016.

TASSER, E.; LEITINGER, G.; TAPPEINER, U. Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes more? Land Use Policy 2017, 60, 60–72. [CrossRef]

TASSER, E.; LEITINGER, G.; TAPPEINER, U. Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes more? Land Use Policy 2017, 60, 60–72. [CrossRef]

Teague, P. & Wilson, R. (1995). Towards an inclusive society. In Social exclusion, Social inclusion. Report N° 2 (pp. 79-97). Belfast, uk: Democratic Dialog. Acesso: 12/12/2019 <https://www.redalyc.org/jatsRepo/196/19654017005/html/index.html>

Thackway R, Lymburner L, Guerschman JP (2013) Dynamic land cover information: Bridging the gap between remote sensing and natural resource management. Ecol Soc 18. <https://doi.org/10.5751/ES-05229-180102>

THEOBALD, D. M. Estimating natural landscape changes from 1992 to 2030 in the conterminous US. Landscape Ecology, v. 25, p. 999-1011. 2010.

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

TOBLER, W. (1979) Cellular Geography. IN GALE, S. & OLSSON, G. (Eds.) Philosophy and Geography. Dordrecht, D.Reidel Publishing Company

TOMMASELLI, J. D. G. Gestão do território: energia e meio ambiente. São Paulo: Ed. UNESP, 2012. 83 p

TONG, S.T.Y.; SUN, Y.; YANG, Y.J. Generating a future land-use change scenario : A case study of the Little Miami River Watershed, Ohio. J. Environ. Inform. 2012, 19, 108–119. [Google Scholar]

TORO BALBOTIN D (2014) Analyse de la détérioration de la forêt de la cordillère de la Costa dans le sud chilien: géomatique et modélisation prospective appliquée sur une forêt patrimoniale de la province d'Osorno (41° 15' - 41° 00' latitude Sud). Université Toulouse 2 Le Mirail. Laboratoire

GEODE

TROMBULAK, S; C.; FRISSELL, C. A. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, [S.L], v. 14, n. 1, p. 18-30, fev. 2000

UMBELINO, G. J. DE M. Simulações de distribuição espacial domiciliar e projeções demográficas intraurbanas com apoio de geotecnologias. Tese de Doutorado, p. 1–215, 2012.

UMBELINO, G.; BARBIERI, A. Metodologia para a compatibilização de setores censitários e perímetros urbanos entre os censos de 1991, 2000 e 2010. XVI Encontro Nacional De Estudos Populacionais, 2008.

VALENCIA, L. I. O. Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 15 de dezembro de 2008.

VAN BELLEN, Hans Michael. Indicadores de Sustentabilidade: Uma análise comparativa. Santa Catarina, 2002. XVII, 235p. 29,7cm. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

VAN DER HEIJDEN, K. Scenarios – the art of strategic conversation. Chichester, Nova York, Brisbane, Toronto, Singapura: John Wiley & Sons, 1996.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L. O. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological modelling*, v. 91, n. 1, p. 231-248, 1996.

Verburg PH, Tabeau A, Hatna E (2013) Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: A study for land use in Europe. *J Environ Manage* 127:S132–S144. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.038>

VERBURG, P. H. et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Applied Geography*. v. 26 (2006) 153–173, 2006. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0143622805000536/1-s2.0-S0143622805000536-main.pdf?_tid=1494b6e8-6655-11e6-

ae4a-00000aab0f26&acdnt=1471642808_d4e0fe54158ff69e4dbc01fbcbb26cb9>. Acesso em: 02 abr. 2022.

WANG, Jida; MOUNTRAKIS, Giorgos. Developing a multi-network urbanization model: A case study of urban growth in Denver, Colorado. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 25, n. 2, p. 229-253, 2011.

WHITE, R. ENGELEN, G., “Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns”, *Environment and Planning A*, Vol.25, pp. 1175-1199, 1993

WHITE, R. & ENGELEN, G. (1993) Cellular Automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25, 1175-1199.

WHITE, R. et al. Developing an urban land use simulator for European cities. *Proceedings of the Fifth EC GIS Workshop: GIS of Tomorrow*, p. 179–190, 2000.

WHITE, R.; ENGELEN, G., “Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns”, *Environment and Planning A*, Vol.25, pp. 1175-1199, 1993

WU, F. & WEBSTER, C. J. Simulation of Natural Land Use Zoning Under Free-Market and Incremental Development Control Regimes. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22, 241-256. 1998

XIMENES, A. de C. et al. Modelagem Dinâmica do desmatamento na Amazônia. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 14, n. 3, p. 370-391, 2008.

Yang, X., & Lo, C. (2002). Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*, 23(9), 1775–1798.

YULIANTO, F; PRASASTI, I; PASARIBU, J. M; FITRIANA, H. L; ZYLSHAL; HARYANI, N. S.

SOFAN, P. The dynamics of land use/land cover change modeling and their implication for the flood damage assessment in the Tondano watershed, North Sulawesi, Indonesia. *Model. Earth Syst. Environ.* (2016) 2: 47. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0100-3>."

APÊNDICES

Apêndice A

- A.1 - Análise Exploratória de Dados BR-408
- A.2 - Artigo Científico Publicado em Periódico
- A.3 - Modelo LCM da BR-408

Apêndice B

- B.1 - Análise Exploratória de Dados BR-104
- B.2 - Modelo LCM da BR-104

Apêndice C

- C.1 - Análise Exploratória de Dados BR-101
- C.2 - Modelo LCM da BR-101
- C.3 – Vídeo de Simulação

Apêndice A

A.1 - Análise Exploratória de Dados BR-408

ErisonBarros /
BR-408-Highway-Domain-Database

🔍

🔒

⌵

📁

👤

<> Code 1 Issues 1 Pull requests Actions Projects Wiki Security Insights Settings

👁

❤

🔗

☆

The data set describes the census data of the years 2000 and 2010 , as well as the geospatial data of the limits of the census sectors and the irregular occupations on the domain range of the year 2018 , referring to the BR-Legal program in the state of Pernambuco that is carrying out the Inventory and Monitoring of the Domain Range - IMFD, with...

☆ 0 stars 🔗 0 forks 👁 0 watching 🌿 Branches 🏠 Activity 🏷 Tags

🌐 Public repository · Generated from [decartlabat/site](#)

🔑

Your gh-pages1 branch isn't protected
Protect this branch from force pushing or deletion, or require status checks before merging. [View documentation.](#)

Protect this branch

Dismiss

🔑 gh-pages1 4 Branches 0 Tags 🔑 🏷

🔍 Go to file

📄 Go to file

+

Add file ⌵

Code

⋮

👤 ErisonBarros

Update README.md

59eeb44 · 2 years ago

🕒

📁 .github	Initial commit	4 years ago
📁 Videos	VIDEOS	3 years ago
📁 rsconnect/documents/README.md/rpub...	Initial commit	4 years ago
📄 Analise_Exploratória_dos_Dados_Socioec...	Criado usando o Colaboratory	3 years ago
📄 Dados	Create Dados	4 years ago
📄 Dataset_BR_408_Highway_Domain_Datab...	Criado usando o Colaboratory	4 years ago
📄 Gride da Área de Influenzia2.cpg	GRIDE DA ÁREA DE INFLUENCIA	4 years ago
📄 Gride da Área de Influenzia2.dbf	GRIDE DA ÁREA DE INFLUENCIA	4 years ago
📄 Gride da Área de Influenzia2.prj	GRIDE DA ÁREA DE INFLUENCIA	4 years ago
📄 Gride da Área de Influenzia2.shp	GRIDE DA ÁREA DE INFLUENCIA	4 years ago
📄 Gride da Área de Influenzia2.shx	GRIDE DA ÁREA DE INFLUENCIA	4 years ago
📄 Ocup_BR104.csv	Add files via upload	3 years ago
📄 README.html	Initial commit	4 years ago
📄 README.ipynb	Criado usando o Colaboratory	4 years ago
📄 README.md	Update README.md	2 years ago
📄 Relationships between drivers of change ...	Added Relationships between drivers of change ...	4 years ago
📄 Simulação Por RN.png	Add files via upload	4 years ago
📄 _config.yml	Initial commit	4 years ago
📄 grid_estatistico.csv	Add files via upload	4 years ago
📄 output_file relatorio.html	Relatório incluindo VTN	3 years ago

TIME-SPACE MODELING OF IRREGULAR OCCUPATIONS AROUND BRAZILIAN HIGHWAYS, BASED ON STATIC GRIDS: CASE STUDY BR-408

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Center for Technology and Geosciences - CTG

Graduate Program in Civil Engineering

Collaborators:

Erison Rosa de Oliveira Barros (UFPE) <https://orcid.org/0000-0003-4879-6880>

Maurício de O. Andrade (UFPE) <https://orcid.org/0000-0002-7377-7668>

Fernando Lourenço de Souza Júnior (UFPE) <https://orcid.org/0000-0002-6000-149X>

PUBLICATION

[PUBLICATION](#)

[Time-space modeling of irregular occupations around Brazilian highways, based on static grids: Case study of BR-408](#)

SUMMARY

Obtaining information about the conditions of the right-of-ways on Brazilian highways represents a primary need in preventing irregular occupations on them. In order to minimize the risks associated with irregular occupation on the right-of-ways, resulting from anthropic processes related to land use and coverage, it is necessary to monitor the areas close to the highways. In this sense, mathematical models based on cellular automata can help to understand the impact of changes in land use and / or coverage and to predict future changes in the margins of highways. The study area comprises the BR-408 highway, located in the forest area of the state of Pernambuco, and aims to assess the urban growth of areas that are crossed by highways, generating an annual land cover scenario for the 10-year period. The modeling carried out in this research used land cover maps from the years 2000 and 2010, obtained through the Mapbiomas Project as input. Eight variables were used to explain the changes in land cover on the margins of Highway BR-408. For the calibration of the Model, the Artificial Neural Network and Logistic Regression method was used. The model was validated by the Kappa concordance test. The results show that the generated scenario presents an increase of 0.50% for the class "Irregular Occupation over the Right-of-Way", in the period of 10 years. This increase has the contribution of cells that were in the initial stage as class Forest / Non-Forest Formation, Agriculture and non-vegetated area. The results of the modeling point to the growth of occupations in the peripheral areas of the cities cut by the highway under study, showing a spatial segregation.

Keywords: Right-of-ways, Irregular Occupation, Dynamic Models.

Right-of-ways Irregular Occupation Dynamic Models.

Data in Brief

To access the data summary of the search it is necessary to access the link: <https://data.mendeley.com/datasets/3bsrvrddgm/draft?a=c1f0ff3f-ecd4-4f34-bff3-3e8c08b23a13>

Dataset

This repository is for the summary data article entitled "MODEL TEMPORAL SPACE OF IRREGULAR OCCUPATIONS IN THE BRAZILIAN ROAD SURROUND: BR-408 CASE STUDY" and can be found at Link . The data set describes the census data of the years 2000 and 2010 , as well as the geospatial data of the limits of the census sectors and the irregular occupations on the BR-408 domain range in the 2018 stretch between Recife and Timbaúba , referring to the BR-Legal program in the state of Pernambuco that is carrying out the Inventory and Monitoring of the Domain Range - IMFD, with the objective of Monitoring Automation through CAD and geoprocessing software (QGIS) and high-resolution imaging.

- [Dataset](#)

Highlight:

1. [Exploratory Analysis of Socioeconomic and Infrastructure Variables](#)
2. [MapBiomas Extracted and Normalized Land Use/Cover Layers.](#)
3. [Processing of the layers by the Qgis "Molusce" Plugin](#)

BIBLIOGRAPHIC REVIEW

Object	Country	Author(s)
Dynamics of land use and occupation	Canada; Australia; Japan	(Moreno & Marceau, 2007); (Lau and Kam, 2005); (Arai & Akiyama, 2004)
Urban growth in rural areas	China, USA	(Yeh & Li, 2000); (White e Engelen,1993)
Sub-urbanization of cities	Australia	(Ward et al., 2000)
Urbanization of cities	Latin American Cities	(Barredo et al., 2003); (Torrens, 2006)
Urban Systems Modeling	Netherlands	(White & Engelen, 2000)
Diffuse urban growth	Italia	(Besussi et al., 1998)
Spreading epidemics	Brazil	(Melotti, 2009); (Sasso et al., 2004)
Deforestation in the Amazon	Brazil	(Ximenes et al., 2008); (Soares Filho et al., 2003)
Dynamics of land use change in agricultural areas	Brazil	(Macedo et al., 2013); (Kamusoko, Courage et al., 2009)
Traffic and transport simulation	Brazil	(Lima, 2007); (Sun et al., 2012)
Dynamics of land use change in agricultural areas	Brazil, USA, Malasia	(Couclelis, 1997); (Batty et al, 1999); (Burrough, 1998); (Roy, 1996); (Engele, 1995); (Câmara, 1996; (Almeida et al, 2003); (Memarian et al, 2012), (Fuglsang et al, 2013; Almeida et al, 2003); (Mitsova et al, 2011); (Onsted & Chowdhury, 2014); (Pires e Polidori, 2009); (Verstegen et al., 2014)
Modeling of urban perimeter expansion in metropolitan regions	Brazil, Portugal	White Engelen, 1997; Umbelino, 2012, Furtado & Van Delden, 2011; Costa, 2010
Fire spread	Brazil	Soares-Filho et al. (2002)
Population, space and environment studies	Brazil	(Umbelino & Barbieri, 2010)
Urban sprawl	USA, China	Batty & Xie (1994); Clarke & Gaydos (1998); Wu (2002)

Link: <https://1drv.ms/x/s!AjO4oAHV5BZui8Q9CqisBGA2Yaj1Yq?e=tpiq5e>

Processing:

1. [Geoda Exploratory Analysis](#)
2. [Dataset Postgres](#)
3. [Results Found in the Qgis "Molusce" Plugin](#)



Releases

No releases published

[Create a new release](#)

Sponsor this project

Packages

No packages published

[Publish your first package](#)

Deployments 26

✓ github-pages 2 years ago

[25 deployments](#)

📖 README



Languages

● HTML 88.7% ● Jupyter Notebook 11.3%

Suggested workflows

Based on your tech stack



SLSA Generic generator

Generate SLSA3 provenance for your existing release workflows

Configure



Jekyll using Docker image

Package a Jekyll site using the jekyll/builder Docker image.

Configure

[More workflows](#)

Dismiss suggestions

Apêndice A

A.2 - Artigo Científico Publicado em Periódico



Time-space modeling of irregular occupations around Brazilian highways, based on static grids: Case study of BR-408

Erison Rosa de Oliveira Barros^{a,1,2}, Maurício Oliveira de Andrade^{a,3,4},
Fernando Lourenço de Souza Júnior^{b,5,6}

^a Universidade Federal de Pernambuco Graduate Program in Civil Engineering (Poscivil), Brazil

^b Diagonal Empreendimentos E Gestão De Negócios Ltda, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Right-of-ways
Irregular Occupation
Dynamic Models

ABSTRACT

Obtaining information about the conditions of the right-of-ways on Brazilian highways represents a primary need in preventing irregular occupations on them. In order to minimize the risks associated with irregular occupation on the right-of-ways, resulting from anthropic processes related to land use and coverage, it is necessary to monitor the areas close to the highways. In this sense, mathematical models based on cellular automata can help to understand the impact of changes in land use and/or coverage and to predict future changes in the margins of highways. The study area comprises the BR-408 highway, located in the forest area of the state of Pernambuco, and aims to assess the urban growth of areas that are crossed by highways, generating an annual land cover scenario for the 10-year period. The modeling carried out in this research used land cover maps from the years 2000 and 2010, obtained through the Mapbiomas Project as input. Eight variables were used to explain the changes in land cover on the margins of Highway BR-408. For the calibration of the Model, the Artificial Neural Network and Logistic Regression method was used. The model was validated by the Kappa concordance test. The results show that the generated scenario presents an increase of 0.50% for the class "Irregular Occupation over the Right-of-Way", in the period of 10 years. This increase has the contribution of cells that were in the initial stage as class Forest/Non-Forest Formation, Agriculture and non-vegetated area. The results of the modeling point to the growth of occupations in the peripheral areas of the cities cut by the highway under study, showing a spatial segregation.

1. Introduction

Roads are the predominant transportation mode in Brazil (Wolff and Caldas, 2018). Its road network comprises 1,720,756 km, of which only 211,468 km are paved (Cnt - Pesquisa de Rodovias, 2021). However, a significant part of this infrastructure lacks adequate maintenance and management (Ghisolfi et al., 2019), among which are the right-of-ways (Batista, 2016). These land strips represent safety spaces, reserved so that the passersby around do not interact with the highway, as well as so

that the highway does not interfere with the activities of residents or bordering users (Oliveira, 2018). The Brazilian Traffic Code (CTB) establishes traffic safety conditions as a principle that must be guaranteed and that the use of right-of-ways must be controlled. It is the responsibility of the Federal Highway Police (PRF) to control unauthorized buildings or occupations in these spaces (CTB, 2000).

However, for decades, right-of-ways throughout the nation in diverse contexts and situations have been the subject of irregular occupations, for housing or activities as the provision of services. To a certain extent,

Abbreviations: IPEA, Institute for Applied Economic Research; CTB, Brazilian Traffic Code; DNIT, National Department of Transport Infrastructure.

E-mail addresses: erison.barros@ufpe.br (E.R. de Oliveira Barros), mauricio.andrade@ufpe.br (M. Oliveira de Andrade), nando.cartog@gmail.com (F.L. de Souza Júnior).

¹ Endereço: Rua João Paulo Correia Filho, n° 20 Centro Paudalho-PE, Brasil. CEP: 55825-000

² <https://orcid.org/0000-0003-4879-6880>

³ Rua Isaac Salazar, 189 apt 1101. Tamarineira Recife PE, CEP: 52050-160

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-7377-7668>

⁵ Endereço: Rua Elízio Anselmo da Costa, 57, bairro: Areeiro, cidade: Camaragibe, UF: PE, Brasil; CEP 54762-460

⁶ <https://orcid.org/0000-0002-6000-149X>

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105971>

Received 19 January 2021; Received in revised form 5 December 2021; Accepted 28 December 2021

0264-8377/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

this fact stems from the characteristics inherent to the road infrastructure, which represents a factor that induces development and conditions the process of land use and occupation in its surroundings. In addition, deficient inspection makes it difficult for the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) to exert effectively its police power. As a consequence, these occupations often consolidate and grow as informal settlements (Batista, 2019).

Highways, as a means of connecting and integrating urban networks, exert a significant influence on the transformation of the territories and directly cause changes in the landscape. Additionally, changes in structuring and expanding cities also impose socioeconomic and environmental impacts (Bertussi and Ellery Junior, 2012; Campeão, 2017). As representing an infrastructure that enables mobility, it provides an expansion of the agricultural frontier, as well as functioning as an indicator of anthropic pressure on its margins and surroundings. Housing needs and attractiveness due to the proximity of major flow axes generate pressure for occupations in areas with good accessibility (Prado et al., 2012). Accordingly, Raitz (1998) states roadsides occupations have been growing as private spaces because road travelers have been increasingly demanding services provided at the road's edge. This type of land-use characterizes an unstable contradiction between a zone under road regulation and the informality of the countryside.

This context of informal urban settlements around roads remains a relatively long-studied topic (Humphrey and Sell, 1975; Lichter and Fuguitt, 1980; Voss, 2007). In Brazil, Chein (2006) explored the relationship between the Belém-Teresina highway and the paving of the Cuiabá-Porto Velho highway with the formation of new urban agglomerations from migratory flows. Soares-Filho, (Soares-Filho et al., 1998, 2001, 2004, 2006, 2019), developed dynamic simulation models to support the development of scenarios for road corridors in the Brazilian Amazon, aiming to understand the dynamics of the irregular occupation of the right-of-ways from the perspective of territorial pressures.

In sociopolitical terms, irregular land occupations have been explained by authors as Trotsky (1932), Wolfe (1995); Sen (1984), and Desai (1995) among others. For them, capitalism generates development on the global, national and local scales over time; however, this development is inevitably socially and spatially uneven. According to Romeiro (2012), some socio-economic benefits or losses affect some social groups due to their location in space and to interrelationships between characteristics as urban infrastructure, neighborhood, services supply, and internal and external interactions. Additionally, KOGA (2001) highlights the territorial character of social exclusion, emphasizing the need for territorial measures to aid impoverished families to access housing opportunities.

From a sociological perspective of informal occupations, the physical proximity between socioeconomically diverse populations has been shown contradictory by several authors (MASSEY and Denton, 1993; Small, 2001; Newman, 2001; Simmel, 1983; Bidou-Zachariassen, 1996; Kazzman, 2001a,b). Simmel (1983) interprets the contact of these different populations as a factor of conflict. In opposition, other authors consider proximity as a source of social capital for the less privileged, as opposed to socially more perverse situations as social isolation (Bidou-Zachariassen, 1996; Kazzman, 2001a, b). The perspectives of these authors show the contradictions between the need to occupy attractive areas that are empty by those who require social proximity for their survival and the social, legal, and environmental conflicts generated.

The existence of disparate socio-spatial segregation patterns highlights the territory as a relevant factor in the production and dissemination of social inequalities. This finding justifies the increasing demand for more detailed and geographically disaggregated information. Furthermore, the challenge is to go beyond the simple spatialization of indexes for diagnosis rather than discovering not only where, but how strategically act (Genovez, 2002). For Valencia (2008), ordinarily, changes in land use do not happen by chance in a region. They are

dynamic and can be determined by two types of drivers: Socioeconomic and Biophysical. According to Kuhlman (2008), these factors of change act on local, regional and global scales. They are classified in terms of the simulation period in Dynamic change drivers and Stable change drivers.

In several contexts, land use has been a research object of social scientists in the areas of economics, geography, anthropology, and urban planning, among others. In these studies, the terms land use and land occupation/coverage are not exactly synonymous. For Rocha (2012), land occupation is linked to the spatial identification of qualitative physical aspects, as topographic, agricultural, and geological properties of the earth's surface, classifying by its usefulness. The term land cover, for the natural sciences, denotes its physical state, involving the amount and type of surface of vegetation, water, and soil. Land use, according to Turner and Meyer (1994) represents the destination given to the land, when identified a certain value in a territorial space.

For conceptual and methodological support to the present study, several applications of models analyzing changes in land use and soil occupation/coverage were reviewed in the literature, as shown in Table 1.

Various systems and models of land-use dynamics were identified in the literature, some of which are: the Urban Growth Model UGM / SELEUTH, focused on urban land-use change, RamCO, LOV, MODULUS, SIMLUCIA, CLUE, and CLUES, focused on any type of land-use change. It is also worth mentioning the Land Change Modeler (LCM) module of the IDRISI software and DINAMICA EGO ©. Some of these computational models are based on Automata Cell Phones (AC) (SUAREZ, 2013).

Facing the exposed arguments, the research question focuses on how to identify whether the physical proximity/distance of certain social groups and economic activities can be related to the dynamics of

Table 1
Literature Review on land cover changes by geosciences methods.

Object	Country	Author (s)
Dynamics of land use and occupation	Canada; Australia; Japan	(Moreno & Marceau, 2007); (Lau and Kam, 2005); (Arai & Akiyama, 2004)
Urban growth in rural areas	China, USA	(Yeh & Li, 2000); (White e Engelen, 1993)
Sub-urbanization of cities	Australia	(Ward et al., 2000)
Urbanization of cities	Latin American Cities	(Barredo et al., 2003); (Torrens, 2006)
Urban Systems Modeling	Netherlands	(White & Engelen, 2000)
Diffuse urban growth	Italia	(Bertussi et al., 1998)
Spreading epidemics	Brazil	(Melotti, 2009); (Sasso et al., 2004)
Deforestation in the Amazon	Brazil	(Ximenes et al., 2008); (Soares Filho et al., 2003)
Dynamics of land use change in agricultural areas	Brazil	(Macedo et al., 2013); (Kamusoko, Courage et al., 2009)
Traffic and transport simulation	Brazil	(Lima, 2007); (Sun et al., 2012)
Dynamics of land use change in agricultural areas	Brazil, USA, Malaysia	(Couclelis, 1997); (Batty et al., 1999); (Burrough, 1998); (Roy, 1996); (Engel, 1995); (Camara, 1996; (Almeida et al., 2003); (Memarian et al., 2012), (Fuglsang et al., 2013; Almeida et al., 2003); (Mitsova et al., 2011); (Onsted & Chowdhury, 2014); (Pires e Polidori, 2009); (Verstegen et al., 2014)
Modeling of urban perimeter expansion in metropolitan regions	Brazil, Portugal	White Engelen, 1997; Umbelino, 2012, Furtado & Van Delden, 2011; Costa, 2010
Fire spread	Brazil	Soares-Filho et al. (2002a), (2002b)
Population, space and environment studies	Brazil	(Umbelino & Barbieri, 2010)
Urban sprawl	USA, China	Batty & Xie (1994); Clarke & Gaydos (1998); Wu (2002)

irregular occupations of roads' right-of-way. We, then, hypothesize that is viable to model the use and occupation of the margins of roads considering socioeconomic, environmental, and of infrastructure provision processes to predict irregular occupations. As a literature gap, we point to the need of modeling the land-use dynamics on the margins of roads in a Brazilian context to identify areas at risk of irregular occupations. The relevance of this research lies in the possibility of proposing management strategic actions to public authorities to avoid and mitigate eventually revealed social and environmental problems.

Considering this context, this article aims to identify and model the dynamics of irregular occupations on right-of-ways and its relationship to the occupation characteristics of their margins, based on the concepts of territory-effect and social distance, to verify whether large social disparities can influence occupations. For this purpose, we adopted as an example, a segment of the federal highway BR-408/PE, in northeastern Brazil (see Fig. 1) due to the availability of local recent data.

2. Methodological approach

Initially, we opted for the adoption of the AC computational model for modeling the phenomenon, based on the availability of space-temporal data on irregular occupations in the right-of-ways of BR-408. This model is based on grids, in which the change processes are represented cell by cell. The mapping of a current state of a cell and its neighbors is compared to another state in the following instant of time. In these circumstances, the scientific value of cartographic models is based on the possibility of being reproduced.

These dynamic spatial models carry out the function of performing simulations of mathematical processes identified in the real world, where changing variables can be seen and, as a result, variations in their force's drivers (Burrough, 1998). For this, Briassoulis (2000) highlights that land use can modify the land cover in three ways: I. Conversion; II. Modification; and III. Maintenance.

To identify the types of uses and the factors most sensitive to irregular occupation on highway right-of-ways, a methodology was developed based on the space-time dynamics to understand the irregular occupation process. For that, the flowchart of Fig. 2 is presented based on a set of socioeconomic, infrastructure, and use/occupation data

extracted from the disaggregation of data from census sectors in a statistical grid, around the BR-408. Then the vector data are transformed into normalized data, reclassified, and transformed into unsigned 8-byte Raster data.

One of the major difficulties in these studies on changes in land use and occupation along the right-of-ways is the measurement of factors associated with irregular occupations. The socioeconomic and infrastructure variables are usually aggregated by counties or census sectors, while the environmental variables are usually spatially continuous across the studied surface (Rufino and Silva, 2017).

To be able to interpret the spatial dynamics of the territories bordering the studied highway, it was necessary to describe quantitatively the phenomenon, the evolution of spatial patterns of this system over time, trying to predict trends of change and integrating its temporal and spatial scales. For Suarez (2013), the types of models that integrate the dynamic models are those of land use and land cover, generally used to model urban land use, land conversion for agriculture, and deforestation. For the author, the phenomenon must answer four questions: What changes? Where does it change? When does it change? Why does it change? It is also necessary to measure how much this change can be trusted.

The change to be studied is related to land use and cover based on Remote Sensing products such as Mapbiomas, associated with data from the Topographic survey of the domain ranges, where the classes Forest/Natural Formation, non-Forest, Agriculture, Non-Vegetated Areas and Water Bodies relative to the margins of the highway are converted into some other type of use and coverage, such as irregular occupations over the right-of-way.

Then, in order to verify the degree of influence of the indexes on the change in land use on the side of the highway, the Land Change Modeler (LCM) was adopted. For that, the variables of the demographic census of 2000 and 2010 were used, based on the three dimensions of the Social Vulnerability Index (IVS) proposed by the Institute for Applied Economic Research Ipea (2015). These variables are named in the model as static variables and dynamic variables. Some of them are associated with the spatialization of infrastructures that influence the phenomenon, like distance to the highway, conservation units, projects of influence, and type of use and occupation.

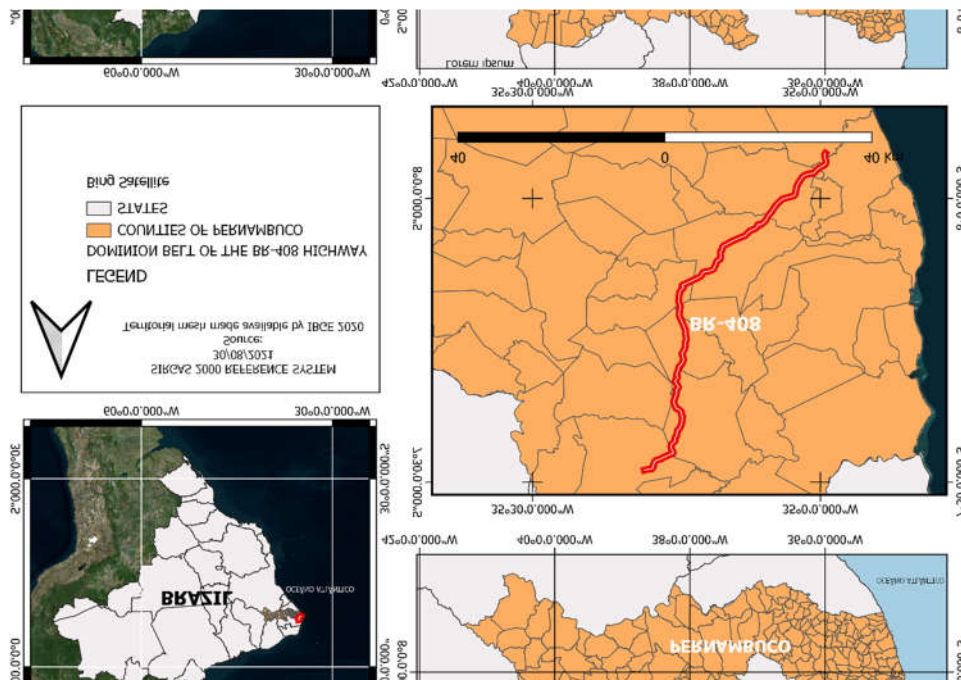


Fig. 1. Right-of-way of BR-408.

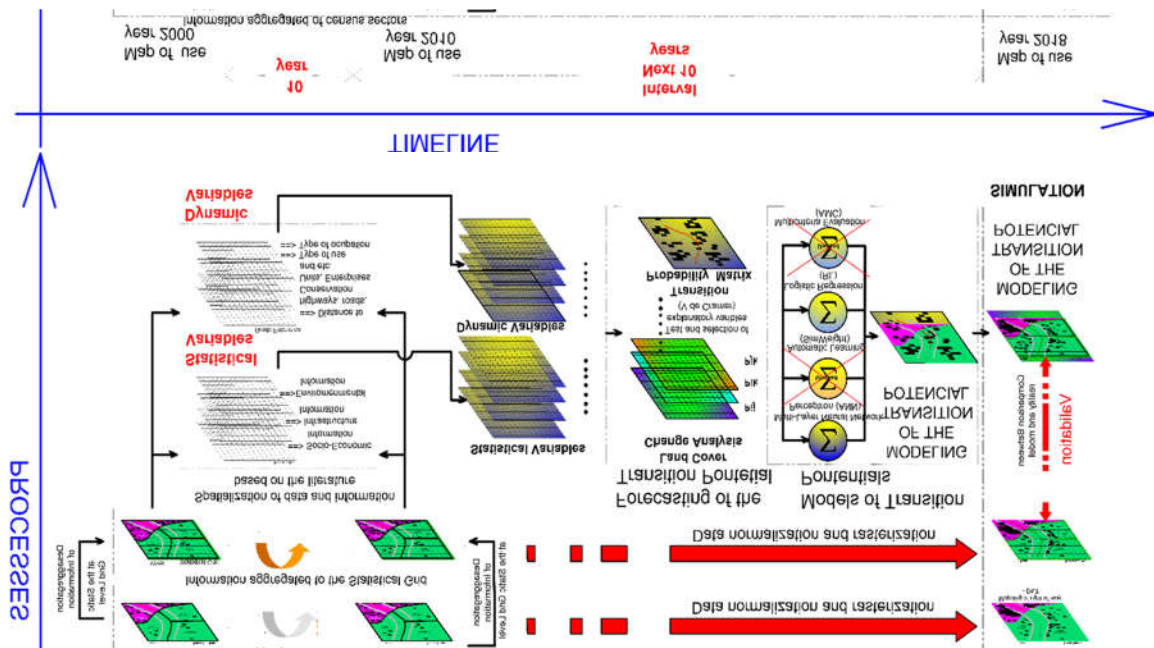


Fig. 2. Flowchart of the Model Development Steps.

To extract the use and occupation of the marginal territories to the studied highway, data from the Annual Coverage and Land Use Mapping Project in Brazil (MapBiomias, 2020) was used, which performs classification of satellite images for the entire national territory. Brazil's Annual Land Cover Mapping Project is an initiative that involves a collaborative network with experts in biomes, land uses, remote sensing, GIS and computer science that uses cloud processing and automated classifiers developed and operated at from the Google Earth Engine platform to generate a historic series of annual land cover maps for Brazil (Fig. 3). The network makes use of artificial intelligence tools applied to remote sensing combined with knowledge about the different land uses in the country. The initiative's main product is the Collection of Annual Coverage and Land Use Maps of Brazil, with a resolution of 30 m and a time series already published that covers the period from 1985 to 2018 (MapBiomias, 2020).

As a result, the use and occupation data were associated with information on the mapping of the BR-408 domain range of the years 2000, 2010, and 2018, obtained from the supervised classification of irregular occupations in 2000 and 2010, from images associated with the land use and occupation classes of the Mapbiomas Project and validated by the Topographic Survey of the Right-of-Way carried out by DNIT in 2018, where the use and occupation were removed from the Mapbiomas Project.

From [geospatial data made available](#) by DNIT-PE, Regional Superintendence of the State of Pernambuco on a federal highway in Brazil, located in the forest zone of the state of Pernambuco, BR-408 - Sector PE,

we raised the main questions about the theme and investigated whether physical proximity can provide positive or negative effects to this population and the nature of social interactions between residents who live on the side of this highway (Fig. 4), seeking to understand their behavior concerning to the irregular occupation of these right-of-ways.

To apply the AC model, it was necessary to transform the socioeconomic and infrastructure and demographic information made available and aggregated into area units (polygons), which represent census sectors and counties in a statistical grid.

The use of administrative and/or operational limits brings a series of restrictions, such as: low spatial resolution; lack of adherence to the limits of other layers of information; and changes in its limits over time (Bueno, 2014), as with data aggregated to census sectors. The use of such units does not favor the performance of spatial analysis, restricting the articulation of demographic data to other sets of information (Grasland and Madelin, 2006; Sherbinin et al., 2002). In addition to the problems inherent in any analysis based on area units, such as MAUP and Ecological Fallacy (Goodchild, 1992; Schuurman et al., 2006; Carvalho et al., 2004).

Thus, we worked with the socioeconomic data, adopting the statistical grid as a spatial unit, disaggregating the data of the census sectors in the area of influence of BR-408 in all its extension throughout the State of Pernambuco. Socioeconomic variables are converted into grids that allow a direct combination of them with other data of a different nature, but with the same spatial pattern.

The regular cell system serves as a repository for georeferenced

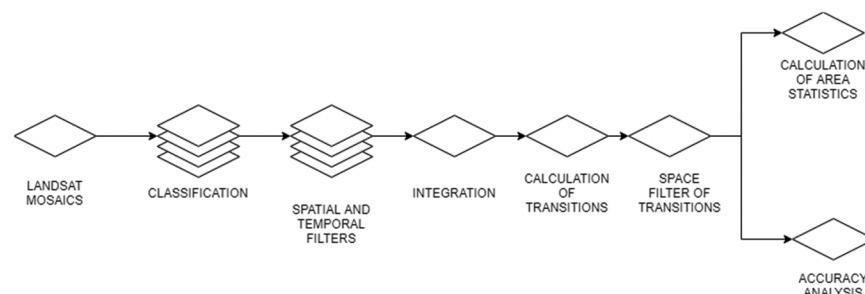


Fig. 3. MapBiomias Workflow Chart.

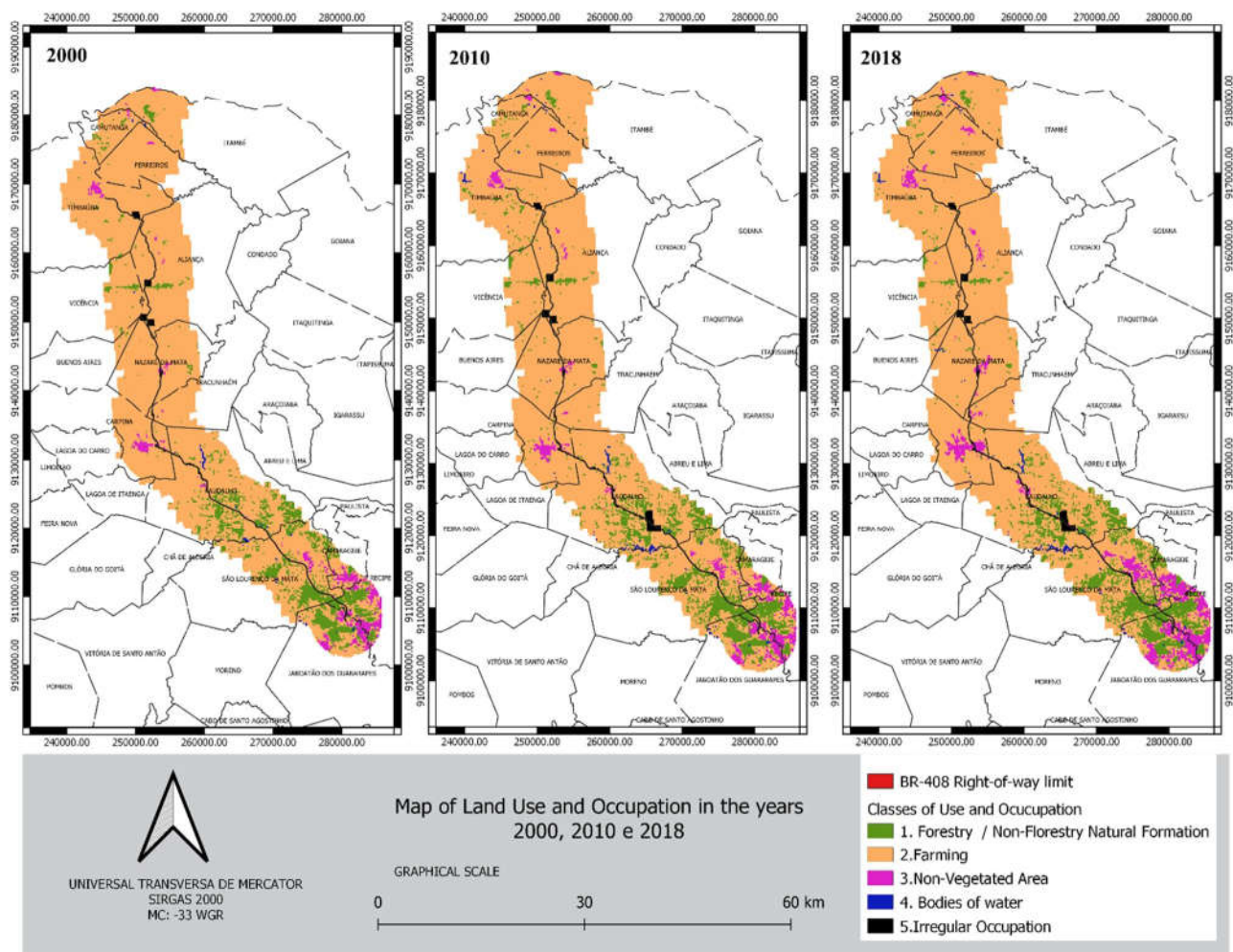


Fig. 4. Land Use and Occupation Map for 2000, 2010 and 2018.

statistical data (Trainor, 2010), offering some advantages concerning the ways of disseminating aggregated data based on census sectors or counties. Small in comparison to the other units, the cells offer better spatial resolution and, consequently, better adaptation to other layers of information (Guzmán; Schensul; Zhang, 2013). The grid allows abstract political and administrative limits, which gives them temporal stability since the cells do not vary over time.

In the QGIS software, the statistical grid provided by IBGE of the methodology present in the work of Bueno (2014) was used. The transfer of data from the 2000 and 2010 Demographic Census Universe (resident population, occupied households, and household situation) to the statistical grid took place through a hybrid approach defined by Bueno (2014), which combines aggregation and disaggregation techniques. For the disaggregation approach, data transfer techniques from one spatial unit to another were used, through the creation of a common spatial denominator among these units (Lumejeaud et al., 2010).

The data on land use and cover for 2000 and 2010 incorporated into the grid cells come from the Annual Land Cover Mapping Project in Brazil (MapBiomas). The choice of the classes of use adopted was based on the classes available in the project and of relevance to the work. The main variables that influence the disordered occupation of the BR-408 domain, in which each polygon corresponds to five classes of use and coverage categories present in this study: Forestry, Natural Non-Forestry Formation, Agriculture, Non-vegetated Area, Bodies of Water and class irregular occupations on the right-of-way.

The changes must occur in the most adequate areas, defined by a set of spatially independent variables identified in the process of

exploratory analysis and calibration of the modeling. To choose the explanatory variables of the model, it was essential to understand the history of the occupation and the literature review. The explanatory variables were thus defined based on the availability of census data and the change in land use for the years 2000 and 2010 (Table 2).

3. Results

The spatial intersection of the statistical grid aggregating variables of the demographic censuses related to socioeconomic and infrastructure data for 2000 and 2010, normalized and categorized into classes, allows direct comparisons among the categorical layers, adopting the dimension of 200×200 m for the pixel. These comparisons are conducted based on the selection of map algebra techniques. Then, the variation of the Mapbiomas classes was verified for the studied years. From the layers of classes of land cover, the percentage of the area of each class related to the total area of each cell was calculated (Table 3).

The reclassified maps relating to the 2000 land cover map (initial map) and the 2010 land cover map (final map) were used to calculate the Transition Matrix (Table 4). The rates of change are obtained by calculating the transition matrix, which represents the total amount of change for each type of land cover transition, taking into account the period of the simulation (time difference in the years between 2000 and 2010) through a cross-tab operation.

The matrix reveals the probability of transition among the classes of land use and occupation, between the 2000 and 2010 interval, having practically the same probability of transition of the other classes to

Table 2
Explanatory Variables for the Years 2000 and 2010.

Initial	Variable of physical or socioeconomic use change	Unit
Dist_Br	Distance to BR-408. Measured from the BR-408 axis	m
dist_ocup_agri	Distance from occupations to agricultural areas	m
dist_ocup_pasture	Distance from occupations to pasture areas	m
dist_ocup_urb	Distance from occupations for urban areas	m
DP	Population density. Data from the 2000 and 2010 census sectors. Attributed to the statistical grid and normalized in the pixel.	inhab/km ²
P_Water	Percentage of Permanent Private Households (PPHs) with general water supply	%
P_Sewer.	Percentage of Permanent Private Households (PPHs) with a bathroom for the exclusive use of residents or a toilet and sewage via the general sewage or pluvial network.	%
P_Garbage	Percentage of DPPs with garbage collected by cleaning service.	%
RNMPr	Nominal monthly income of heads of household	R\$
RPC	Nominal monthly income of heads of household Per capita income (only those responsible for the family)	R\$
V1	Percentage of precarious private housing units	%
V3	Percentage of private households with a bathroom or toilet without sewerage via the general sewerage system, rainwater or septic tank	%
V4	Percentage of Permanent Private Households (PPHs) without bathroom	%
V5	Percentage of Permanent Private Households (PPHs) with garbage not collected	%
V7	Percentage of Permanent Private Households (PPHs) leased	%
V21	Percentage of persons responsible for Permanent Private Households (PPHs) without nominal monthly income	%
V8	Percentage of Permanent Private Households (PPHs) with more than 4 residents	%
V22	Percentage of persons responsible for Permanent Private Households (PPHs) with nominal monthly income of up to 3 minimum wages	%
P_ALFAC	Percentage Head of Household Literate	%
P_ALFAP	Percentage Literate People	%
OCORR	Occurrences of Irregular Occupations on the Domain Range distance (km) from the census sectors to the BR axis	Unit
DSBR	Distance (km) from the census sectors to the axis of the BR	m

change their use and occupation to an irregular occupation area over the right-of-way of BR-408, where there is a 0.6% probability of a Forest / Natural Non-Forest Formation class, 0.5% of an agricultural area, 0.2%

Table 3
Distribution of the Cells by Land Cover Classes following occupation situation for the Year 2000 and 2010.

Classes	2000 (ha)*	2010 (ha)*	Δ (h)	2000 (%)	2010 (%)	Δ (%)
1. Forestry / Non-Forestry Natural Formation	11,288.00	12,652.00	1364.00	9.86	11.05	1.19
2. Farming	98,744.00	96,036.00	-2708.00	86.27	83.91	-2.37
3. Non-Vegetated Area	3476.00	4024.00	548.00	3.04	3.52	0.48
4. Bodies of water	312.00	540.00	228.00	0.27	0.47	0.20
5. Irregular Occupation	636.00	1204.00	568.00	0.56	1.05	0.50

(*) 1 ha corresponds to an area of $100 \times 100 \text{ m} = 10,000 \text{ m}^2$

Table 4
Confusion Matrix Model.

Classes	1. Forestry / Non-Forestry Natural Formation	2. Farming	3. Non-Vegetated Area	4. Bodies of water	5. Irregular Occupation
1. Forestry / Non-Forestry Natural Formation	0.843	0.145	0.006	0.005	0.006
2. Farming	0.031	0.951	0.002	0.002	0.005
3. Non-Vegetated Area	0.000	0.112	0.885	0.001	0.002
4. Bodies of water	0.089	0.167	0.012	0.731	0.000
5. Irregular Occupation	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

of an un-vegetated area becoming an irregularly occupied area over the domain range. The matrix also shows there was no transition from the irregularly occupied areas over the domain to the other classes, showing that the State did not intervene to change the situation in the years 2000–2010.

From the cells contained in the 5 km buffer areas, cells that are within the domain range were selected to study their behavior related to their spatial dependence. The behavior of the cells was observed in the socioeconomic data for the year 2010, and from the Pearson correlation matrix for the variables indicated in Table 1, a strong correlation (r greater than 0.7) was verified for density population and housing density. It was also verified the existence of spatial correlation of these cells, based on the Local Moran index, as can be seen by the Geoda software in cells affected by irregular occupations (Fig. 5).

Population density represents a critical variable for the analysis of the dynamics of land use/occupation in marginal lands. Verburg et al. (2002) emphasizes the importance of calculating population density, as the population can affect land use, not only locally, but also, in particular, over certain distant areas. Since it is challenging to find population density accurately due to the limitation of data sources in the study area, the population density was estimated from the IBGE (Brazilian Institute for Geography and Statistics) statistical grid, which, therefore, was cut and resized to a 200×200 pixel resolution according to the worst accuracy of the cartographic data.

The variables proposed in Table 1 were also normalized to prevent the model from being biased towards the variables with a higher order of magnitude, given that all variables were transformed to the same order of magnitude. With that, the variables were transformed into several raster layers with the entire 8-bit pixel output without a sign, as well as the land use and occupation data. Then we started using the Qgis Plugin called MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation - Modules for Assessing Changes in Land Use). The Plugin is designed to analyze, model, and simulate changes in land use and cover. The plugin incorporates algorithms, which can be used to evaluate changes in land use and cover, analysis of variations in land use and occupation in urban areas, as well as in forestry applications and projects. The choice of MOLUSCE comes in the sense of modeling the potential transition of the use and occupation of land or areas with imminent risk of irregular occupation.

Within the Evaluating Correlation Module, simulations were performed with the variables to identify and analyze the correlations between them. Then it was detected that some variables were strongly correlated, especially the socio-economic and infrastructure variables that are associated with the spatial segregation of social classes in

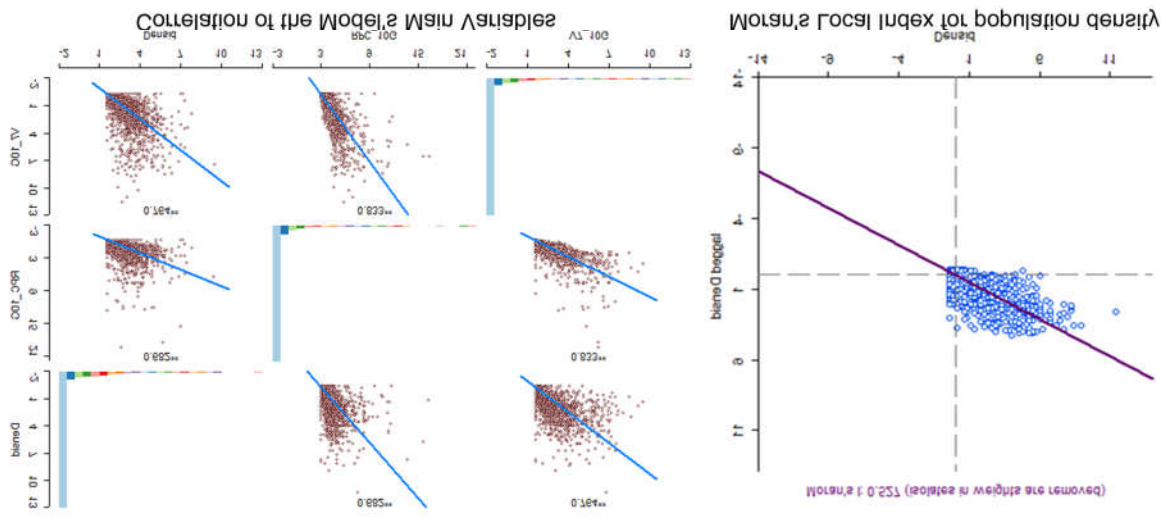


Fig. 5. Correlation and Spatial Dependence of Population Density in the Model.

different areas of the territory. The poorest sections of the population (variable V1, V4, and V3), with fewer resources, are precisely those who have more health problems due to the lack of infrastructure, who are penalized by low-quality schools (variable P_ALFAC, P_ALFAP), and so on. Another point verified from the occurrences of irregular occupations is the issue that the cells that are closest to the highway have a higher population density (variable DP), consequently more occurrences of irregular occupations over the right-of-way (variable OCORR). This shows that the models mentioned in the specialized literature, such as [Lojkin \(1981\)](#), [Roberto Lobato Corrêa et al. \(2013\)](#), and [Flávio Villaça \(2012\)](#), who relate socio-spatial segregation in the urban space to the peripheral regions, where there is difficulty in accessing collective equipment, fewer job opportunities and professionalization are the pressure vectors for the irregular occupation of the right-of-ways.

It can be observed that on the “edges” of the cities crossed by the BR-408 Highway (variables *dist_occup_urb*, *dist_occup_pasto*, and *dist_occup_agri*) a disorderly growth of peripheral neighborhoods increases, inducing the occupation of areas that are not inspected by the government. These areas are often inhabited by low-income families (variables *RNMPr*, *RPC*, *V21* and *V22*), who have no other choice, but to live in places with poor infrastructure (variables *P_WATER*, *P_SEWER*, *P_TRASH*, *V5*).

For the studied stretch of Highway BR-408, the variables that showed greater adherence to the land-use model were the following: Occurrences of irregular occupations over the domain (*Ocorr_2010*); Nominal monthly income of the heads of household (*RNMPr_2010*); Population Density (*DP_2010*); Distance from the Census Sectors to BR-408 (*DSBR_2010*); Percentage of PPHs with garbage collected by cleaning service (*plixo_2010*); Per capita income (only those responsible for the family); Distance to the BR-408 axis (*Dist_BR*).

The use of topography as a variable was not required in the analysis since the existing classes of topographic variations in the studied section were statistically insignificant, showing that the topographic variations do not prevent a particular region from being irregularly occupied. It was found to diagnose any irregular occupation it is essential to identify three variables: the proximity of the strip; the socioeconomic and environmental situation, and land use and occupation.

It is also observed that the change in land use and occupation is more intense as it approaches the highway. Like so, it is clear people organize themselves according to their subsistence needs, and to the influence, they exert over these spaces. The intensive land use and the lack of urban planning have generated spatial and environmental dysfunctions on the margins of this highway, as the presence of commercial establishments grew in this region in the period from 2000 to 2018.

For the modeling and its validation, therefore, the following logics were used: three distinct known periods, obtained by the classification of Mapbiomas and analyzed with the geospatial data of irregular occupations of 2018 provided by DNIT, represented by the land-use maps (2000, 2010, and 2018), where the difference between the 2000 and 2010 classes is used as the rate of change. The rate of change (Δ (%)) is applied to the 2010 land use/occupation map trying to predict in 2018 (simulated use/occupation map for 2018).

The change map is a raster of an only band that stores information about transitions. The values of the change map categories are mapped one by one to the transition classes. Each raster map of the study area is a raster of a band where each pixel is assigned to the land use category, in view of the change map and the correlations between the possible explanatory variables extracted.

To understand the behavior of the variables, the transition potential of land use and occupation was modeled by two methods: Artificial Neural Network (ANN) and Logistic Regression (LR). For validation, a simulated 2018 result (map) was compared with the 2018 map obtained from the georeferenced topographic survey of the right-of-way provided by DNIT, observed by ANN and LR.

The behavior of the LR model is remarkably similar to that of ANN. The input data is a collection of raster pixels from the initial state (use and occupation of the year 2000) and raster of the explanatory variables. The output is the change map. Thus, the logistic regression model equally performs the following actions: Initial preprocessing of the data (coding and dummy normalization); sampling, and training.

The simulator module performs the procedure for assessing land-use change. Use the following data as input: Raster map of the initial state; Raster map of factors (variables); Model.

The raster map of the initial state (the year 2000) contains information on land use categories. The raster map of the factors contains information on explanatory variables. The model is a predictor that calculates the transition potentials in the factors' state and the current land use. Thus, the module does not use implicit transition rules, but the transition potentials generated by the models. A neighborhood effect is achieved during training. For example, logistic regression presents a coefficient for each neighbor and these coefficients affect the transition potential. If the model does not adopt neighborhood effects, the simulator should account only for general standards.

To compare the two models, we use the Kappa statistic, often used to test the accuracy of variables. The following results were obtained for the Kappa concordance test, proposed by [Cohen \(1960\)](#), to measure the degree of agreement between proportions derived from dependent samples. A map's accuracy indicates the proximity of a given measure of

its real value, so the reliability of a map links to its accuracy (Bernardes, 2006). In this context, it was necessary to perform a statistical procedure on the output of the classification to determine its accuracy. For this, in the data analysis process, a fundamental step could be using a confusion matrix, which represents one of the metrics adopted to provide a holistic view of the performance of a model, that is, it is a table that shows the classification frequencies for each class of the model.

According to Congalton et al., (1983, 1991), Stehman and Wickham (2011), and Stehman and Foody (2019) for spatial analysis a confusion matrix is a tool with a square arrangement that presents the degree of similarity between reference data (usually arranged in columns, derived from aerial photos or videos, soil measurement, etc.) and classification data (usually arranged in rows, generated from maps or the remote sensing data). Like so, a confusion matrix aims to check for errors arising from the pixel assignment process to some classes.

Validation allows the accuracy verification of the simulation. MOLUSCE incorporates three types of validation: Kappa statistics; Validation by estimation of the error; Validation of the error map. The accuracy evaluation is obtained by means of agreement coefficients derived from the confusion matrix (or error matrix), which can be expressed as total agreement or for individual classes.

The confusion matrix was formed by a square arrangement of numbers arranged in rows and columns that express the number of sample units of a particular relative category - inferred by the model, compared with the current verified category (2018 land use map).

Among the measures derived from the confusion matrix, there is the Kappa index, which represents a discrete multivariate technique used to assess thematic accuracy and uses all elements of the confusion matrix in its calculation. The Kappa coefficient (K) is a measure of the real agreement (indicated by the diagonal elements of the confusion matrix) minus the agreement by chance (indicated by the total product of the row and column, which does not include unrecognized entries), that is as far as the classification is in accordance with the reference data. The Kappa coefficient is calculated using Eq. 1:

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 + \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (1)$$

Where K is an estimate of the Kappa coefficient; x_{ii} represents the value in row i and column i ; x_{i+} is the sum of the row i , x_{+i} is the sum of column i of the confusion matrix; n is the total number of samples and c the total number of classes. Kappa scores range from -1 to $+1$, where -1 corresponds to no agreement, 0 relates to an equal agreement between the data, and $+1$ corresponds to an exact agreement.

Although the Kappa coefficient is widely used in the assessment of mapping accuracy, there is no theoretical basis for recommending the minimum suitable levels for this coefficient in a classification. However, authors like Landis and Gg (1977) have characterized the Kappa level of agreement in three ranges: a value greater than 0.80 represents a strong agreement, between 0.40 and 0.80 represents a moderate agreement, and less than 0.40 represents weak agreement.

The models proposed in the research were validated with the reference value of the pixels of the 2018 use map, where it was verified from the confusion matrix, using the Kappa index the accuracy of the model, in predicting the behavior of change of use/occupation for the year 2018. Molusce calculated three types of statistics (Table 5) Kappa (K), Kappa location (Kloc), and Kappa Histogram (Khist) based on the landscape change methods and algorithms of the MOLUSCE plugin (MOLUSCE, 2020).

4. Discussions

As seen in Fig. 6, the results present in some land use classes, small changes in the classification as irregular occupation over the right-of-

Table 5

Validation of the models.

	Neural artificial network (RNA)	Logistic regression (LR).
Accuracy %	94.541	94.359
Kappa (overall)	0.811	0.811
Kappa (histo)	0.923	0.920
Kappa (loc)	0.886	0.880

way of BR-408.

In the modeling, we found that the estimates for land use, based on Artificial Neural Network (ANN) and Logistic Regression (LR) models were satisfactory, especially when non-vegetated class areas (urbanized) were replaced by irregular occupation classes. The analysis equally shows a certain similarity between the maps simulated by RNMLP and LR and the classified for the year 2018 (real).

In the distribution of cells by classes of land use and cover according to the occupation in 2000 and 2010 (Table 2) were observed inefficiencies in the supervision of irregular occupations by DNIT, since there was no transition from the irregular occupation class to other classes. Consequently, there was only the growth of the irregular occupation class over the right-of-way of BR-408 between 2000 and 2010 of about 0.50% .

MOLUSCE generated the error map, which contains information about inaccurate predictions in the simulated raster. The error map was constructed by comparing the simulated map and the reference map for the year 2018, in which the model accepts a 5% error. The model applied is a predictor that calculates transition potentials in factor condition and land use for the years 2000–2010. Therefore, the MOD-ULE does not use implicit transition rules; it uses the transition potentials generated by the models. The neighborhood effect is achieved if one of the models uses neighboring areas during training, for example, the logistic regression contains a coefficient for each neighbor, and the coefficient affects the transition potential. If the model does not use a neighborhood effect, the simulator takes only general patterns into account.

Given this, it was recognized that the class changes followed the behavior explained in the exploratory analysis, in which the correlation and spatial dependence of population density influenced the accuracy of the model's predictability. As follows, the pressure exerted by the periphery of urban centers (non-vegetated areas) is due to the need to expand space for commerce and housing.

The land use and occupation related to non-vegetated areas and irregular occupations on the right-of-ways suffered, as shown in Table 2, growth in the same order, 0.48% and 0.50% between 2000 and 2010. Furthermore, the model reveals a robust relationship between irregular occupations and the growth in the use of non-vegetated areas. There was, in addition, a decrease in areas occupied by agriculture and cattle ranching activities of 2.37% and a growth of 1.19% in land use and occupation for the same years. There was a growth between 2000 and 2018 of 2.73% in non-vegetated areas (urbanized), as well as a growth of 0.57% in irregular occupations. In contrast, there was a reduction in agricultural use of 4.55% . This reduction was due to the vegetation recovery (Forest/Non-forested Natural Formation) and reduction of areas of agricultural use for the growth of non-vegetated areas (urbanized), as well as possible failures in the classification of MAPBIOMAS.

Regarding the urban area class, the simulated map (Fig. 7) indicated expansion, more specifically in the peripheral parts of the urban clusters coinciding with the reference map, as well as with the map simulated by ANN. Regarding socioeconomic and infrastructure census data, we observed the need to improve the disaggregation of data to the statistical grid through other interpolation methods such as the nearest neighbor, weighted average, kriging, and bi-linear.

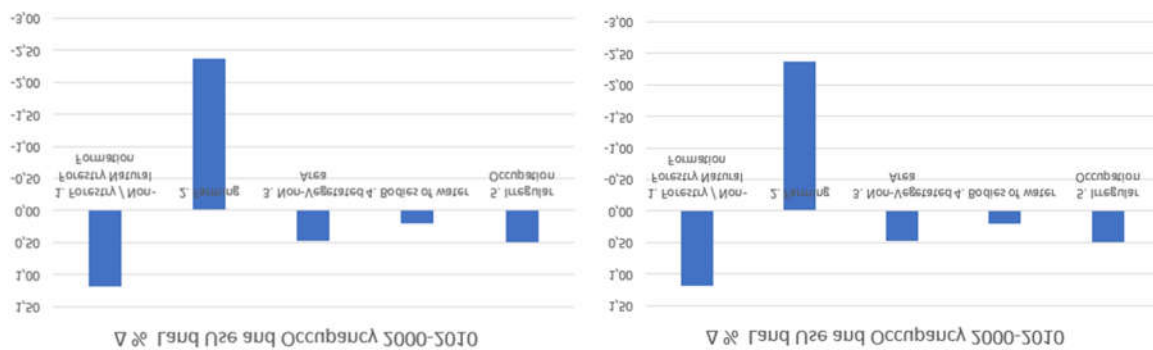


Fig. 6. Percentage of Area Gain and Loss.

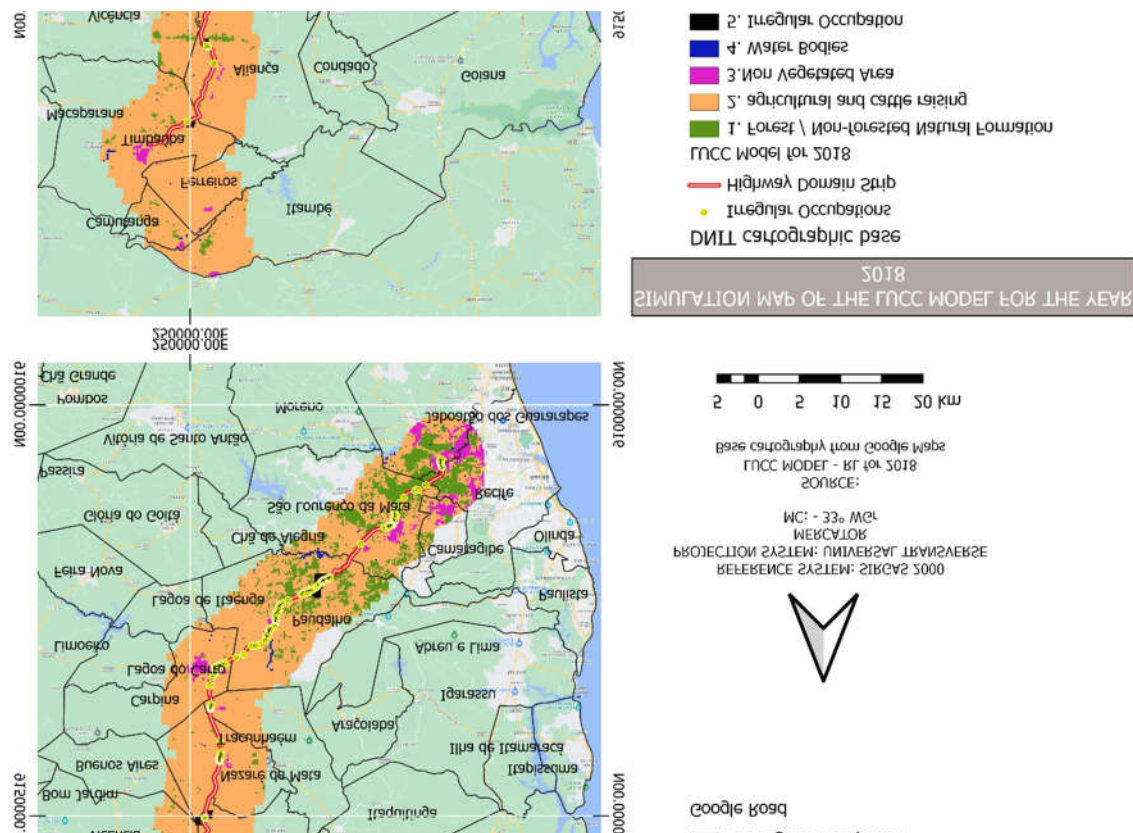


Fig. 7. Simulation Map of the LUCC Model for the Year 2018.

5. Conclusions

Modeling the use and occupation of territories, although not a recent activity, still presents great challenges, mainly due to the complexity and a large number of variables involved in orderly and disordered urban growth.

The use of orbital images of medium spatial resolution does not allow the distinction between intra-urban land uses (residential, commercial, industrial, etc.). Even for the uses related to urban expansion, in which two classes are used for the simulation: urban and non-urban, the images have certain ambiguity in peripheral areas, where some settlements are difficult to classify, as they present characteristics that are sometimes urban, sometimes rural, generating spectral confusion. To minimize the uncertainty of the subjectivity of the interpretation of the classification, we use the full results found by MAPBIOMAS.

Even so, the modeling techniques allow the identification of the main trends of occupation and changes in land cover in the studied area,

providing subsidies for the monitoring and study of the areas crossed by highways.

In conclusion, based on the behavior of the cells, government planners and managers can observe the pattern of development in the area of influence of highways and propose policies and actions aimed at reducing the impacts of spatial segregation along the highway, favoring the environment conducive to non-occupation of this population on the side of the highway.

Then, from the construction of scenarios, one can identify the forces that determine desirable and undesirable results of change, which, in turn, support the formulation of public policies, social-economic, and environmental actions, as well as encourage the desirable and discourage the undesirable. The scenarios, thus, make it possible to support planning procedures that generally involve quantitative models and simulations as stated by [Alcamo et al. \(2006\)](#).

The setting up of actions and norms for land use and coverage in areas close to the highways' domain, through land management plans,

can assist social and economic development close to these areas. For that, it is necessary to investigate the behavior of other variables, as well as to apply the same methodology in other stretches of highways.

Given the proven possibility of developing scenarios for predicting irregular occupations on road right-of-ways, it is necessary to improve the quality of aggregated data of raster cells. To this end, we are conducting research with indicators that can potentially replace census data on other Brazilian federal highways, such as the Social Vulnerability Index, made available from the Institute of Applied Economic Research (IPEA) incorporating the dimensions of urban infrastructure; human capital, and labor/income, also available for the years 2000 and 2010.

REFERENCES

- Alcamo, J., K. Kok, G. Busch, J.A. Priess, B. Eickhout, M. Rounsevell, D.S. Rothman, ANDM. Heisterman (2006), Searching for the future of land: Scenarios from the local to the global scale, in Land-use and Land-cover Change: Local Processes and Global Impacts, edited by E.F. Lambin and H. Geist, pp. 138–155, Springer-Verlag, Berlin. (<https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7-6>).
- Amartya, S.E.N., 1984. Poverty and Famines: An Essay on Entitlements and Deprivation. University Press., Oxford, UK.
- Batista, O.M. (2019). A influência dos usos irregulares e das características da Faixa de Domínio na Segurança Viária de Rodovias Federais Brasileiras. Publicação T.DM-009/2019. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83p. (https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/37225/1/2019_MaiaraOliveiraBatista.pdf).
- Bernardes, T., 2006. Caracterização do ambiente agrícola do Complexo Serra Negra por meio de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. Master Diss. Univ. Fed. De Lavras, Minas Gerais 119. (<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3483?mode=full>). Access in: 13 out. 2020. <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3483>.
- Bertuzzi, G.L.E., Ellery Junior, R., 2012. Infraestrutura de transporte e crescimento econômico no Brasil. J. Transp. Lit. vol. 6 (n.4), 101–132.
- Bidou-Zachariassen, C. Classes populaires et classes moyennes en centre rénové. In: HAUMONT, N. (Org.). La ville: aggrégation et ségrégation sociales. Paris: L'Harmattan, 1996. p. 131–142. (<https://www.scielo.br/j/civitas/a/JvcZT5bSCHns49P4QDhnHxf/?lang=pt&format=pdf>).
- Bueno, M.C., 2014. Grade estatística: uma abordagem para ampliar o potencial analítico de dados censitários. Tese (Doutorado em Demogr.) – Univ. Estadual De. Camp. – Unicamp, Camp. <https://doi.org/10.1590/S0102-3098201500000032>.
- Burrough, P., 1998. Dynamic Modelling And Geocomputation. Geocomputation: A Primer. P. Longley. M. Batty and R. McDonnell. John Wiley & Sons., London. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89930-3_1.
- Campeão, D.F.G. A Importância da Configuração do Espaço Urbano nas Cidades Inteligentes: Aplicação ao Concelho de Sintra; Master Dissertation Programa de Pós-graduação em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicado ao Ordenamento – Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal; 2017. (<https://repositorio.ul.pt/handle/10451/30415>).
- Carvalho, M.S., Camara, G., Monteiro, A.M.V. (Eds.), 2004. Análise espacial de dados geográficos. Embrapa, Brasília.
- Chein, F.L. Desigualdade regional, migração e custos de transporte: três ensaios sobre desenvolvimento. 2006. 142f. Tese (Doutorado em Economia do Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional) – CEDEPLAR/FACE/UFMG, Belo Horizonte, 142f. 2006.
- Cnt - Pesquisa de Rodovias. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 4 jan. 2021.
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. Educ. Psychol. Meas. 20 (1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.
- Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sens. Environ. 37, 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-8).
- Congalton, R.G., Oderwald, R., Mead, R., 1983. Assessing landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. Photogramm. Eng. Remote Sens. 49, 1671–1678.
- Desai, Meghnad. Drawing the line: on defining the poverty threshold. In: Poverty, famine and economic development. The selective essays of Meghnad Desai, v. 2. EUA, Ed. Edward Elgar Co., 1995. (<http://anpocs.com/images/stories/Geral/encontrosanuais/37eaa/BRICS.pdf>).
- Genovez, P.C. Território e desigualdade: análise espacial intra-urbana no estudo da dinâmica de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos / P. C. Genovez. - São José dos Campos: INPE, 2002. 220p. – (INPE-12177-TDI/973).
- Ghisolfi, V., Ribeiro, G.M., Chaves, G.L.D., Orrico Filho, R.D., Hoffmann, I.C.S., Perim, L. R., 2019. Evaluating impacts of overweight in road freight transportation: a case study in Brazil with system dynamics. Sustainability 11 (11), 3128–3131. <https://doi.org/10.3390/su11113128>.
- Goodchild, M.F., 1992. Research initiative 1: accuracy of spatial databases. Final report. Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis. University of California.,
- Grasland, C., & Madelin, M., Eds. (2006). The modifiable areas unit problem. Luxembourg: ESPON (Final Report 3.4.3). (<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.125.8929&rep=rep1&type=pdf>).
- Humphrey, C.R., Sell, R.R., 1975. The impact of controlled access highways on population growth in Pennsylvania nonmetropolitan communities, 1940–1970. Rural Sociol., V. 40, 332–343. (<https://www.proquest.com/openview/1eb7ac31fde413a63fce7e56dc9e243/1?pq-origsite=scholar&cbl=1817355>).
- Ipea, 2015. Atlas da vulnerabilidade social nos municípios brasileiros / editores: Marco Aurélio Costa. Bárbara Oliveira Marguti. – Brasília.: IPEA 77 gráfs., mapas color. ISBN: 978-85-7811-255-4.
- Kaztman, R., 2001a. Seducidos y abandonados: el aislamiento social de los pobres urbanos. Revista de la CEPAL. Santiago de Chile n.75, 171–189 (dez).
- Kaztman, Rubén, 2001b. Seducidos y abandonados: el aislamiento social de los pobres urbanos. Rev. De. la Cepal n. 75, 171–189 (dic).
- KOGA, D. Cidades territorializadas entre enclaves e potências. Tese de Doutorado. São Paulo, PUC, 2001.
- Kuhlman, T., 2008. Scenarios: driving forces and policies. In: HELMING, K., PÉREZ-SOBA, M., TABBUSH, P. (Eds.), Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes. Springer, Berlin, pp. 131–157. ISBN 9783540786474.
- Landis, J.R., Gg, K.O.C.H., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 33 (1), 159–174.
- Lichter, D.T., Fuguitt, G.V., 1980. Demographic response to transportation innovation: the case of the interstate highway. Soc. Forces, V. 59, 492.
- Lojkin, J. O. Estado capitalista e a questão urbana. São Paulo: Martins Fontes, 1981. (<https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/7307>).
- Lumejeaud, C., PRUD'HOMME, J., DAVOINE, P., GENSEL, J., 2010. Transferring indicators into different partitions of geographic space. In: TANIAR, D., GERVASI, O., MURGANTE, B., PARDEDE, E., APDUHAN, B. (Eds.), Proceedings International Conference on Computational Science and its Applications – ICCA'10, v. 1. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- MASSEY, D., Denton, N., 1993. American Apartheid: Segregation and the Making of the Underclass. Harvard University Press., Cambridge.
- Oliveira, S. L. Faixa de Domínio das Rodovias: Aspectos Socioambientais da Destinação da Ocupação. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Goiás, Instituto de Ciências Biológicas (ICB), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2018.
- Prado, L., Miziara, F., Ferreira, M.E., 2012. Expansão da Fronteira Agrícola e Mudanças no Uso do Solo na Região Sul de Goiás: ação antrópica e características naturais do espaço. Bol. Goiano De. Geogr. 32, 1–15.
- Raitz, Karl, 1998. American roads: roadside America (July). Geogr. Rev. Volume 88 (Issue 3), 363–387. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.1998.tb00113.x>.
- Romeiro, Ademar Ribeiro, 2012. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. Disponível em acesso em 28 de setembro de 020 Estud. Av., São Paulo v. 26 (n. 74), 65–92. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100006>. (http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142012000100006&lng=en&nrm=iso). Disponível em acesso em 28 de setembro de 020.
- Schuurman, N., LESZCZYBSKI, A., FIEDLER, R., GRUND, D., BELL, N., 2006. Building an integrated cadastral fabric for higher resolution socioeconomic spatial data analysis. In: RIEDL, A., KAINZ, W., ELMES, G.A. (Eds.), Progress in spatial data handling: 12th International Symposium on Spatial Data Handling. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Sherbinin, D.E., Balk, A., Yager, D., Jaiteh, K., Pozzi, M., Giri, F., Wannebo, C., Ciesin, A.A., 2002. thematic guide to social science applications of remote sensing. Nova Y.: Cent. Int. Earth Sci. Inf. Netw. (CIESIN). (http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide_frame.jsp?g=48).
- Small, M.L., Newman, K., 2001. Urban poverty after 'The truly disadvantaged': the rediscovery of the family, the neighborhood, and culture. Annu. Rev. Sociol. 27, 23–45 (Aug).
- Soares-Filho, B. S.; COUTINHO CERQUEIRA, G.; LOPES PENNACHIN, C., DINAMICA-a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier Ecological Modelling. [s.l: s.n.]. Disponível em: (www.elsevier.com/locate/ecolmodel). Acesso em: 4 dez. 2019.
- Soares-Filho, B.S. Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. Tese de doutorado. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- Soares-Filho, B.S., Araújo, A.A., Cerqueira, G.C., 2001. DINAMICA – Um software para simulação de dinâmica de paisagens. II Workshop Trat. De. Imagens 3.
- Soares-Filho, B.S., Pennachin, C.L., Cerqueira, G., 2002a. Dinamica – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. Ecol. Model. 154 (3), 217–235.
- Soares-Filho, B.S., Pennachin, C.L., Cerqueira, G., 2002b. DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. Ecol. Model., Hol. 154 (3), 217–235.
- Soares-Filho, B.S., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Vera-Diaz, M., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E., 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. Glob. Change Biol. 10 (5), 745–764.
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Curran, L., Voll, E., Cerqueira, G., Garcia, R.A., Ramos, C. A., McDonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P., 2006. Modeling conservation in the Amazon Basin. Nature 440, 520–523.
- Stehman, S.V., Wickham, J.D., 2011. Pixels, blocks of pixels, and polygons: choosing a spatial unit for thematic accuracy assessment. Remote Sens. Environ. 115, 3044–3055. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.007>.
- Stehman, Stephen V., Foody, G.M., 2019. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. Remote Sens. Environ. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>.
- Suarez, A.F. I Estudo da dinâmica no uso e cobertura do solo da Mata Atlântica: caso do Município de Maragogipe – BA, 2013.

- Trainor, T. Combining variable spatial data with grids to improve data visualization. In: CONFERENCE OF EUROPEAN STATICIANS, Paris, 2010.
- Trotsky, Leon, 1932. *The History of the Russian Revolution*. University of Michigan, Ann Arbor.
- Voss, P.R., 2007. Demography as a spatial social science. *Popul. Res. Policy Rev.* 26 (5/6), 457–476.
- Wolfe, Marshall. Globalization and social exclusion – some paradoxes. In: GARRY ROGERS, Charles Gore; FIGUEIREDO, José (Org.). *Social exclusion: rethoric, reality, responses*. EUA, International Institute of Labor Studies, 1995.
- Wolff, M.G.C., Caldas, M.A.F., 2018. A model for the evaluation of Brazilian road transport: a sustainable perspective. *J. Adv. Transp.* 1-12 <https://doi.org/10.1155/2018/5274789> (Article ID 5274789).

Apêndice A

A.3 - Modelo LCM da BR-408

 **ErisonBarros / Processing-of-the-layers-by-the-Qgis-Molusce-Plugin-** Publicgenerated from [ErisonBarros/labat.github.io](https://github.com/ErisonBarros/labat.github.io)

☆ 0 stars 🍴 0 forks

☆ Star

👁 Watch ▾

[Code](#)[Issues](#)[Pull requests](#)

1

[Actions](#)[Projects](#)[Wiki](#)[Security](#)[Insights](#)[Settings](#)

🔗 master ▾

...

Your master branch isn't protected

Protect this branch from force pushing, deletion, or require status checks before merging.

[Protect this branch](#)[Dismiss](#)

ErisonBarros ...

on 5 Sep 2021

[View code](#)

☰ README.md



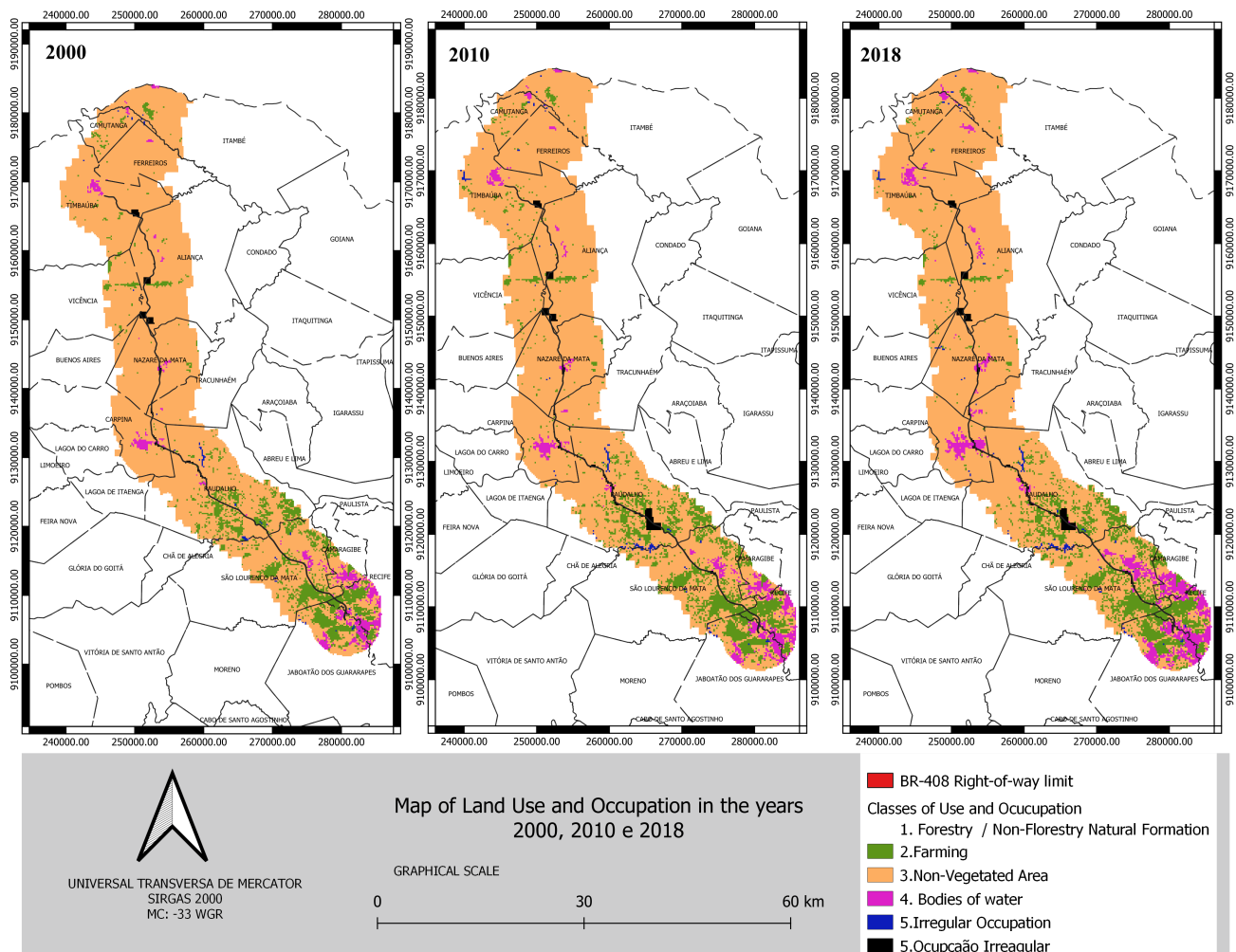
Processing of the layers by the Qgis Molusce Plugin

From the exploratory analysis of the 2010 data, since they are the data but close to the reality of the last census we verify in a routine in python and R we study the distribution of variables and generate the correlation matrix of variables.

Correlation matrix between the variables

	MASC	FEM	POP	DOM_OCU	ocorr_2010	ocorr_2000	P_AGUA_10	P_LIXO_10	RNMPR_10	V1_10G	V3_10G	V4_10G	V5_10G	V7_10G	V8_10G	V21_10G	V22_10G	P_ALFC_10G	P_ALFP_10G	RPC_10G	area	perimeter	Densid	Count
Count	0.67	0.65	0.66	0.6	0.44	0.01	-0.0	0.21	0.12	-0.0	-0.01	0.01	0.03	0.11	0.24	0.13	0.21	0.16	0.16	0.11	0.17	0.17	0.02	1.0
Densid	0.75	0.77	0.76	0.81	-0.0	-0.02	0.85	0.81	0.7	0.12	0.57	0.04	0.09	0.77	0.69	0.69	0.77	0.79	0.8	0.69	-0.1	-0.1	0.0	0.02
perimeter	0.07	0.06	0.07	0.05	0.19	0.24	-0.07	-0.01	0.09	0.0	0.12	0.26	0.32	-0.06	0.17	0.08	0.1	0.05	0.06	0.07	1.0	1.0	-0.1	0.17
area	0.07	0.06	0.07	0.05	0.19	0.24	-0.07	-0.01	0.09	0.0	0.12	0.26	0.32	-0.06	0.17	0.08	0.1	0.05	0.06	0.07	1.0	1.0	-0.1	0.17
RPC_10G	0.6	0.62	0.61	0.64	0.02	-0.02	0.77	0.85	0.99	0.18	0.64	0.14	0.22	0.77	0.73	0.58	0.81	0.9	0.87	1.0	0.07	0.07	0.69	0.11
P_ALFP_10G	0.71	0.73	0.72	0.75	0.04	-0.02	0.9	0.92	0.88	0.12	0.71	0.24	0.32	0.85	0.87	0.79	0.94	0.97	1.0	0.87	0.06	0.06	0.8	0.16
P_ALFC_10G	0.7	0.72	0.71	0.74	0.04	-0.02	0.92	0.95	0.91	0.12	0.7	0.19	0.28	0.88	0.85	0.8	0.94	1.0	0.97	0.9	0.05	0.05	0.79	0.16
V22_10G	0.72	0.73	0.72	0.75	0.07	-0.02	0.9	0.91	0.82	0.1	0.77	0.37	0.45	0.81	0.94	0.8	1.0	0.94	0.94	0.81	0.1	0.1	0.77	0.21
V21_10G	0.62	0.61	0.62	0.65	0.04	-0.02	0.82	0.78	0.64	0.08	0.59	0.32	0.37	0.76	0.83	1.0	0.8	0.8	0.79	0.86	0.08	0.08	0.69	0.13
V8_10G	0.68	0.68	0.68	0.69	0.08	-0.02	0.8	0.82	0.77	0.1	0.7	0.46	0.56	0.72	1.0	0.83	0.94	0.85	0.87	0.73	0.17	0.17	0.69	0.24
V7_10G	0.64	0.66	0.65	0.69	0.02	-0.02	0.89	0.85	0.77	0.1	0.46	0.04	0.17	1.0	0.72	0.76	0.81	0.88	0.85	0.77	-0.06	-0.06	0.77	0.11
V5_10G	0.1	0.1	0.1	0.1	0.02	0.0	0.17	0.08	0.24	0.04	0.46	0.84	1.0	0.17	0.56	0.37	0.45	0.28	0.32	0.22	0.32	0.32	0.09	0.03
V4_10G	0.05	0.04	0.05	0.04	0.01	0.0	0.08	0.06	0.16	-0.01	0.37	1.0	0.84	0.04	0.46	0.32	0.37	0.19	0.24	0.14	0.26	0.26	0.04	0.01
V3_10G	0.43	0.44	0.44	0.46	-0.03	-0.02	0.66	0.65	0.65	0.06	1.0	0.37	0.46	0.46	0.7	0.59	0.77	0.7	0.71	0.64	0.12	0.12	0.57	-0.01
V1_10G	0.09	0.09	0.09	0.1	-0.01	-0.01	0.12	0.11	0.17	1.0	0.06	-0.01	0.04	0.1	0.1	0.08	0.1	0.12	0.12	0.18	0.0	0.0	0.12	-0.0
RNMPR_10	0.62	0.63	0.63	0.65	0.03	-0.02	0.78	0.87	1.0	0.17	0.65	0.16	0.24	0.77	0.77	0.64	0.82	0.91	0.88	0.99	0.09	0.09	0.7	0.12
P_LIXO_10	0.75	0.76	0.75	0.78	0.06	-0.02	0.93	1.0	0.87	0.11	0.65	0.06	0.08	0.85	0.82	0.78	0.91	0.95	0.92	0.85	-0.01	-0.01	0.81	0.21
P_AGUA_10	0.63	0.65	0.64	0.68	-0.03	-0.02	1.0	0.93	0.78	0.12	0.66	0.08	0.17	0.89	0.8	0.82	0.9	0.92	0.9	0.77	-0.07	-0.07	0.85	-0.0
ocorr_2000	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.58	1.0	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.0	0.0	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.24	0.24	-0.02	0.01
ocorr_2010	0.27	0.26	0.26	0.24	1.0	0.58	-0.03	0.06	0.03	-0.01	-0.03	0.01	0.02	0.02	0.08	0.04	0.07	0.04	0.04	0.02	0.19	0.19	-0.0	0.44
DOM_OCU	0.99	1.0	1.0	1.0	0.24	-0.02	0.63	0.78	0.65	0.1	0.75	0.04	0.1	0.69	0.69	0.63	0.75	0.74	0.75	0.64	0.05	0.05	0.81	0.6
POP	1.0	1.0	1.0	1.0	0.26	-0.02	0.64	0.75	0.63	0.09	0.44	0.05	0.1	0.65	0.68	0.62	0.72	0.71	0.72	0.61	0.07	0.07	0.76	0.66
FEM	1.0	1.0	1.0	1.0	0.26	-0.02	0.65	0.76	0.63	0.09	0.44	0.04	0.1	0.66	0.68	0.61	0.73	0.72	0.73	0.62	0.06	0.06	0.77	0.65
MASC	1.0	1.0	1.0	0.99	0.27	-0.02	0.63	0.75	0.62	0.09	0.43	0.05	0.1	0.64	0.68	0.62	0.72	0.7	0.71	0.6	0.07	0.07	0.75	0.67

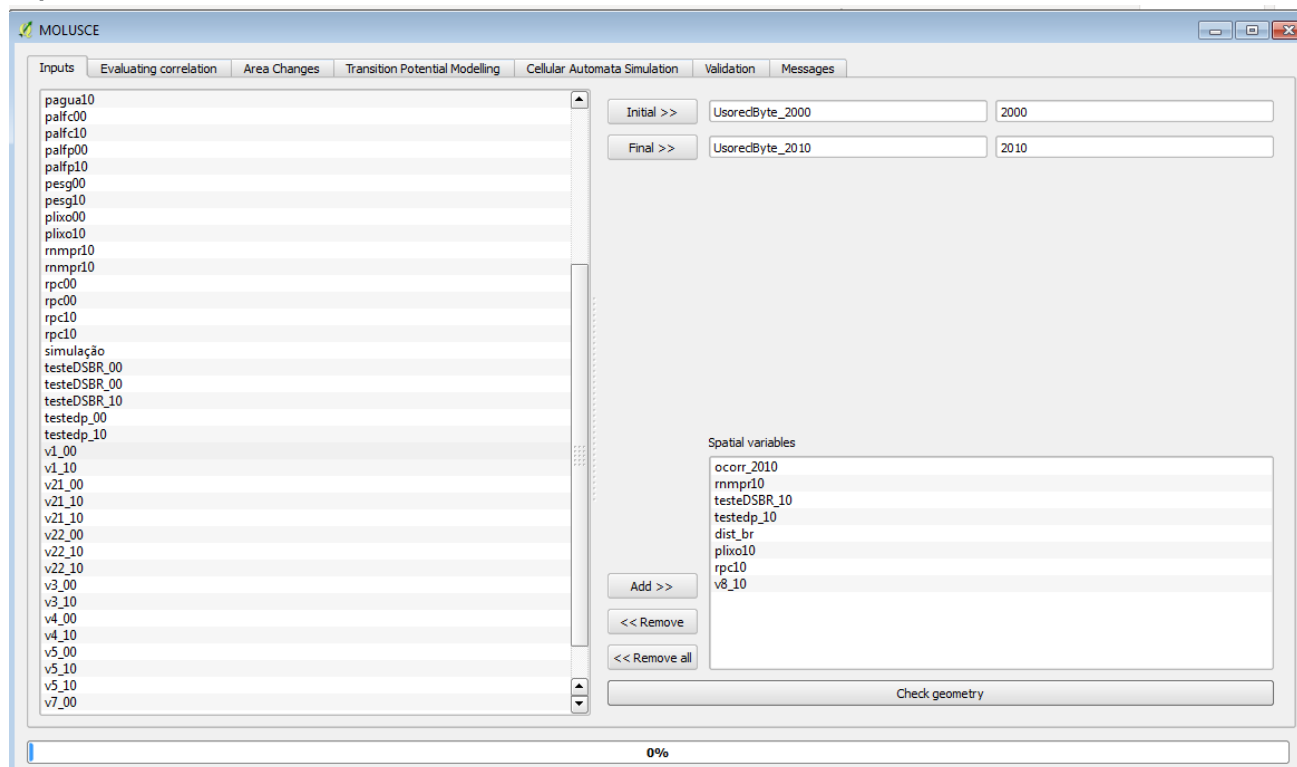
Uso do Solo em 2000, 2010 e 2018



USE OF MOLUSCE PLUGIN

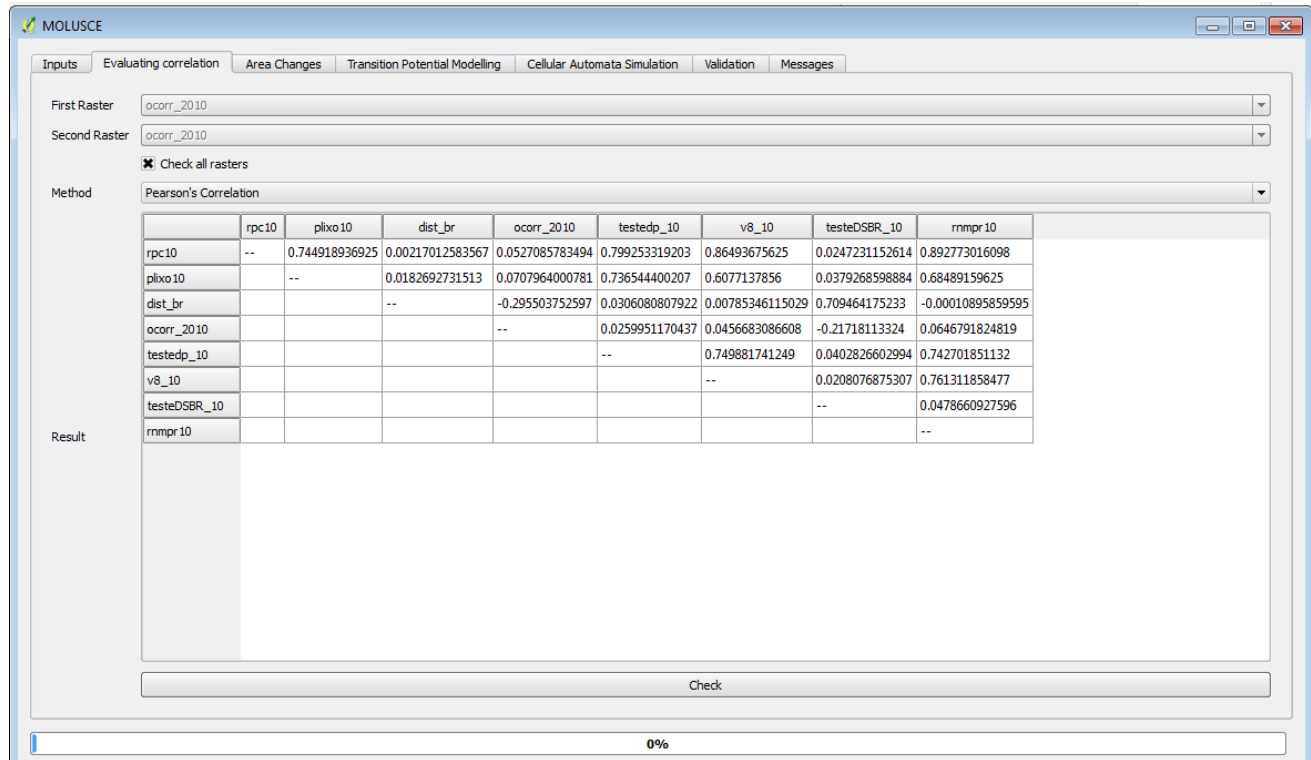
We introduced the standardized and normalized raster of socioeconomic and infrastructure variables in Qgis. We started the processing.

Input screen of the variables



The correlations present in the data were verified in tabular form, it continued to exist in the form of raster data. In front of simulations we verified which variables would be more important to explain the irregular occupations on the BR-408 highway domain ranges.

Correlation Matrix between standardized raster of socioeconomic variables.



The reclassified maps relating to the 2000 land use and occupation map (initial map) and the 2010 land use and occupation map (final map) were used to calculate the Transition Matrix (Table 03). The rates of change are obtained by calculating the transition matrix, which is the total amount of change for each type of land cover transition taking into account the time period of the simulation (time difference in years between 2000 and 2010) through a cross-tab operation.

Table 2 - Distribution of the Cells, by Land Use and Land Cover Classes, following occupation situation for the Year 2000 and 2010

Classes	2000 (ha)*	2010 (ha)*	Δ(h)	2000(%)	2010(%)	Δ (%)
1. Forestry / Non-Forestry Natural Formation	11288.00	12652.00	1364.00	9.86	11.05	1.19
2. Farming	98744.00	96036.00	-2708.00	86.27	83.91	-2.37
3. Non-Vegetated Area	3476.00	4024.00	548.00	3.04	3.52	0.48
4. bodies of water	312.00	540.00	228.00	0.27	0.47	0.20
5. Irregular Occupation	636.00	1204.00	568.00	0.56	1.05	0.50

(*) 1 ha corresponds to an area of 100 x 100 m = 10,000 m²

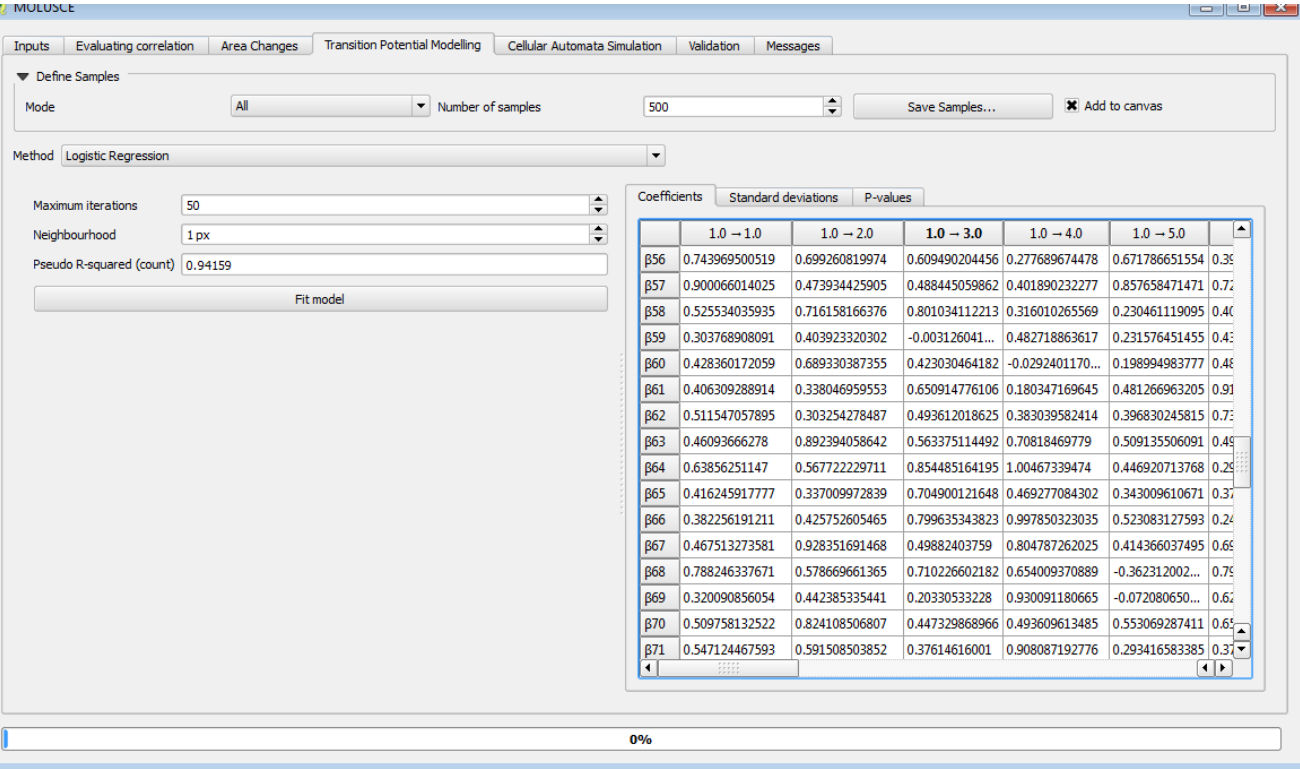
Source: Author

From this, we generate the transition matrix that seeks to explain how the transition between cells happens and their probabilities and statistics for each transition that occurs in the track in the period 2000 and 2010.

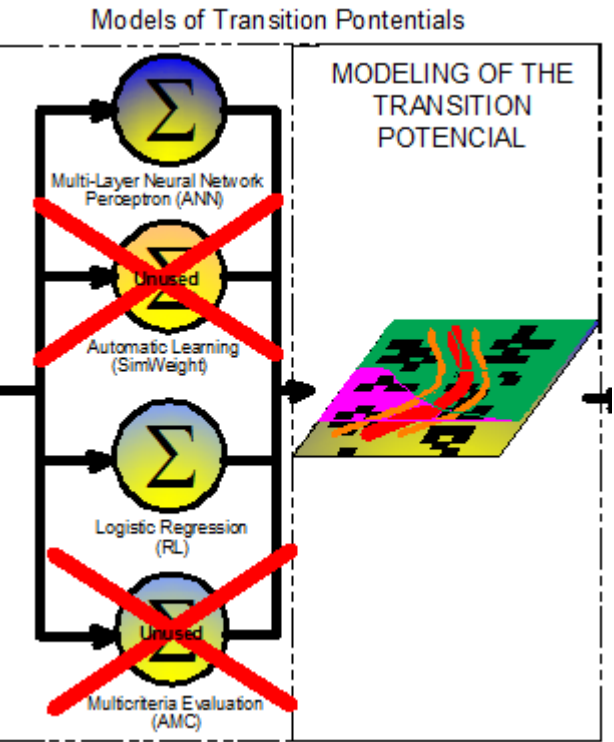
1. Forestry / Non-Forestry Natural Formation
2. Farming
3. Non-Vegetated Area
4. bodies of water

5. Irregular Occupation

Model of Transition Potentials - Parameters of the Logistic Regression Model



Choice of Transition potential models



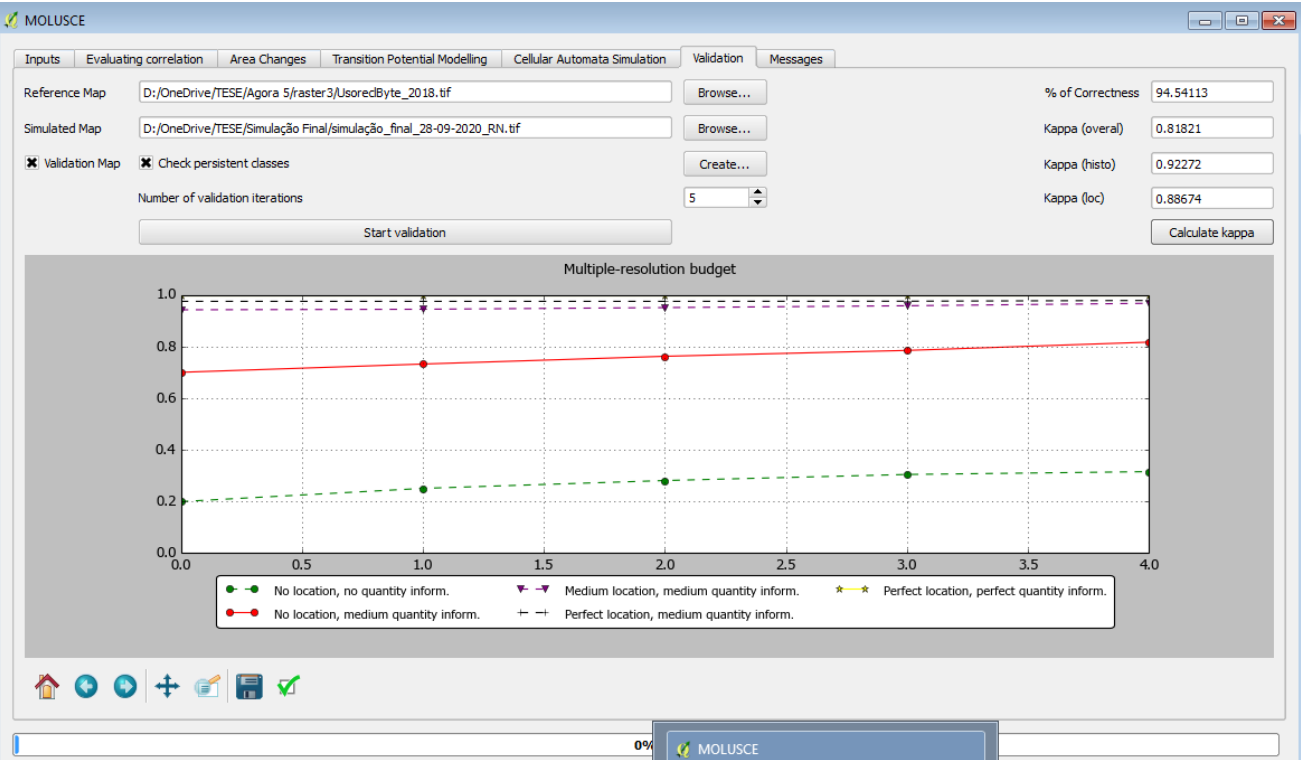
They are the Models:

- Multi-layer Neural Network Perception (ANN)

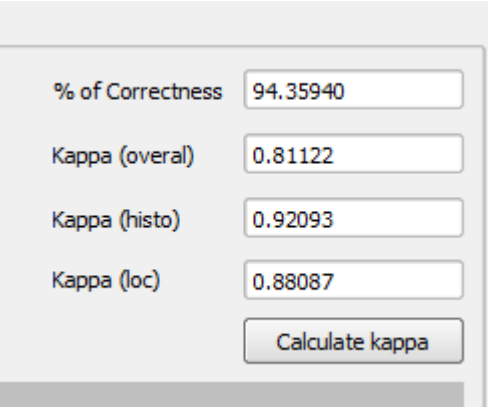
- Logistic Regressio

The models that presented the best statistical results.

Validação dos modelos de Potencial de transição



Parâmetros da Matriz Kappa para Validação dos modelos de Potencial de transição



Releases

No releases published
[Create a new release](#)

Packages

No packages published
[Publish your first package](#)

Apêndice B

B.1 - Análise Exploratória de Dados BR-104

BR104_OCUP_FAIXA_DOMINIO / README.md



ErisonBarros Update README.md



 1 contributor

stars12k

forks2.3k

tagv1.5.0

releasev1.5.0

issues515 open

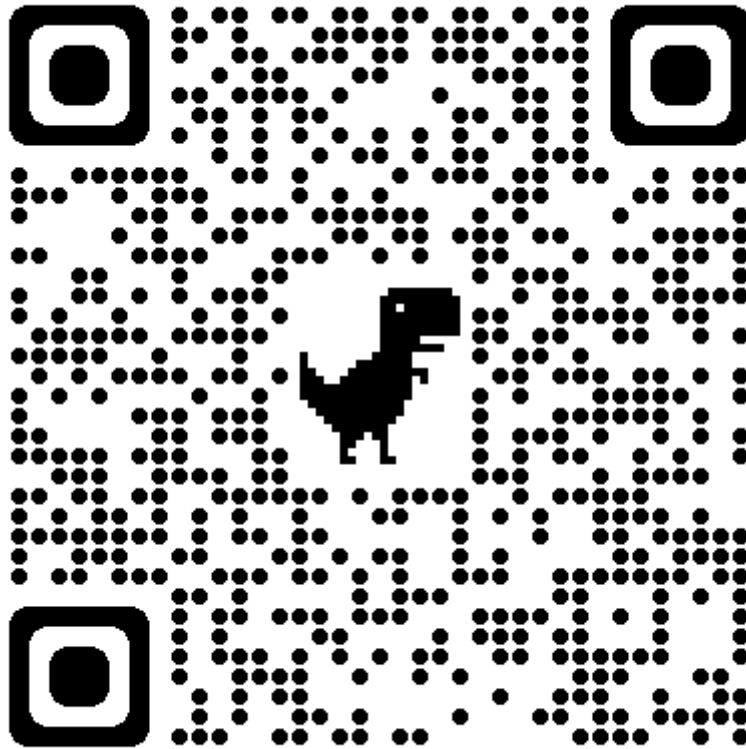
bowerno releases



Social



INTERRELATIONSHIPS BETWEEN LAND USE AND LAND COVER (LULC) AND IRREGULAR OCCUPATIONS ON HIGHWAY DOMAIN BANDS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT SPATIAL CONFIGURATIONS



Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Center for Technology and Geosciences - CTG
Graduate Program in Civil Engineering

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Poscivil)

Collaborators:

Erison Rosa de Oliveira Barros (UFPE) <https://orcid.org/0000-0003-4879-6880>

Maurício de O. Andrade (UFPE) <https://orcid.org/0000-0002-7377-7668>

Fernando Lourenço de Souza Júnior (UFPE) <https://orcid.org/0000-0002-6000-149X>

Technologies

Languages	Database	IDE	Spatial software
 PYTHON	 POSTGRESQL	 RSTUDIO	 QGIS  3.20 ODENSE
		 GOOGLE EARTH	

 253 lines (162 sloc) | 15.1 KB

...

ABSTRACT

This study aims to assess changes in LULC land use along the BR-104 road corridor located in the rural region of Pernambuco, Brazil, using data from MAPBIOMAS and the Social Vulnerability Index (IVS) for the 2000-period period. 2010 and 2010-2018. The LULC maps were generated from MapBiomass classification data, standardized Social Vulnerability Index (IVS) maps for 2000 and 2010, and images from the PE3D Project, Population Density Data for the year 2000 and 2010. The extent of Spatial landscape changes occurring in different classes of LULC were accomplished through the cross-tabulation change matrix in the Molusce module in QGIS. The results indicate that areas with high population density and housing deficit tend to have a greater possibility of suffering irregular occupations over the domain strip. The conversion of urban and rural areas into lands of irregular occupation on the BR-104 domain strip is closely associated with the increase in human activities due to population density and the higher Social Vulnerability Index – IVS, as well as the variables associated with this index. The modeled LULC maps of irregular occupations over the 2018 right-of-way were cross-validated with the planimetric survey data of the BR-104 right-of-way carried out by DNIT. In order to identify which classes had the greatest changes in the period of analysis, and whether these classes tend to occur in areas classified as highly susceptible to occupation of the highway domain lanes. It was verified in the interval of ten years that there was a loss of 35.64 km² of agricultural area in the studied region, as well as almost 16.60 km² of irregular expansion of the urban area between 2000 and 2010. This last one expanded to places with high susceptibility to irregular occupation of the Strip.

SUMMARY

- [Descriptive Statistics - Notebook](#)
- [Análise Exploratória dos Dados](#)
- [Análise Exploratória sobre a ótica Espaço Temporal](#)

- [Modelo LULC](#)
- [Análise da LULC com a ferramenta Open land R](#)

Dataset

- Zenodo



- Onedrive

[Dataset](#)

Study Area

Based on geospatial data on irregular occupations on the right of way in 2018 made available by DNIT-PE, Regional Superintendence of the State of Pernambuco, of highway BR-104 – Stretch PE located in Agreste region of the state of Pernambuco, we raised the main questions about the theme and we investigated whether physical proximity can provide positive or negative effects to this population and the nature of social interactions between residents living on the margins of this highway (Figure 03), trying to understand their behavior in relation to irregular occupations of these domains. The spatial cutout used as a laboratory for the analyzes proposed for this research is located in the rural region of Pernambuco, between Quipapá and Taquaritinga do Norte cities, with about 130 km.

https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1DKN0P84sqRZI_kq0HPbBIVsWPMW97m5o&usp=sharing

CONTENTS

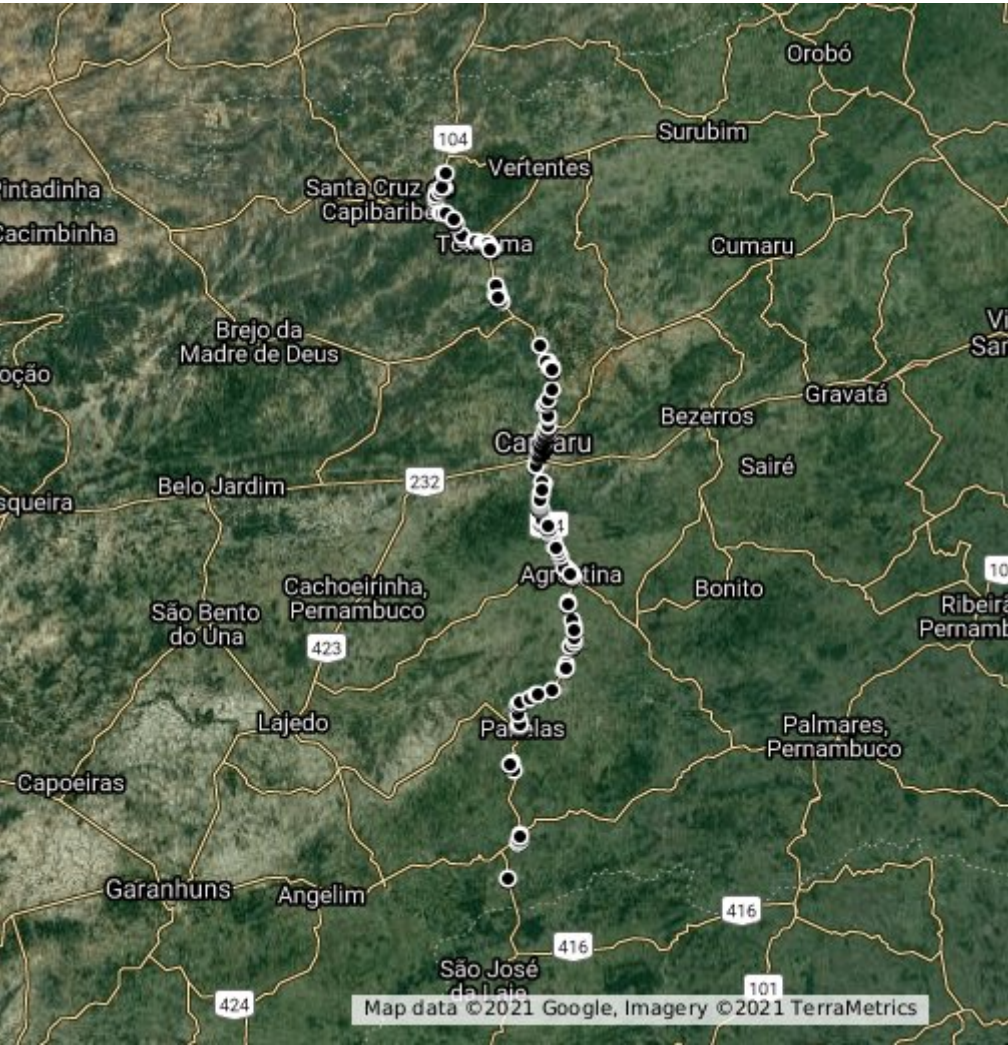
Análise Exploratória dos Dados

Realizou-se uma análise exploratória dos dados da ocorrência de ocupações irregulares sobre a faixa de domínio da BR-104. Usando os dados os dados IVS de 2010 e associado a valor de terra nua disponibilizados pelo INCRA, para verificar o comportamento do fenômeno.

Tratamento dos Dados

Analise Descritivas dos dados

Pré-Processamento dos dados



```
<iframe
src="https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?
mid=1DKN0P84sqRZI_kq0HPbBIVsWPMW97m5o" width="640" height="480">
</iframe>
```

Dynamic Map

Dynamic Map

Índice de Vulnerabilidade Social

O Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) é um indicador que permite aos governos um detalhamento sobre as condições de vida de todas as camadas socioeconômicas do país, identificando àquelas que se encontram em vulnerabilidade e risco social.

How to Calculate the IVS

De posse dos dados relativos às variáveis acima, utilizou-se a seguinte fórmula para a obtenção do IVS ainda de acordo com Goerl et al (2011):

$$IVS = \frac{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6}{V7} \quad (1)$$

Onde:

IVS - Índice de Vulnerabilidade Social

V1 - Número de moradores no setor censitário

V2 - Média de moradores por domicílio

V3 - Densidade demográfica

V4 - Soma da porcentagem da população acima de 65 e abaixo de 12 anos

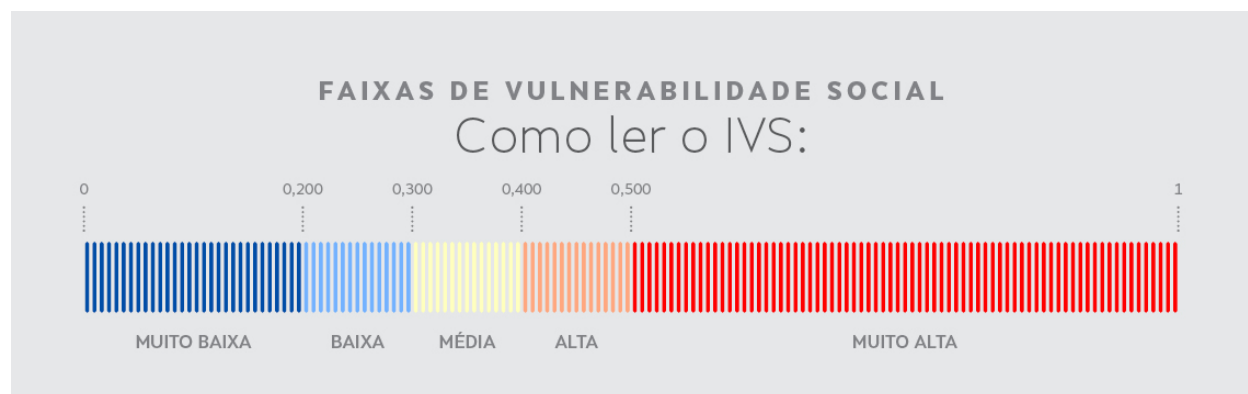
V5 - Domicílios particulares improvisados ocupados

V6 - Soma das porcentagens dos domicílios sem rendimento e com rendimento de até 1 salário mínimo

V7 - Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM).

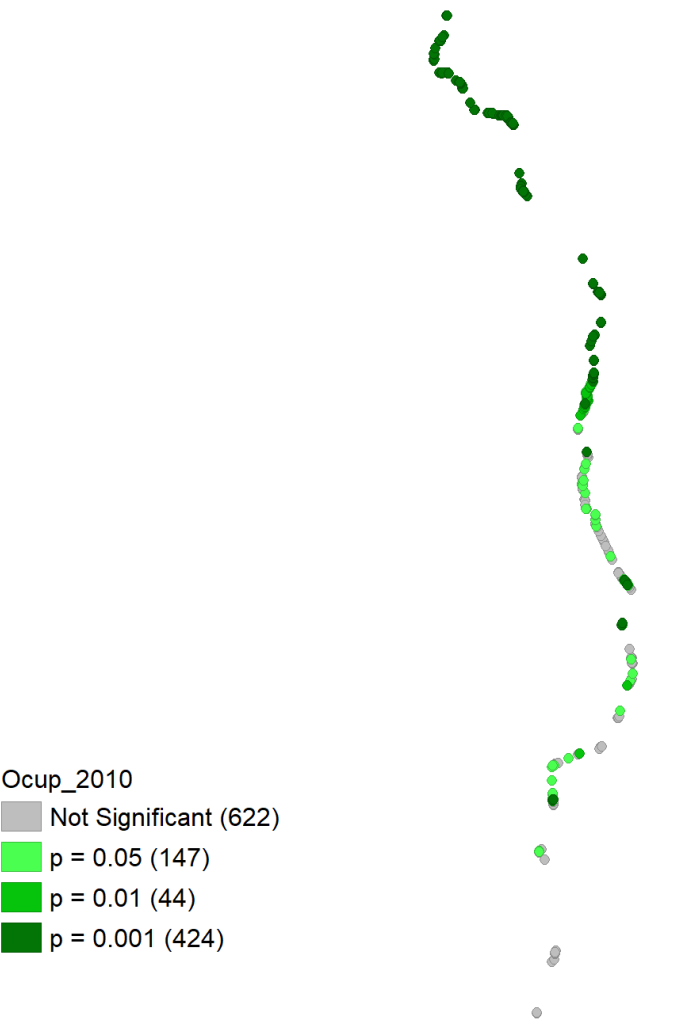
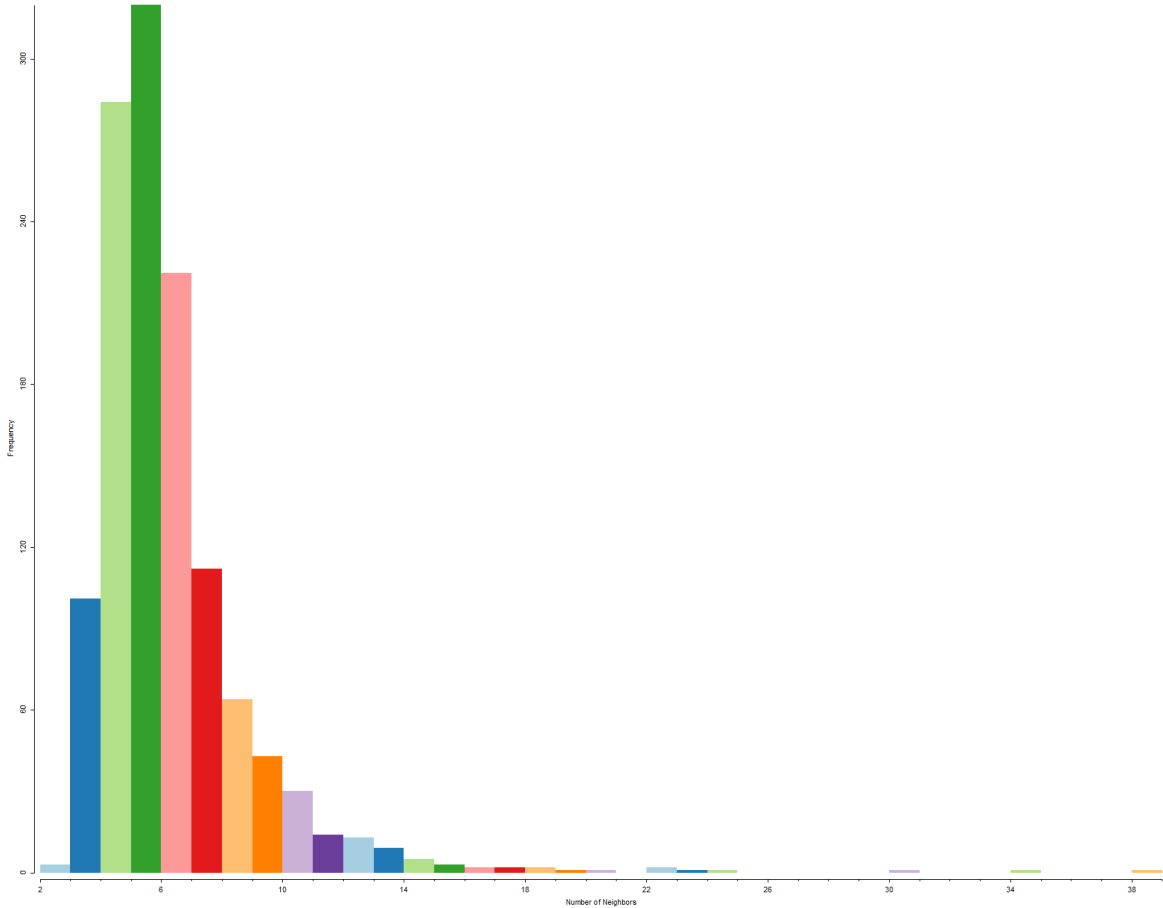
IVS Interpretation**

How to read the IVS



Analise Exploratória dos Dados Espacial " GEODA"

Localização das Ocupações

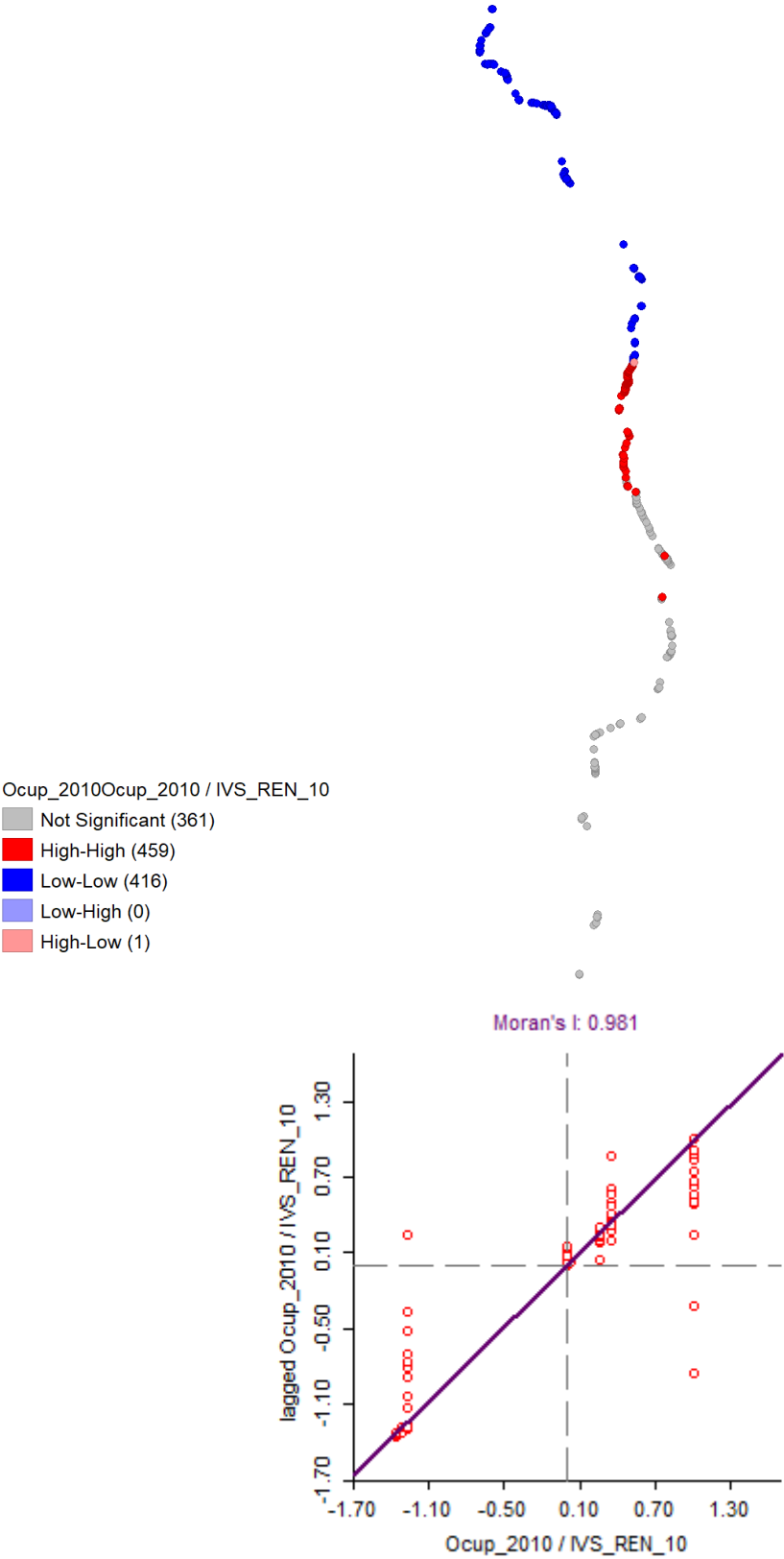


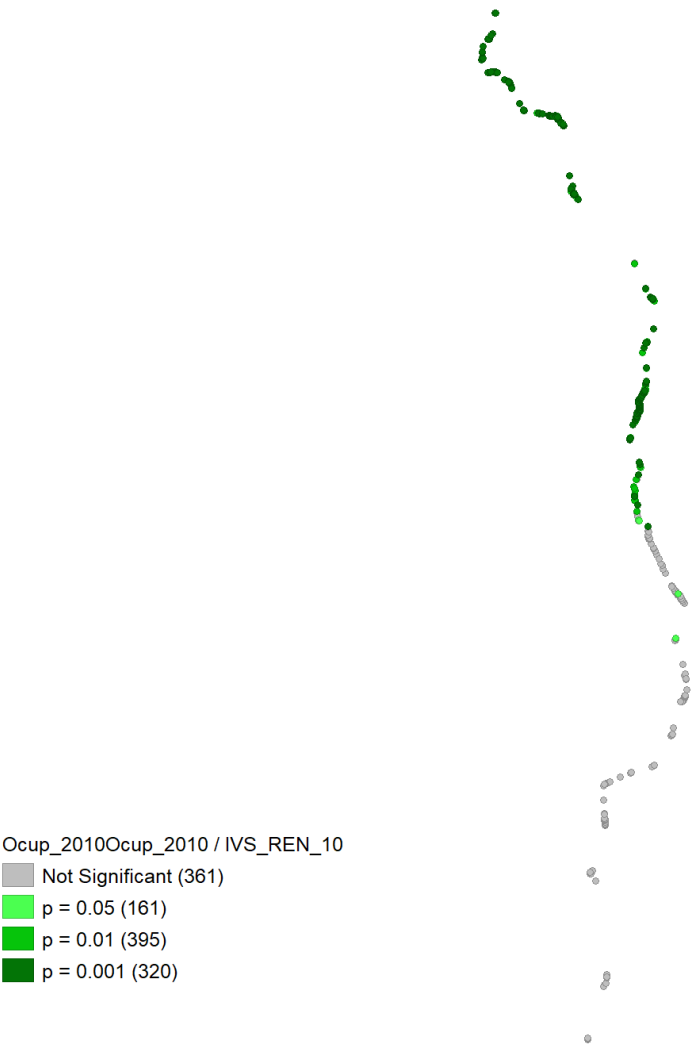
Ocup_2010

- Not Significant (622)
- p = 0.05 (147)
- p = 0.01 (44)
- p = 0.001 (424)

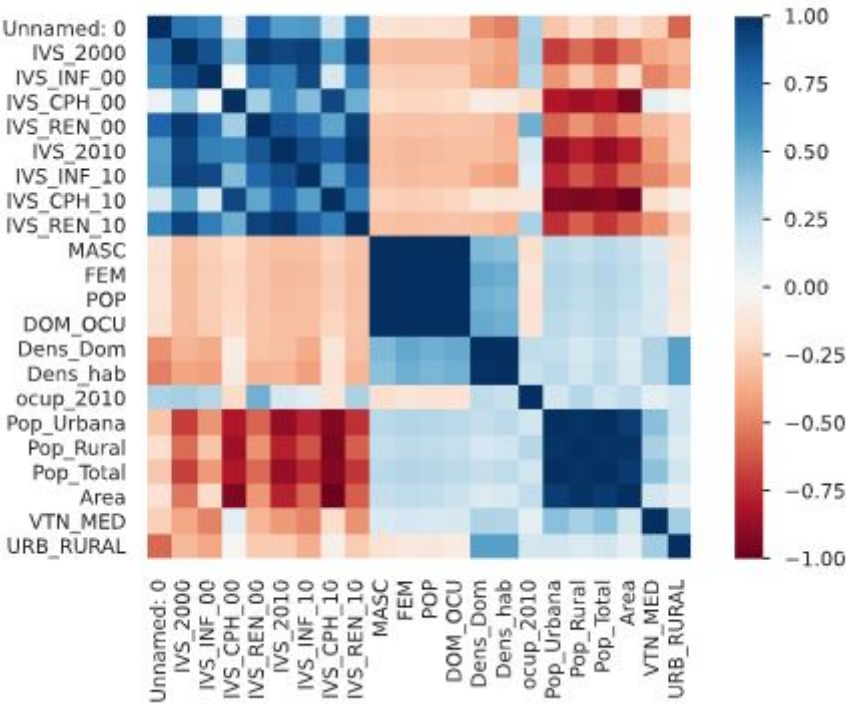
Ocup_2010

- Not Significant (622)
- High (186)
- Low (429)





Analise de Correlação entre as variáveis



<https://i.ibb.co/wN0T2jM/correla-o.jpg>

Estatísticas Descritivas da variável

ocup_2010	IVS_REN_10	Dens_hab	IVS_INF_10
-----	-----	-----	-----
	Min. :0.0000	Min. :0.0000	Min. :0.0000
	1st Qu.:0.0000	1st Qu.:0.3570	1st Qu.:0.0003
	Median :1.0000	Median :0.3570	Median :0.0053
	Mean :0.6554	Mean :0.4076	Mean :0.0059
	3rd Qu.:1.0000	3rd Qu.:0.5210	3rd Qu.:0.0097
	Max. :1.0000	Max. :0.6370	Max. :0.0188

Pelo comportamento do fenômeno como ocupação e não ocupação, usamos a regressão logística para verificarmos o comportamento das variáveis.

Análise de Regressão Logística

```
Call:
glm(formula = ocup_2010 ~ IVS_REN_10 + Dens_hab + IVS_INF_10 +
     VTN_MED, family = binomial(link = "logit"), data = dados_1)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.0195  -0.9878   0.2994   0.8543   1.3876

Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -1.142e+01  1.208e+00  -9.449  < 2e-16 ***
IVS_REN_10   2.571e+01  2.504e+00  10.270  < 2e-16 ***
Dens_hab     1.199e+02  1.341e+01   8.946  < 2e-16 ***
IVS_INF_10  -1.246e+01  4.225e+00  -2.950  0.003181 **
VTN_MED       6.002e-04  1.703e-04   3.525  0.000424 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

    Null deviance: 1603.6  on 1244  degrees of freedom
Residual deviance: 1145.9  on 1240  degrees of freedom
AIC: 1155.9

Number of Fisher Scoring iterations: 6
```

Resultados

```
=====
                        Dependent variable:
                        -----
                        ocup_2010
-----
IVS_REN_10                25.707***
                        (2.505)

Dens_hab                  119.922***
                        (13.406)

IVS_INF_10               -12.458***
                        (4.223)

VTN_MED                   0.001***
                        (0.0002)

Constant                 -11.415***
                        (1.208)

-----
Observations                1,217
Log Likelihood             -572.943
Akaike Inf. Crit.          1,155.886
=====
Note:          *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01
```

```
Start:  AIC=1155.89
ocup_2010 ~ IVS_REN_10 + Dens_hab + IVS_INF_10 + VTN_MED
```

Df Deviance AIC

```

- IVS_INF_10 1 1155.2 1163.2
- VTN_MED 1 1160.3 1168.3
- Dens_hab 1 1237.0 1245.0
<
Call:
glm(formula = ocup_2010 ~ IVS_REN_10 + Dens_hab + IVS_INF_10 +
    VTN_MED, family = binomial(link = "logit"), data = dados_1)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.0195  -0.9878   0.2994   0.8543   1.3876

Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -1.142e+01  1.208e+00  -9.449  < 2e-16 ***
IVS_REN_10   2.571e+01  2.504e+00  10.270  < 2e-16 ***
Dens_hab     1.199e+02  1.341e+01   8.946  < 2e-16 ***
IVS_INF_10  -1.246e+01  4.225e+00  -2.950  0.003181 **
VTN_MED       6.002e-04  1.703e-04   3.525  0.000424 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)
    Null deviance: 1603.6  on 1244  degrees of freedom
Residual deviance: 1145.9  on 1240  degrees of freedom
AIC: 1155.9
Number of Fisher Scoring iterations: 6

```

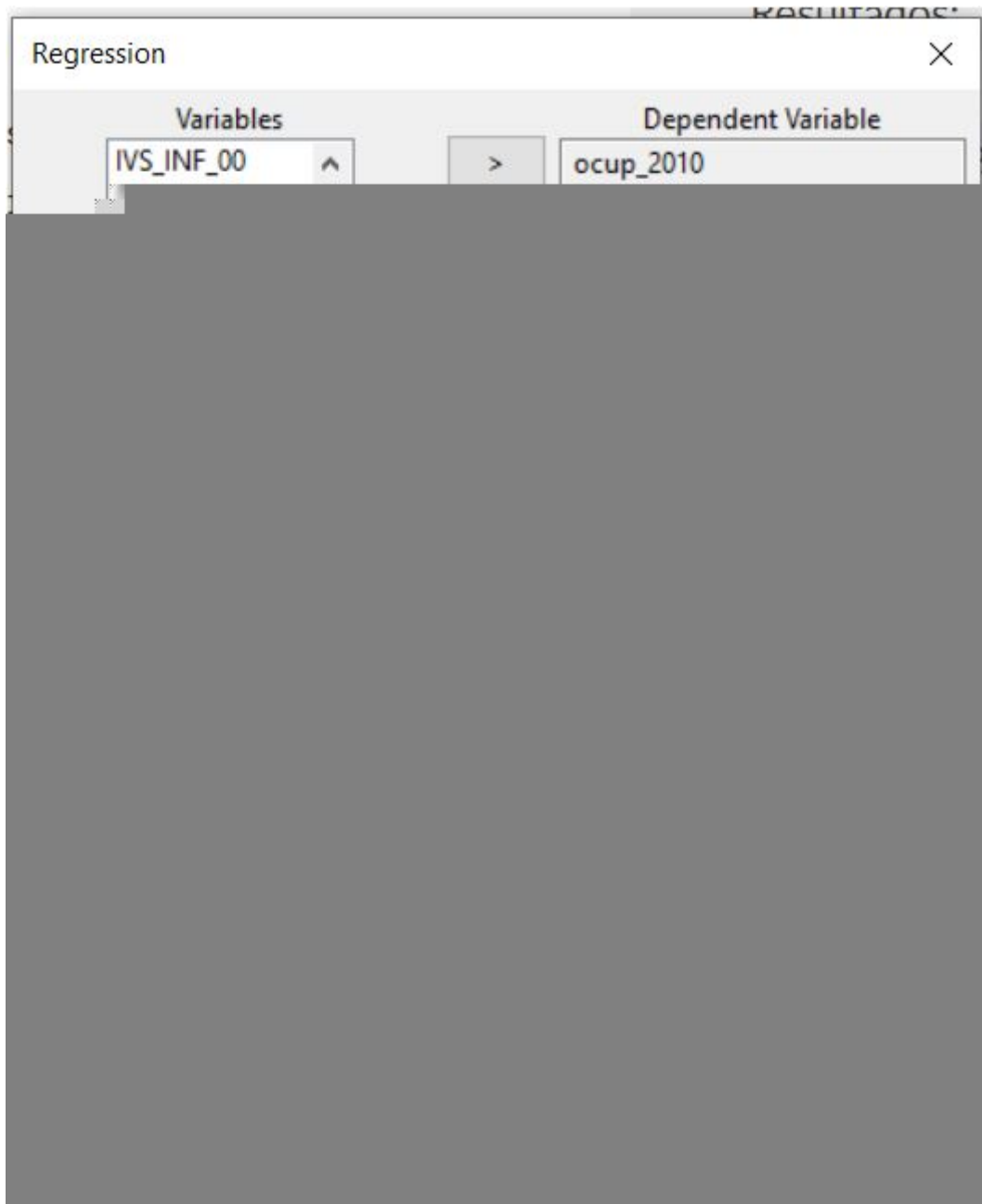
INTERVALO DE CONFIANÇA

OR	2.5 %	97.5 %
(Intercept)	1.100002e-05	8.521436e-07
IVS_REN_10	1.471015e+11	1.555463e+09
Dens_hab	1.217242e+52	7.234291e+40
IVS_INF_10	3.873378e-06	7.652878e-10
VTN_MED	1.000600e+00	1.000277e+00

VIF - Variance Inflation Factor

IVS_REN_10	Dens_hab	IVS_INF_10	VTN_MED
93.010118	7.488851	88.640871	40.398871

Pré- Processamento no GEODA



Resultados:

Resultados do Modelo:

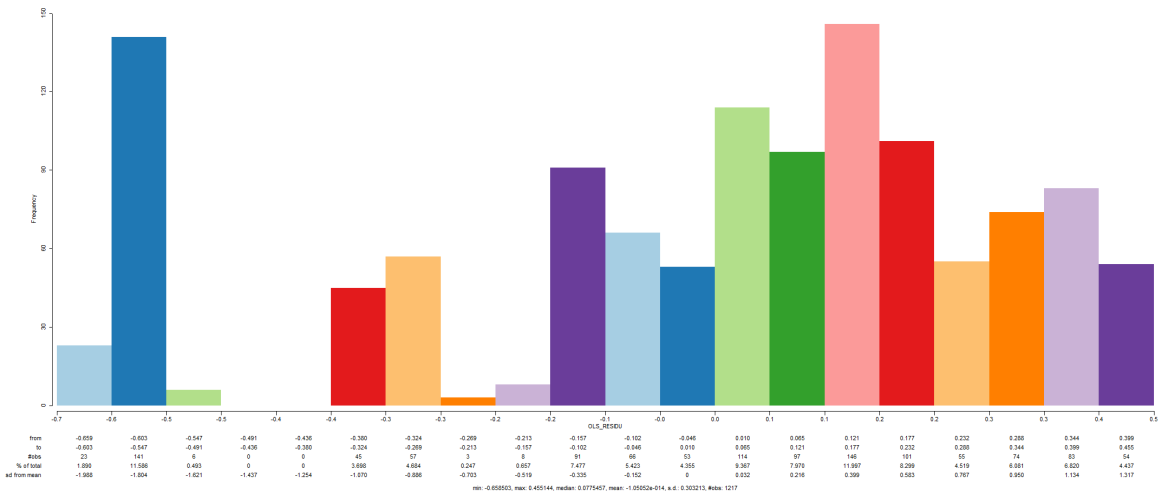
Modelo Clássico:

REGRESSION DIAGNOSTICS			
MULTICOLLINEARITY CONDITION NUMBER		28.521479	
TEST ON NORMALITY OF ERRORS			
TEST	DF	VALUE	PROB
Jarque-Bera	2	98.3484	0.00000
DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY			
RANDOM COEFFICIENTS			
TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan test	5	400.8689	0.00000
Koenker-Bassett test	5	542.0514	0.00000
SPECIFICATION ROBUST TEST			
TEST	DF	VALUE	PROB
White	20	N/A	N/A
DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE			
FOR WEIGHT MATRIX : Ocup_BR104_OF			
(row-standardized weights)			
TEST	MI/DF	VALUE	PROB
Moran's I (error)	0.8298	97.5353	0.00000
Lagrange Multiplier (lag)	1	6743.2628	0.00000
Robust LM (lag)	1	195.8184	0.00000
Lagrange Multiplier (error)	1	8554.4621	0.00000
Robust LM (error)	1	2007.0178	0.00000
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	8750.2806	0.00000

HETEROCEDASTICIDADE (Breusch-Pagan, Koenker-Basset e Teste White) Hipótese Nula: Variância é constante (Homocedasticidade), hipótese nula foi rejeitada

AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL

Índice de Moran Como salvamos os resíduos e valores previstos na tabela, podemos elaborar mapas e gráficos a partir destas informações. HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS (OLS_RESIDU)



Modelo Espacial Lag

>>03/02/21 07:02:48

REGRESSION

SUMMARY OF OUTPUT: SPATIAL LAG MODEL - MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION

```

Data set           : Ocup_BR104_OF
Spatial Weight     : Ocup_BR104_OF
Dependent Variable : ocup_2010   Number of Observations: 1217
Mean dependent var : 0.670501   Number of Variables   : 4
S.D. dependent var : 0.470031   Degrees of Freedom    : 1213
Lag coeff. (Rho)  : 0.98965

R-squared          : 0.975097   Log likelihood         : 1372.78
Sq. Correlation    : -         Akaike info criterion  : -2737.56
Sigma-square       : 0.0055018  Schwarz criterion      : -2717.14
S.E of regression  : 0.0741741

```

Variable	Coefficient	Std.Error	z-value	Probability
W_ocup_2010	0.98965	0.00374281	264.414	0.00000
CONSTANT	-0.0287685	0.0117943	-2.43919	0.01472
Dens_hab	1.50306	0.397202	3.784	

Modelo Espacial Erro

```
>>03/02/21 07:17:07
```

```
REGRESSION
```

```
-----
```

```
SUMMARY OF OUTPUT: SPATIAL ERROR MODEL - MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION
```

```
Data set           : Ocup_BR104_OF
Spatial Weight      : Ocup_BR104_OF
Dependent Variable  : ocup_2010   Number of Observations: 1217
Mean dependent var  : 0.670501   Number of Variables   : 3
S.D. dependent var  : 0.470031   Degrees of Freedom    : 1214
Lag coeff. (Lambda) : 0.993564
```

```
R-squared          : 0.975204   R-squared (BUSE)      : -
Sq. Correlation     : -         Log likelihood        : 1372.915120
Sigma-square        : 0.00547807 Akaike info criterion : -2739.83
S.E of regression   : 0.074014   Schwarz criterion     : -2724.52
```

```
-----
```

Variable	Coefficient	Std. Error	z-value	Probability
CONSTANT	0.428886	0.329676	1.30093	0.19328
Dens_Dom	40.2665	13.4178	3.00098	0.00269
Dens_hab	-9.52135	4.02931	-2.36303	0.01813
LAMBDA	0.993564	0.00264883	375.096	0.00000

```
-----
```

```
REGRESSION DIAGNOSTICS
```

```
DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY
```

```
RANDOM COEFFICIENTS
```

TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan test	2	202.5313	0.00000

```
DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE
```

```
SPATIAL ERROR DEPENDENCE FOR WEIGHT MATRIX : Ocup_BR104_OF
```

TEST	DF	VALUE	PROB
Likelihood Ratio Test	1	4245.7708	0.00000

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

	Regressão Simples	Regressão "Espacial Error"
logLikelihood	-274.077	1372.915120
Akaike Info	560.154	-2739.83
Schwarz criterionCriterion	590.779	-2724.52

Regressão Spatial Error: Autocorrelação dos Resíduos Space > Univariate Local

Moran's I > ERRS_RESIDU

Regressão "Spatial Lag"

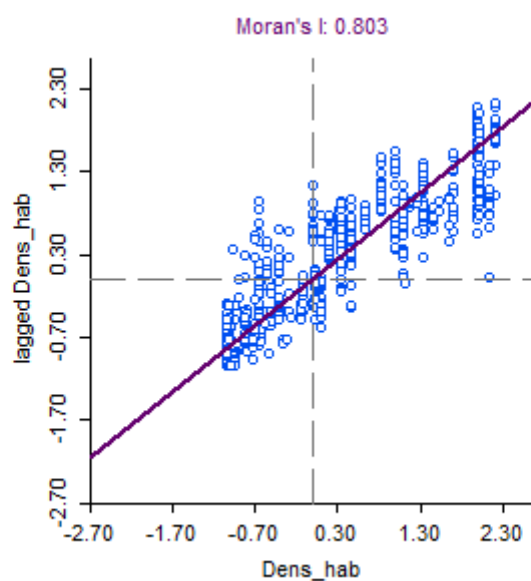
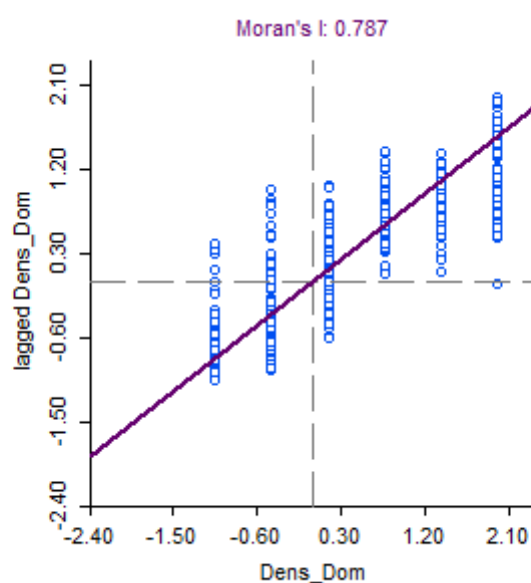
	Regressão Simples	Regressão "Espacial Error"	Regressão "Espacial Lag"
logLikelihood	-274.077	1372.915120	1372.78

	Regressão Simples	Regressão "Espacial Error"	Regressão "Espacial Lag"
Akaike InfoCriterion	560.154	-2739.83	-2737.56

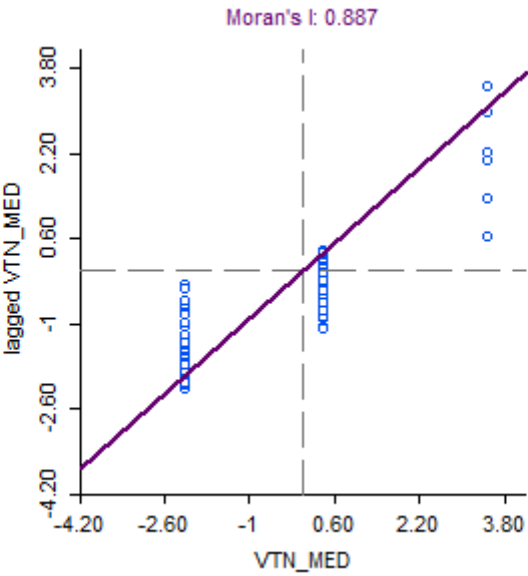
Conclusões

Verificações da Dependência Espacial

- ☐ Verificou-se forte dependência espacial da variável densidades populacional e densidade de Domicílios.

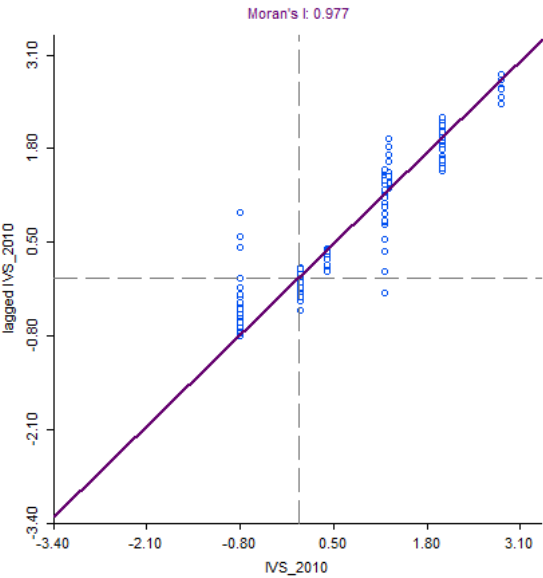


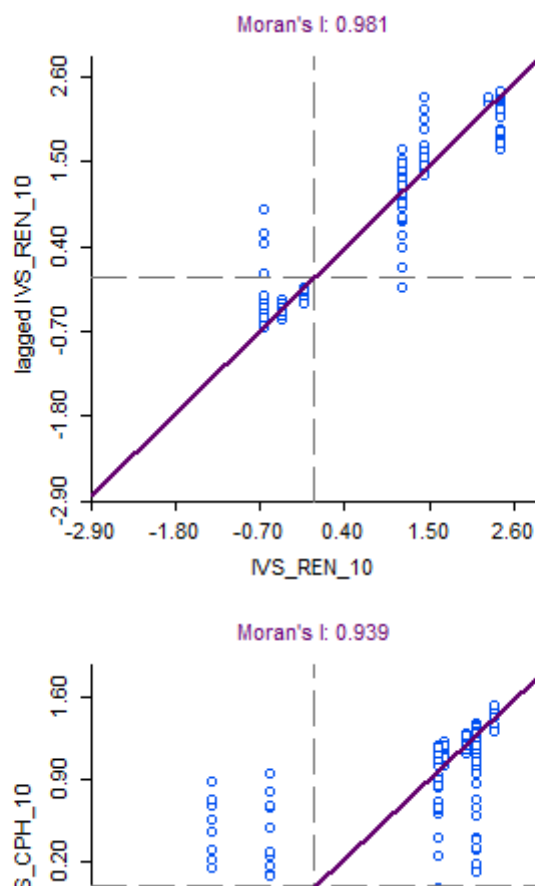
- ☐ Verificou-se forte dependência espacial da variável Valor da Terra Nua.



- []

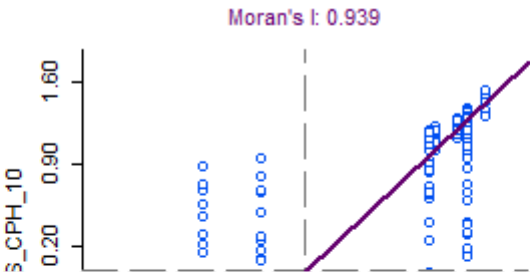
Verificou-se forte dependência espacial da variável IVS , assim como sua componentes (Renda, Infraestrutural, Social).



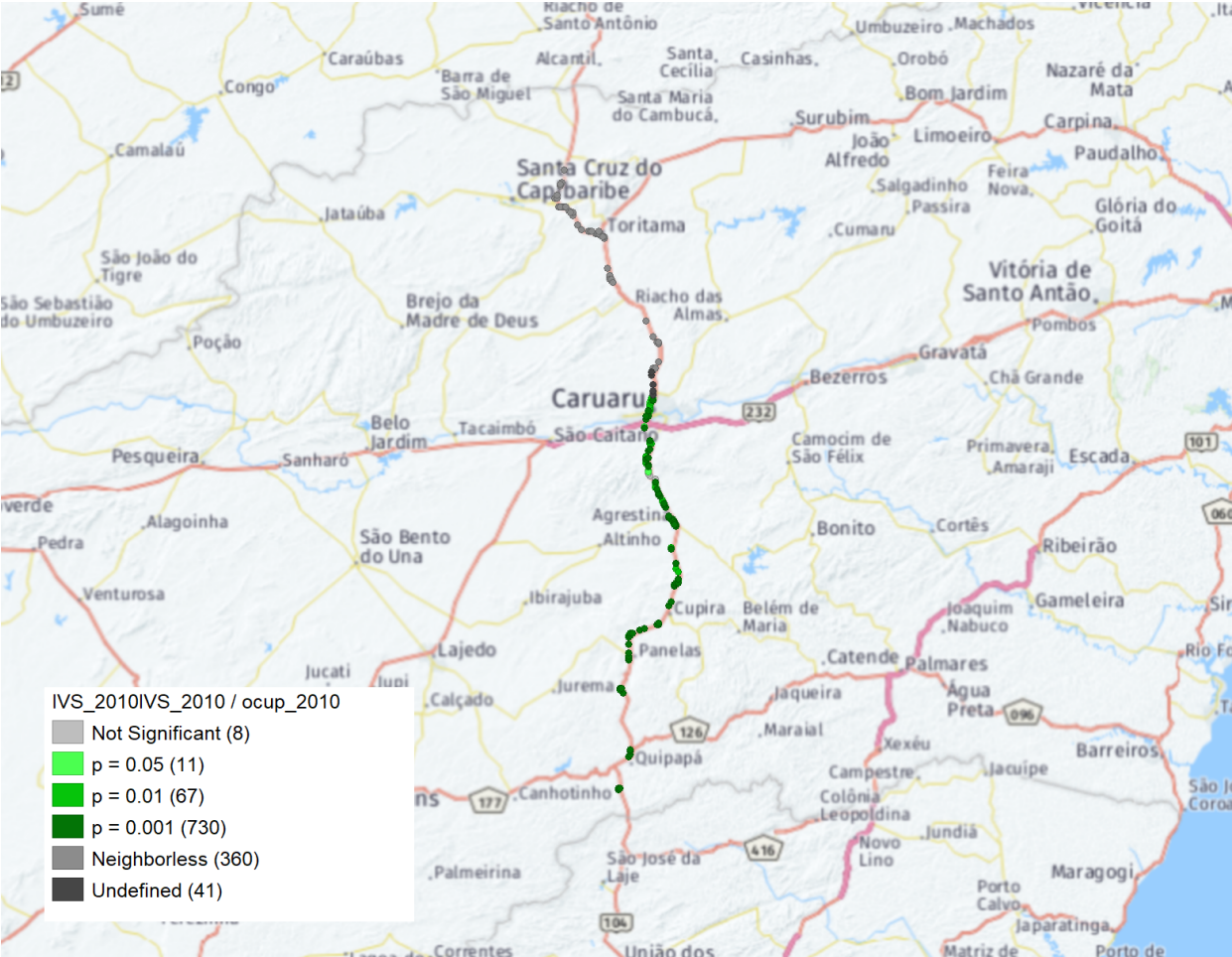


Verificações da Dependência Espacial em Relação a Variável Ocupação no ano de 2010

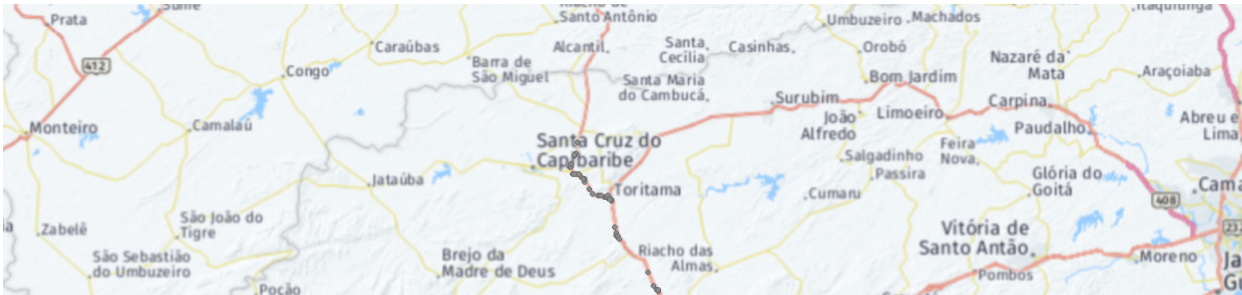
- ☐ Verificou-se forte dependência espacial da variável IVS com as Ocupações Irregulares.



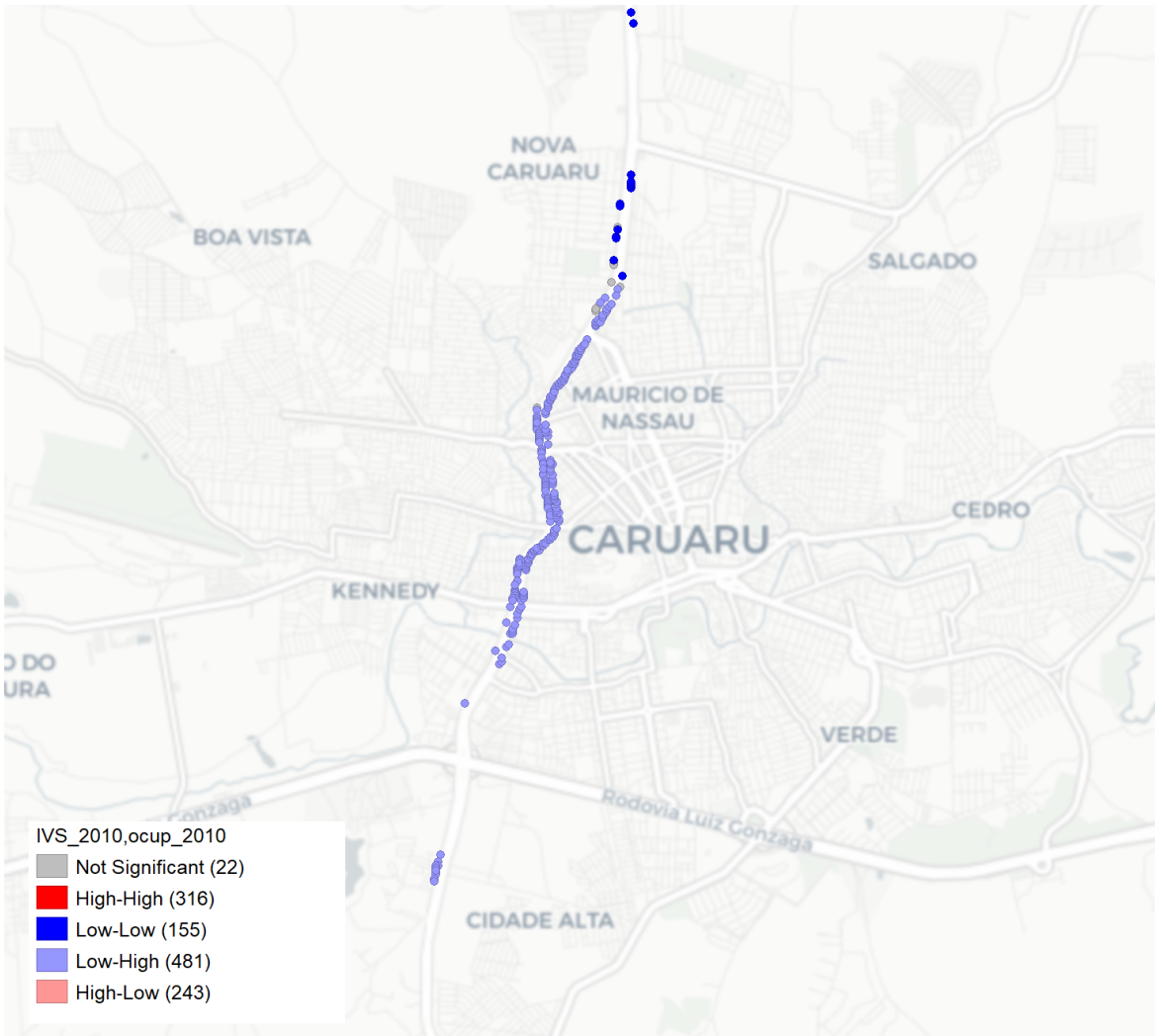
Verifica-se grade significância Estatística da dependência espacial na áreas de travessia urbana, principalmente na cidade de Caruaru-PE.



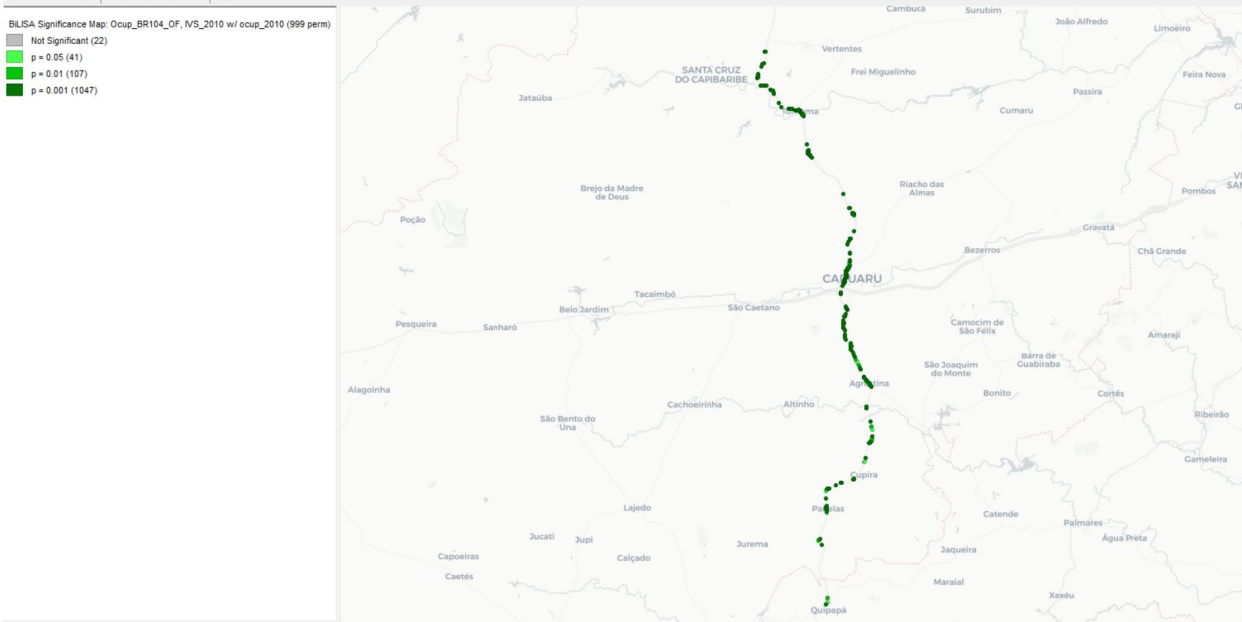
Verifica-se que nas regiões de travessia urbana temos a grande número de ocorrências de baixo IVS com alto número de ocupações irregulares.



Destaque Caruaru-PE



Correlação Espacial Bivariada



Analise de Cluster

Configuração de Cluster

Input:

Select Variables

field_1

xcoord

ycoord

IVS_2000

IVS_INF_00

IVS_CPH_00

IVS_REN_00

IVS_2010

IVS_INF_10

IVS_CPH_10

IVS_REN_10

MASC

FEM

POP

DOM_OCU

Dens_Dom

☐ Use geometric centroids

Auto Weighting

Weighting: 0 1 1

Parameters:

Number of Clusters: 5

Minimum Bound: 1 10%

Transformation: Standardize (Z)

Initialization Method: KMeans++

Initialization Re-runs: 150

Use specified seed: ☒ Change Seed

Maximum Iterations: 1000

Distance Function: Euclidean

Output:

Save Cluster in Field: CL

Run

Close

Summary

Method: KMeans

Number of clusters: 5

Initialization method: KMeans++

Initialization re-runs: 150

Maximum iterations: 1000

Transformation: Standardize (Z)

Distance function: Euclidean

Cluster centers:

	IVS_2000	Dens_hab
IC1	0.444081	0.00145615
IC2	0.444113	0.00907954
IC3	0.577733	0.000256092
IC4	0.440134	0.0161758
IC5	0.585857	0.0061463

The total sum of squares: 2432

Within-cluster sum of squares:

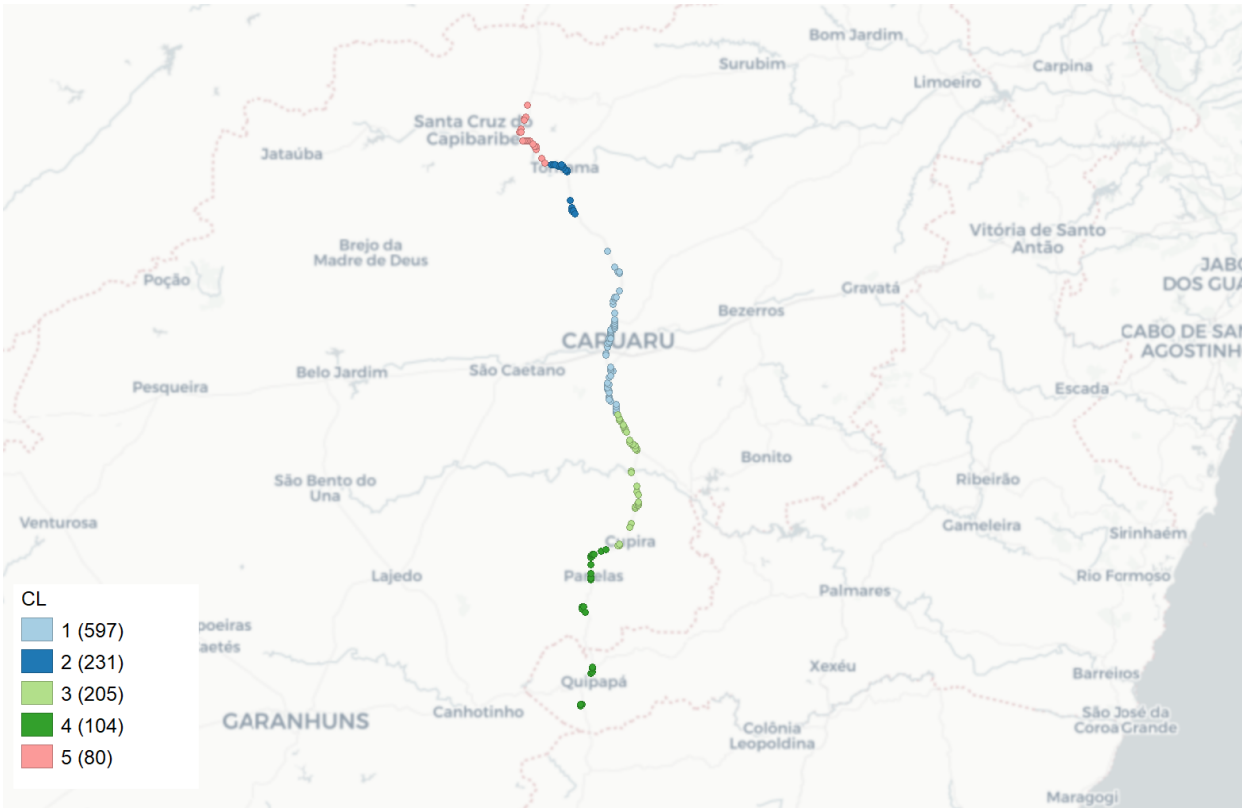
	Within cluster S.S.
IC1	19.347
IC2	33.7695
IC3	62.6024
IC4	27.0267
IC5	8.47638

The total within-cluster sum of squares: 151.222

The between-cluster sum of squares: 2280.78

The ratio of between to total sum of squares: 0.93782

Mapa de Cluster Kmeans



Apêndice B

B.2 - Modelo LCM da BR-104

BR104_OCUP_FAIXA_DOMINIO / README3.md



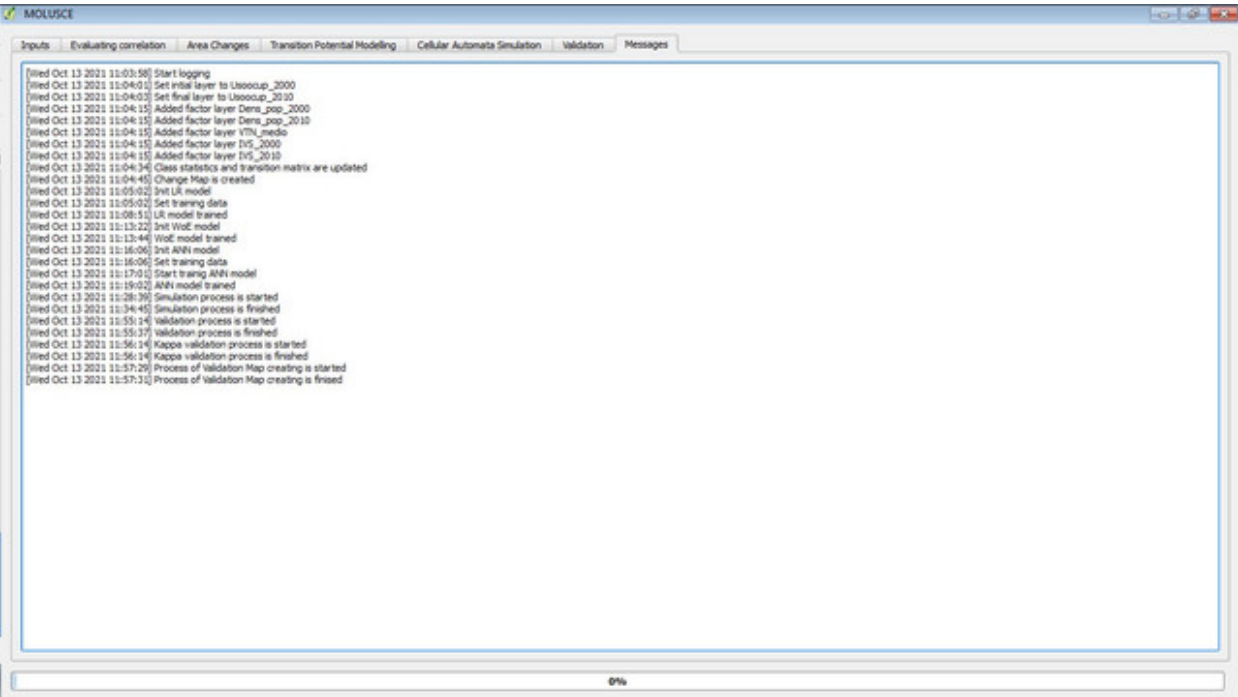
ErisonBarros Create README3.md ✓



1 contributor

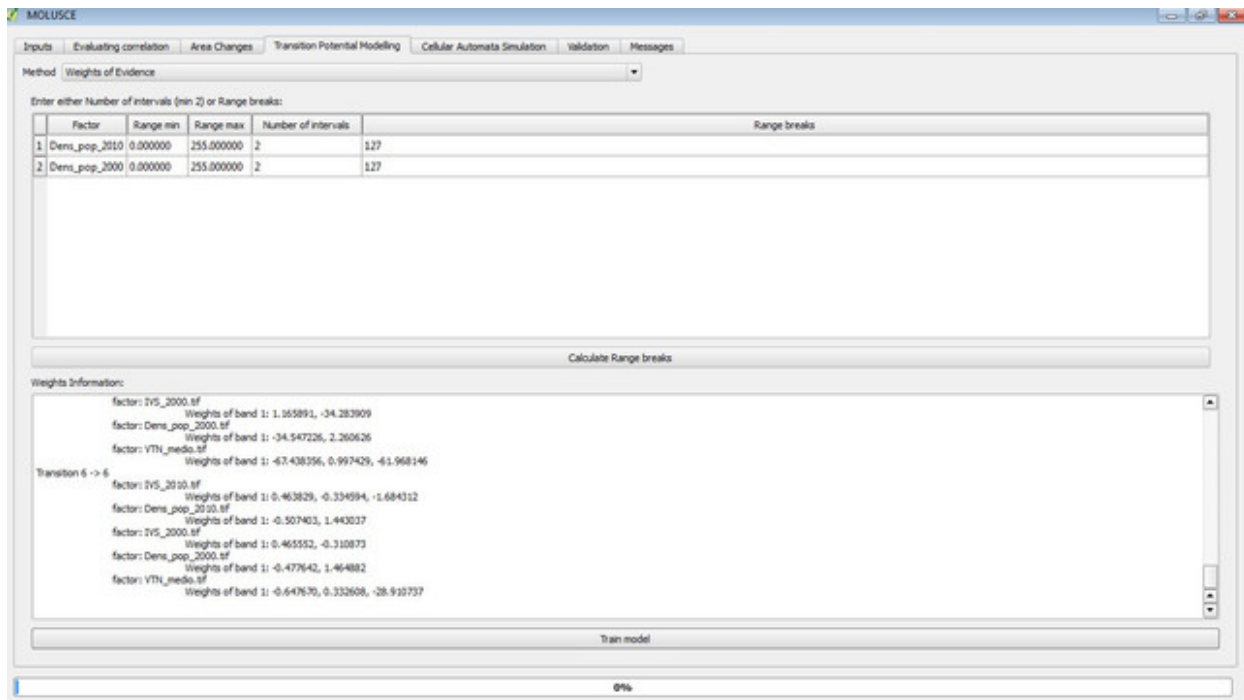
13 lines (8 sloc) | 772 Bytes

Modelo LULC matriz de Tranisção -
Regressão Logistica

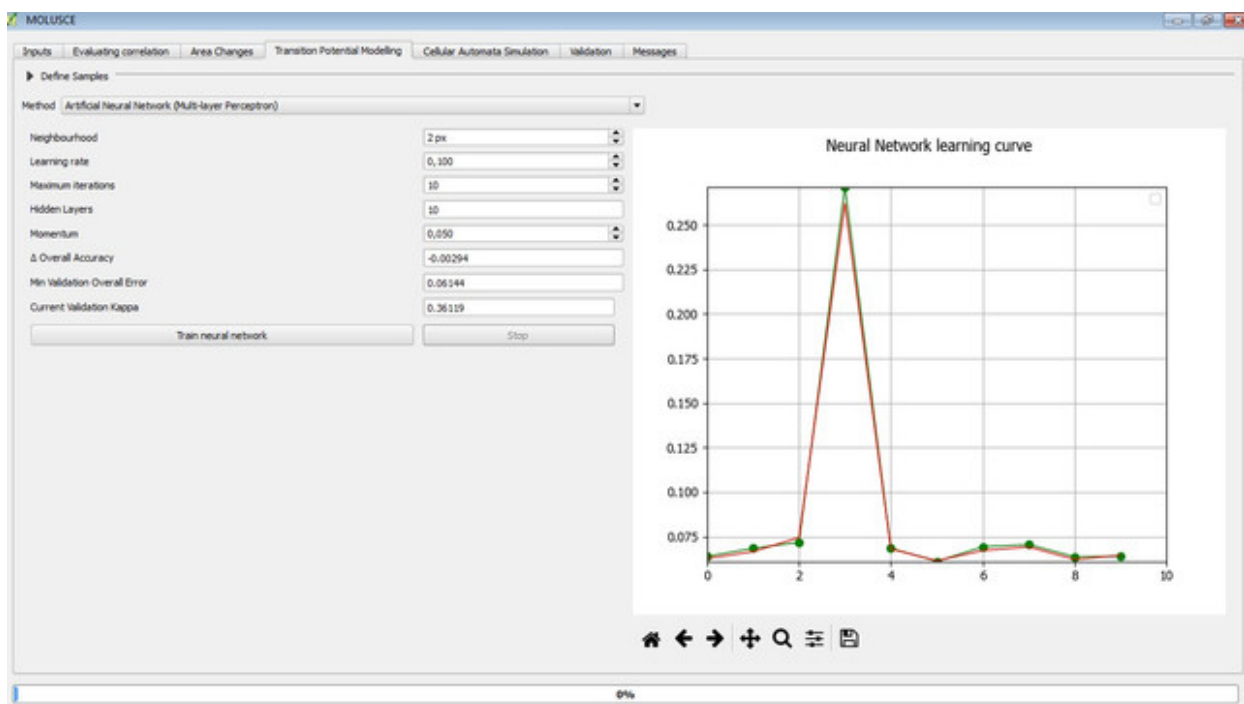


Screenshot-1Valida-o-do-Modelo

Modelo LULC matriz de Tranisção - Peso
das Evidencias



Modelo LULC matriz de Transição - Rede Neural



Apêndice C

C.1 - Análise Exploratória de Dados BR-101

 ErisonBarros / Repositorio_BR101

Public

https://erisonbarros.github.io/Repositorio_BR101/

☆ 0 stars

🍴 0 forks

☆ Star

▼

👁 Unwatch ▼

Code

Issues

Pull requests

Actions

Projects

Wiki

Security

Insights

Settings

🔑 erison.barros ▼

...

 ErisonBarros ...

✖ 7 hours ago

🕒

View code

DOI - 10.5281/zenodo.6975391

DOI 10.5281/zenodo.6975391

stars

12k

forks

2.3k

tag

v1.5.0

release

v1.5.0

issues

515 open

bower

no releases

Redes Sociais

 GITHUB

 LINKEDIN

--

MODELAGEM DO USO E COBERTURA DO SOLO DAS MARGENS DA BR-101/PE: OCUPAÇÕES IRREGULARES SOBRE A FAIXA DE DOMÍNIO

https://github.com/ErisonBarros/Repositorio_BR101#readme

1/5



Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Center for Technology and Geosciences - CTG
Graduate Program in Civil Engineering

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Poscivil)

Collaborators:

Erison Rosa de Oliveira Barros (UFPE) <https://orcid.org/0000-0003-4879-6880>

☰ README.md



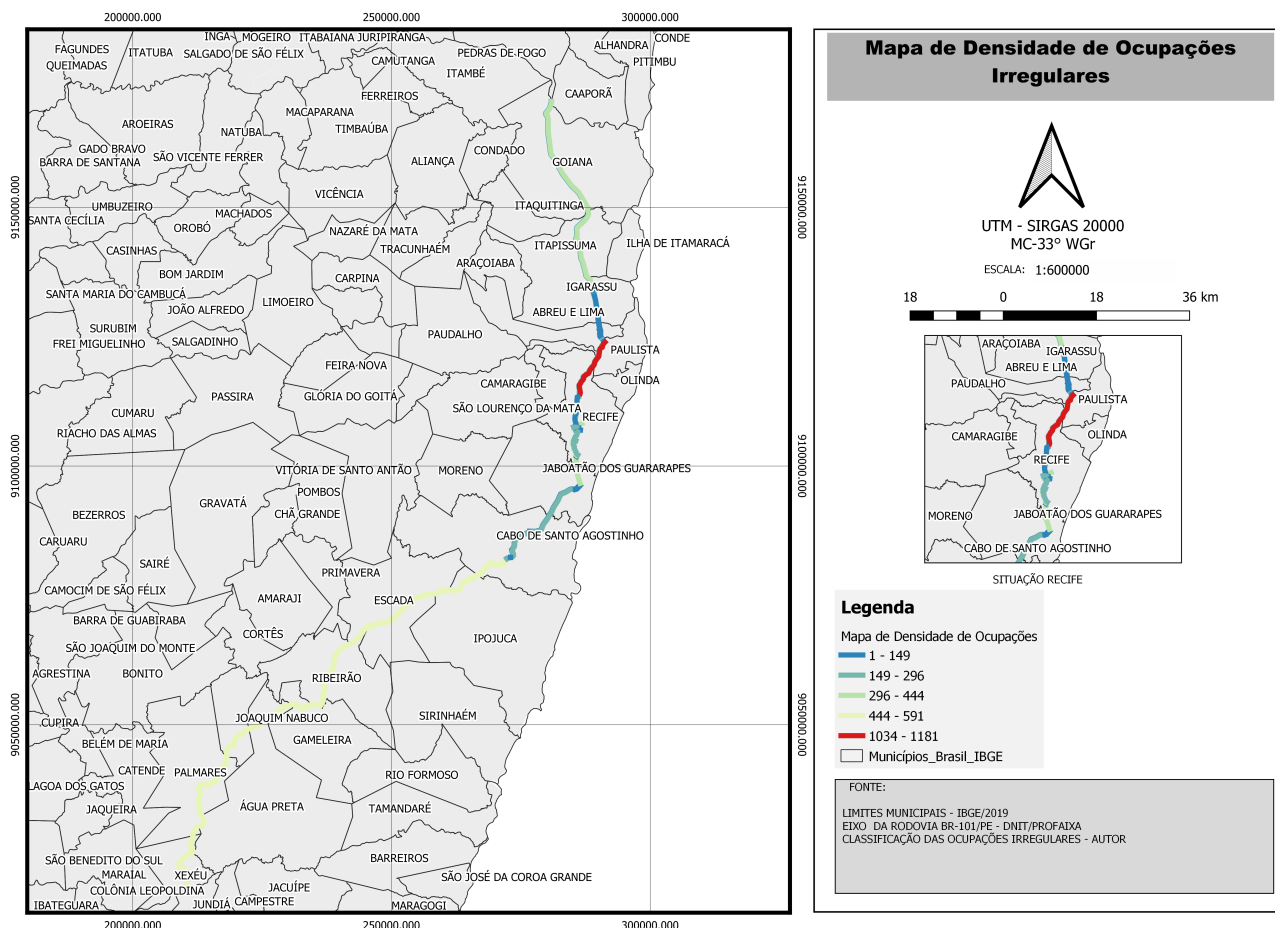
Fernando Lourenço de Souza Júnior (UFPE) <https://orcid.org/0000-0002-6000-149X>

RESUMO:

A obtenção de informações sobre as condições das faixas de servidão nas rodovias brasileiras representa uma necessidade primordial na prevenção de ocupações irregulares nas mesmas. Para minimizar os riscos associados à ocupação irregular das faixas de domínio, decorrentes de processos antrópicos relacionados ao uso e cobertura do solo, é necessário o monitoramento das áreas próximas às rodovias. Nesse sentido, modelos matemáticos baseados em autômatos celulares podem ajudar a entender o impacto das mudanças no uso e/ou cobertura do solo e prever mudanças futuras nas margens das rodovias. A área de estudo compreende a rodovia BR-101/PE, localizada na Zona da Mata Pernambucana, Brasil, e tem como objetivo avaliar o crescimento urbano das áreas cortadas pela rodovia, assim como estudar e espacilização das ocupações, gerando um cenário anual de cobertura do solo para o período de 10 anos. A modelagem realizada nesta pesquisa utilizou como insumo mapas de cobertura do solo dos anos de 2000 e 2010, obtidos por meio do Projeto Mapbiomas. Quatro variáveis (Densidade Populacional, Valor de Terra Nua, Índice de Vulnerabilidade social e Distância a BR) foram estudadas foram utilizadas para explicar as mudanças na cobertura do solo nas margens da Rodovia BR-101/PE. Para a calibração do Modelo foi utilizado o método Rede Neural Artificial e Regressão Logística. O modelo foi validado pelo teste de concordância Kappa. Os resultados mostram que o cenário gerado apresenta caso não haja ações integradas nos próximos 40 anos. Esse aumento tem a contribuição de células que estavam em estágio inicial como classe Floresta/Formação Não Florestal, Agricultura e área não vegetada. Os resultados da modelagem apontam para o crescimento das ocupações nas áreas periféricas das cidades cortadas pela rodovia em estudo.

Palavras-chave: Faixa de Domínio de Rodovia, Ocupação Irregular, Modelos Dinâmicos.

Localização da Área de Estudo



PUBLICAÇÃO:

Repositório da BR-101

Para acessar o resumo dos dados da pesquisa é necessário acessar o link:

<https://zenodo.org/record/6975391#.YvGIOHbMK3A>

- [Análise Exploratória 1](#)
- [Análise Exploratória 2](#)
- [Estatísticas de Análise de Mudanças de uso e Cobertura](#)
- [Mapa de Densidade de Ocupações Irregulares](#)
- [Métricas de Paisagem \(fragstats4.2\)](#)
- [Relatório de Processamento Molusce](#)
- [Modelos LCM](#)

- [ANN](#)
- [LOGIT REGRESSION](#)
- [SIMULAÇÃO 2030](#)

Releases 1

 **v1.0** Latest

14 hours ago

Packages

No packages published
[Publish your first package](#)

Environments 1

 **github-pages** Active

Languages



▼ Análise Exploratória dos Dados

Relatório de perfil do Pandas

Visão geralVariáveisInteraçõesCorrelaçõesValores ausentesAmostra

uso_00

Catégorico

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

Distinto	5
Distinto (%)	0,1%
Ausente	0
Ausente (%)	0,0%
Tamanho da memória	55,7 KIB

4,0

3,0

1,0

2,0

5,0

4530

2475

92

10

5

Alternar detalhes

Visão geral

Categorias

Palavras

Personagens

Valor	Contar	Frequência (%)
4,0	4530	63,7%
3,0	2475	34,8%
1,0	92	1,3%
2,0	10	0,1%
5,0	5	0,1%

uso_00

Catégorico

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

Distinto	5
Distinto (%)	0,1%
Ausente	0
Ausente (%)	0,0%
Tamanho da memória	55,7 KIB

4,0

3,0

1,0

2,0

5,0

4530

2475

92

10

5

Alternar detalhes

Visão geral

Categorias

Palavras

Personagens

Valor	Contar	Frequência (%)
4,0	4530	63,7%
3,0	2475	34,8%
1,0	92	1,3%
2,0	10	0,1%
5,0	5	0,1%

uso_10

Catégorico

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

HIGH CORRELATION

Distinto	4
Distinto (%)	0,1%
Ausente	0
Ausente (%)	0,0%
Tamanho da memória	55,7 KIB

4,0

3,0

1,0

2,0

5101

1939

68

4

Alternar detalhes

Visão geral

Categorias

Palavras

Personagens

Comprimento

Caracteres e Unicode

Exclusivo

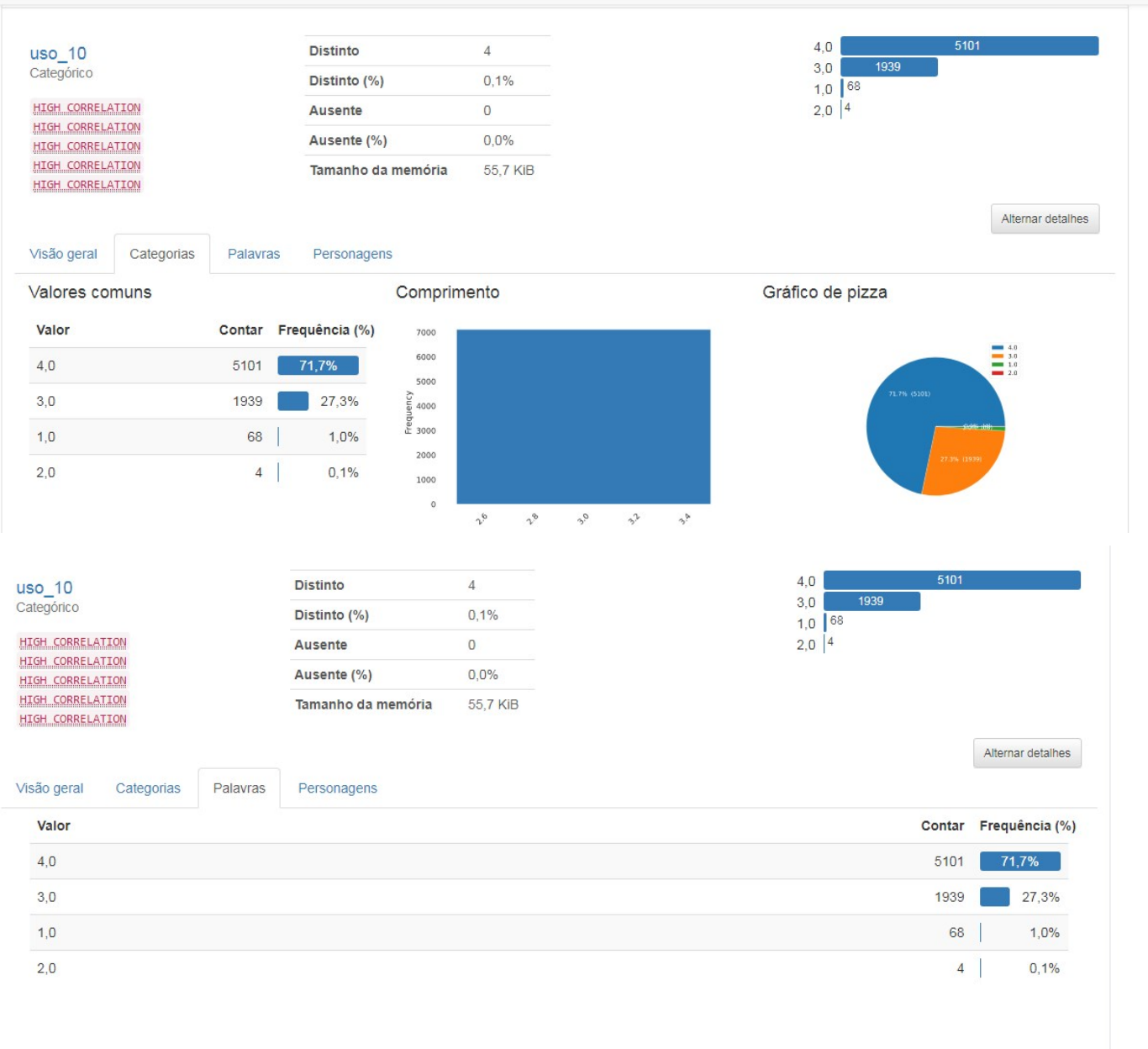
Amostra

comprimento máximo	3
Comprimento médio	3
Comprimento médio	3
Comprimento mínimo	3

Total de caracteres	21336
Caracteres distintos	6
Categorias distintas	2
Scripts distintos	1
Blocos distintos	1

Exclusivo	0
Exclusivo (%)	0,0%

1ª linha	3,0
2ª linha	3,0
3ª linha	3,0
4ª linha	3,0
5ª linha	3,0



Visão geral

Categorias

Palavras

Personagens

Valores comuns

Comprimento

Gráfico de pizza

Valor

Contar

Frequência (%)

4,0

5101

71,7%

3,0

1939

27,3%

1,0

68

1,0%

2,0

4

0,1%

Frequency

7000

6000

5000

4000

3000

2000

1000

0

2,6

2,8

3,0

3,2

3,4

4,0

5101

3,0

1939

1,0

68

2,0

4

71,7% (5101)

27,3% (1939)

1,0% (68)

0,1% (4)

Alternar detalhes

Visão geral

Categorias

Palavras

Personagens

Valor

Contar

Frequência (%)

4,0

5101

71,7%

3,0

1939

27,3%

1,0

68

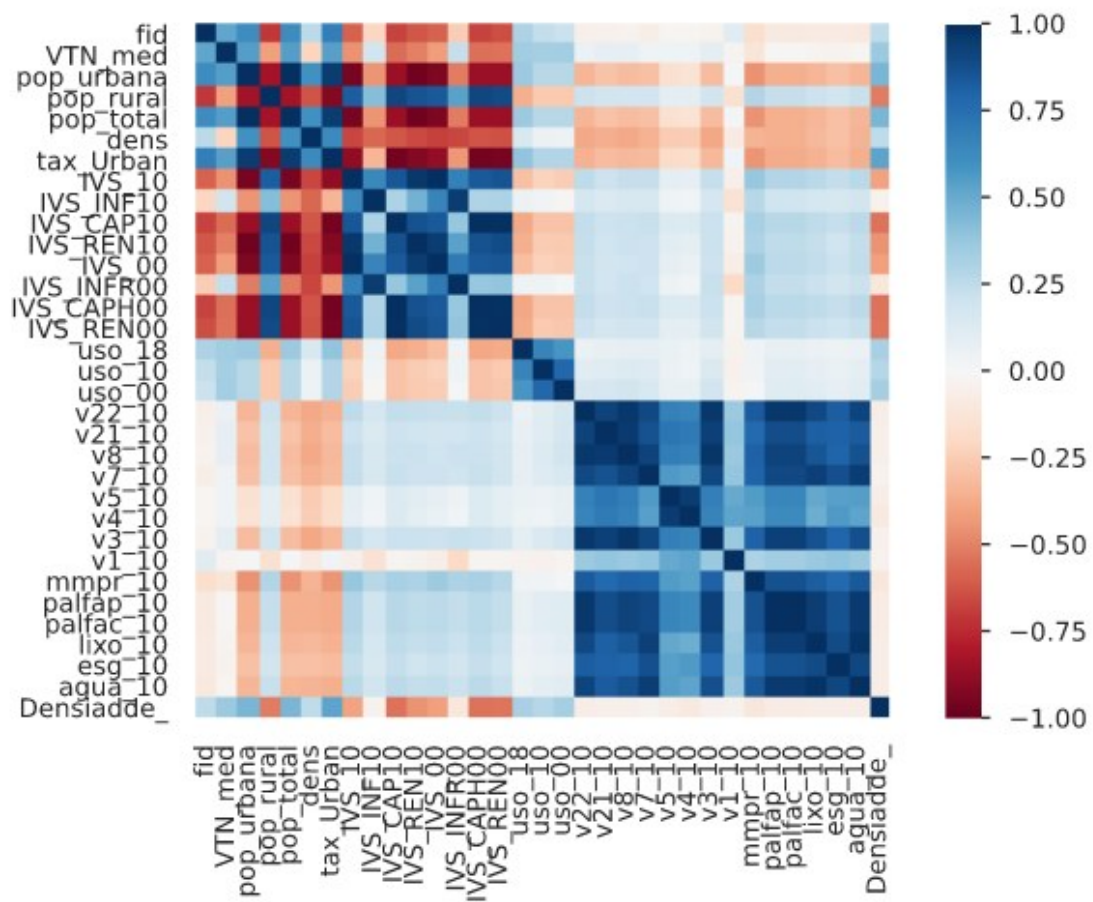
1,0%

2,0

4

0,1%

▼ Análise de Correlação entre as variaveis



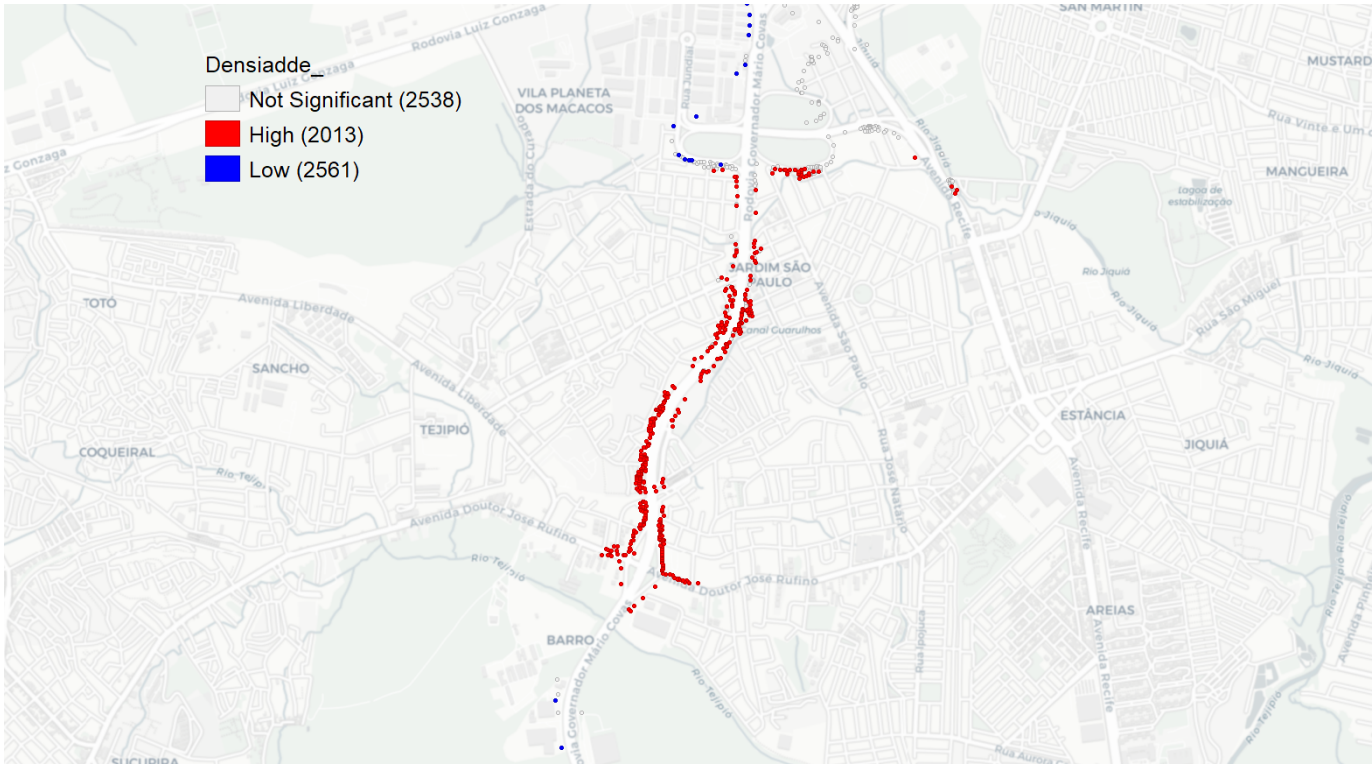
▼ Analise Espacial das Ocupações



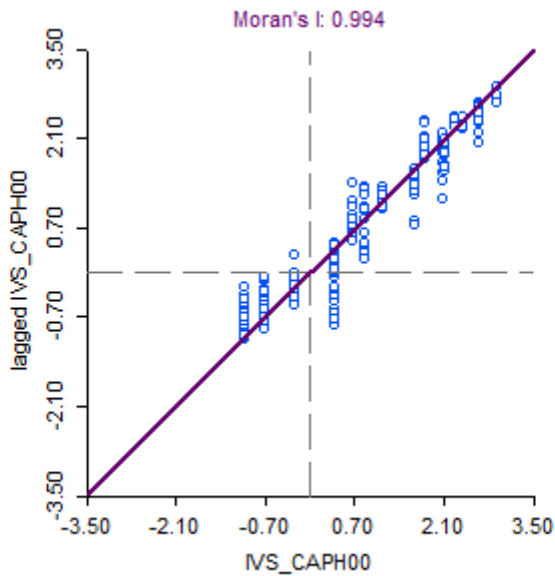
VTN_med
(7112)

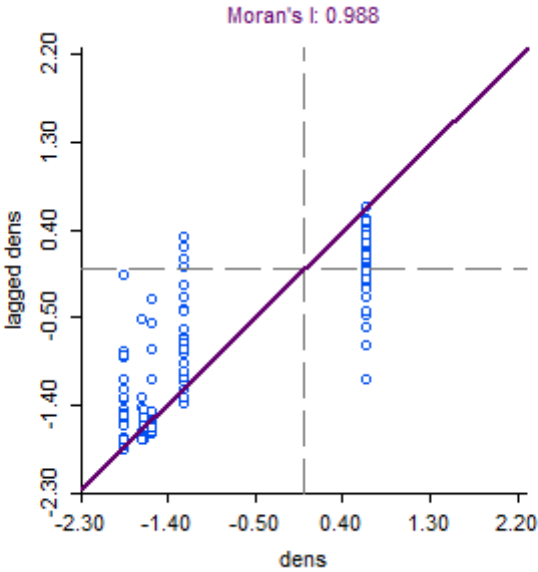
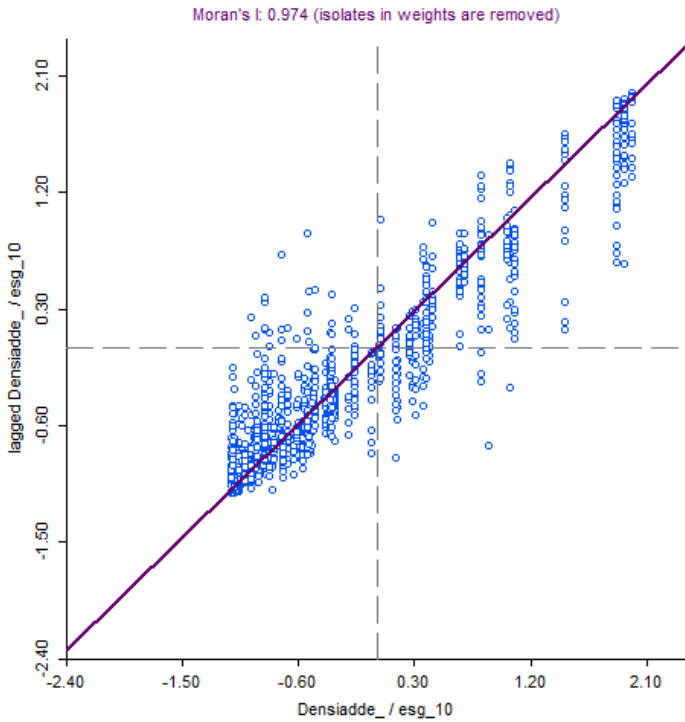
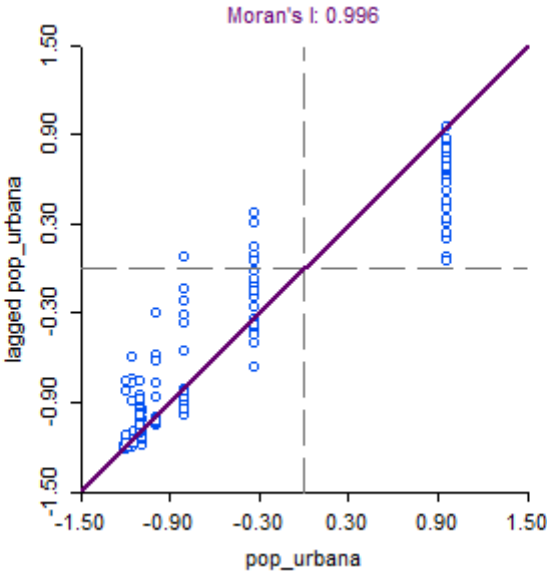


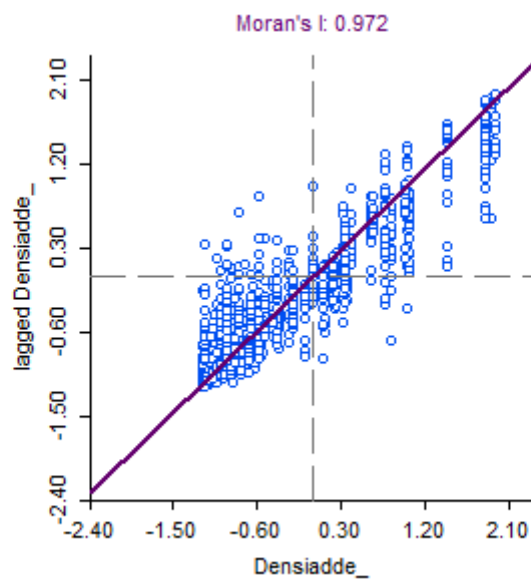
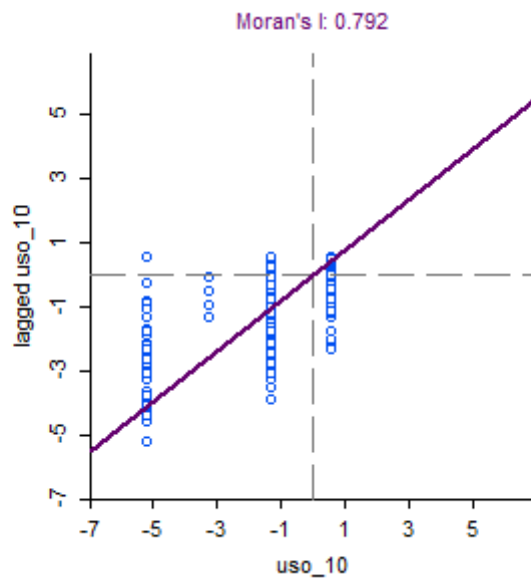
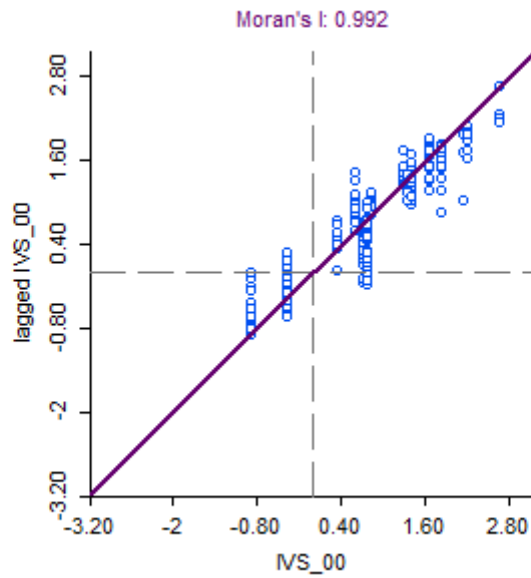
Relação das Ocupações com a variavel Densidade



▼ Índice de Moran Global - das variáveis







▼ Análise Exploratórias dos Dados

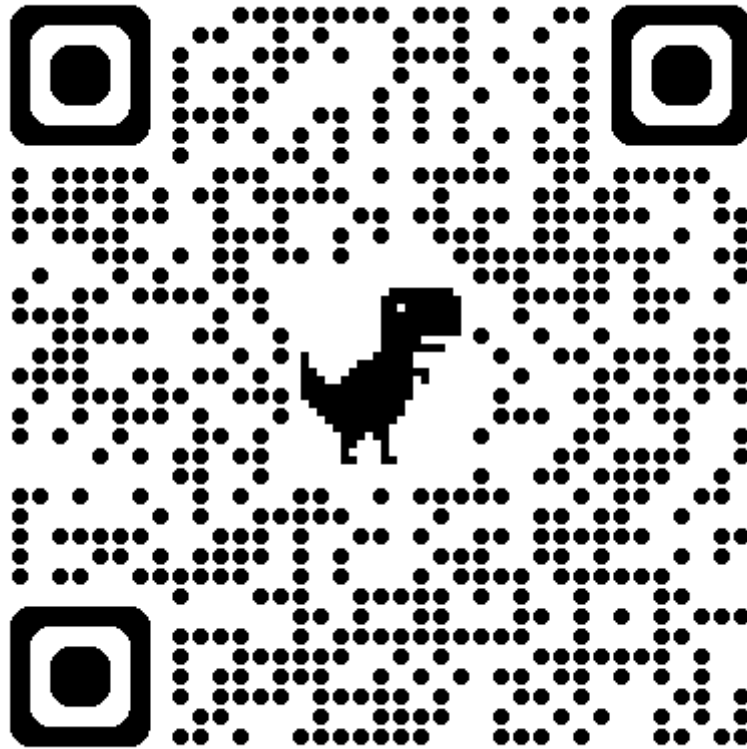


Apêndice C

C.2 - Modelo LCM da BR-101

Apêndice C

C.3 – Vídeo de Simulação



youtube.com/watch?v=aMBKsB62kZo