UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

MÔNICA PAVÃO

**Modelagem e análise de mudanças do uso e cobertura da terra
no entorno de áreas protegidas: o caso do Parque Estadual da
Cantareira – São Paulo**

(versão corrigida)

São Paulo

2017

MÔNICA PAVÃO

**Modelagem e análise de mudanças do uso e cobertura da terra
no entorno de áreas protegidas: o caso do Parque Estadual da
Cantareira – São Paulo**

(versão corrigida)

Tese apresentada à Faculdade de
Filosofia, Letras e Ciências
Humanas da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Geografia Física

De acordo,

Prof. Dr. Fernando Shinji Kawakubo

Orientador: Prof. Dr. Ailton Luchiari

(In Memoriam)

São Paulo

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

P337m	<p>Pavão, Mônica</p> <p>Modelagem e Análise de Mudanças do Uso e Cobertura da Terra no entorno de Áreas Protegidas: o caso do Parque Estadual da Cantareira - São Paulo / Mônica Pavão ; orientador Aílton Luchiari. - São Paulo, 2017.</p> <p>125 f.</p> <p>Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.</p> <p>1. MODELAGEM DE DADOS. 2. USO DO SOLO. 3. GEOGRAFIA FÍSICA. 4. ÁREAS DE CONSERVAÇÃO. 5. SENSORIAMENTO REMOTO. I. Luchiari, Aílton, orient. II. Título.</p>
-------	---

PAVÃO, M. Modelagem e análise de mudanças do uso e cobertura da terra no entorno de áreas protegidas: o caso do Parque Estadual da Cantareira – São Paulo. Tese apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Geografia Física.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____

Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____

Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____

Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____

Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____

Aos meus pais Essio Pavão (*In Memoriam*)
e Antônia de Oliveira Pavão
e aos meus queridos sobrinhos Davi Pavão
e Mariana Fonseca Pavão, que venha o futuro!

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Aílton Luchiari, pela orientação, amizade e principalmente por acreditar em mim como profissional.

Ao Instituto Florestal e à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, por permitirem o afastamento para a realização do curso de doutorado.

À Professora Dra. Rúbia Morato e à Pesquisadora Dra. Kátia Mazzei, pelas valiosas críticas e sugestões apontadas no exame de qualificação.

Ao Professor Dr. Samuel Adami pela leitura, críticas e sugestões apontadas ao trabalho.

Ao Geógrafo e Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Carlos Henrique Pires Luiz, meus sinceros agradecimentos pelo ensino do Módulo LCM do IDRISI. Agradeço também por sua prestatividade, apoio e paciência comigo durante todas as fases de operação do *software*.

Ao Professor Doutor Fernando Kawakubo, pela leitura e apontamento de críticas e sugestões na fase final do trabalho do trabalho.

À Pesquisadora Marina Mitsue Kanashiro do Instituto Florestal, pela disponibilidade constante e imensa ajuda durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao Pesquisador Ciro Koiti Matsukuma do Instituto Florestal, pelas conversas, idéias e sugestões apontadas no decorrer do trabalho.

Ao Pesquisador Dr. Dimas Antônio da Silva, pela revisão crítica e cuidadosa do texto e apontamento de valiosas sugestões.

Ao Pesquisador Márcio Rossi, pela leitura e apontamento de críticas e sugestões.

À Yara Cristina Marcondes, pela elaboração do “*Abstract*”

Ao Professor Dr. Heinrich Hasenack do Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia, Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à Bióloga Juliana Gonçalves da Silva pelo apoio e treinamento do módulo LCM do IDRISI na fase inicial do trabalho.

Aos estagiários Andressa Almeida Costa e Leonardo Gomes, pelo apoio essencial no trabalho de campo.

À amiga de longa data, Claudiane Reis da Paixão pelo apoio emocional e incentivo durante o decorrer do trabalho.

Ao amigo Celso Rodrigo de Oliveira Queiroz pela amizade sincera, incentivo constante e ajuda no decorrer do trabalho.

Aos amigos da pós-graduação, Marcelo Oliveira e Marcão, pela amizade e apoio.

“Falar sobre o futuro da urbanização e das cidades é coisa temerária. Mas não falar sobre o futuro é deserção. Não se trata do futuro como certeza, porque isso seria desmentir a sua definição, mas como tendência”.

Milton Santos

RESUMO

PAVÃO, M. **Modelagem e Análise de Mudanças do Uso e Cobertura da Terra no entorno de Áreas Protegidas: o caso do Parque Estadual da Cantareira – São Paulo**. 2016. 132 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

O Parque Estadual da Cantareira apresenta importância crucial na produção de serviços ambientais e proteção dos remanescentes de Mata Atlântica da Região Metropolitana de São Paulo. Todavia, o crescimento urbano em seu entorno se dá de forma desordenada, gerando pressões e problemas ambientais sobre essa unidade de conservação. Os estudos sobre o crescimento urbano e as análises sobre mudanças no uso e cobertura da terra permitem monitorar estas ao longo do tempo e do espaço e desta forma, indicar possíveis impactos ambientais sobre áreas protegidas. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo analisar as mudanças do uso e cobertura da terra na área do Parque Estadual da Cantareira e seu entorno no período 1980-2008, além de realizar simulações de cenários futuros para a área. O trabalho foi realizado por meio da utilização de um modelo, o *Land Change Modeler* – LCM e de mapeamentos de uso da terra existentes, associados a variáveis físicas e socioeconômicas para análise específica da expansão urbana no período. A utilização de técnicas de modelagem permitiu a geração de simulações do Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035. Temas de “restrições às mudanças”, como os “Parques Estaduais e Municipais” existentes e de “incentivos às mudanças”, como o Rodoanel Mário Covas Trecho Norte, foram adicionados às simulações e possibilitaram a geração de cenários sobre o uso e cobertura da terra futuros. Considerando as limitações do uso de modelos, que são representações simplificadas da realidade, as simulações previstas pelo trabalho podem contribuir para a gestão do Parque Estadual da Cantareira, por meio de sua utilização na revisão de seu plano de manejo, e para as administrações municipais, na elaboração e revisão dos seus planos diretores, o que em última instância, traria benefícios para a amenização das pressões e dos problemas ambientais que incidem sobre essa importante unidade de conservação da Região Metropolitana de São Paulo.

Palavras chave: Modelagem, *Land Change Modeler*, Unidade de Conservação

ABSTRACT

PAVÃO, M. **Modeling and analysis of land use and land cover changes surrounding protected areas: the case of the Cantareira State Park – São Paulo**. 2016. 132 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Cantareira State Park has crucial importance in the production of environmental services and for the protection of the Atlantic Forest remnants of São Paulo metropolitan area. However, urban growth occurs in its surroundings in a disorganized way, generating pressures and environmental problems on this protected area. Studies on urban growth and analyses on changes in land use and land cover allow monitoring changes over time and space and in this way show possible environmental impacts on protected areas. Thus, this study aimed to analyze the changes in land use and land cover in the Cantareira State Park area and its surroundings in the period 1980-2008, besides, it carries out simulations of future scenarios for the area. The study was conducted by the use of a model, the *Land Change Modeler* – LCM, and of existing land use mapping associated with physical and socioeconomic variables for specific analysis of urban expansion in the period. The use of modeling techniques allowed the generation of simulations of land use and land cover for the year 2035. Themes of "restrictions to changes", as existing "State and Municipal Parks", and of "incentives to changes", as Northern Section of the Mario Covas Rodoanel, were added to the simulation and enabled the generation of scenarios on future Land Use and land Cover. Considering the limitations of the models, which are simplified representations of reality, the simulations provided by the study can contribute to the management of Cantareira State Park, through its use in the review of its management plan and to municipal administrations for preparing and reviewing its Master Plans, which ultimately would benefit the easing of pressures and environmental problems that affect this important conservation unit of São Paulo metropolitan area.

Keywords: Modeling, Land Change Modeler, Conservation Unit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo	39
Figura 2 – Fluxograma da Metodologia. Adaptado de Luiz (2014)	53
Figura 3 - Pontos visitados e vias percorridas em trabalho de campo: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	58
Figura 4 - Mapa de Uso e Cobertura da terra, 1980. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	70
Figura 5 -Mapa de Uso e Cobertura da terra, 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	71
Figura 6 - Mapa de Uso e Cobertura da terra, 2015. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	72
Figura 7- Áreas onde ocorreram mudanças de uso e cobertura da terra para área urbana entre os anos de 1980 e 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	76
Figura 8 - Áreas onde ocorreram mudanças de uso e cobertura da terra para utilização agrícola entre os anos de 1980 e 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	77
Figura 9 – Áreas onde ocorreram mudanças de uso e cobertura da terra para cobertura vegetal natural entre os anos de 1980 e 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	78
Figura 10 - Condomínio Parque Itaguaçu da Cantareira em 1980, 2008 e 2015, respectivamente.	79
Figura 11 - Loteamento Vitória Régia em 1980, 2008 e 2015, respectivamente.	80
Figura 12 - Altimetria: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	81
Figura 13 - Distância em relação às áreas de utilização agrícola: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	82

Figura 14 - Distância em relação às áreas urbanas: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	82
Figura 15 - Distância das áreas de mudança: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	83
Figura 16 - Distância de mudança em relação às áreas urbanas: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	83
Figura 17 - Distância dos empreendimentos imobiliários residenciais: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km. Fonte: (CEM, 2013)	84
Figura 18 - Distância de Vetores de Pressão Negativos: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km. Fonte: (São Paulo, 2009)	84
Figura 19 - Distância de Vias de Circulação: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	85
Figura 20 - EV Likelihood 1980-2008: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	86
Figura 21 - Parques Estaduais e Municipais.....	87
Figura 22- Vulnerabilidade Social: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	87
Figura 23 - Mapas de Potenciais de Conversão para área urbana: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	91
Figura 24 – Rodoanel Mário Covas Trecho Norte como “Incentivo à mudança”	92
Figura 25 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra para 2015 (mapeado a partir de imagens de alta resolução) e 2015 (simulado pelo modelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	95
Figura 26 - Validação da Simulação do Uso e Cobertura da terra para 2015. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	98
Figura 27 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra de 2008 (São Paulo, 2009) mapeado a partir de ortofotos digitais) e 2035 - cenário 1 (simulado pelo modelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	104

Figura 28 - Mapa de vulnerabilidade às mudanças até 2035: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	107
Figura 29 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra de 2008 (São Paulo, 2009) mapeado a partir de ortofotos digitais) e 2035 - cenário 2 (simulado pelo modelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	109
Figura 30 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra de 2035 (simulado pelo modelo LCM – cenário 3 - sem Rodoanel como incentivo às mudanças) e 2035 (simulado pelo modelo LCM - cenário 4 - com Rodoanel como incentivo às mudanças): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.....	112

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 1980, 2008 e 2015: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	73
Gráfico 2 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 2015 (mapa real) e 2015 (simulado pelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	96
Gráfico 3 -Representatividade de <i>hits</i> , <i>misses</i> e <i>false alarms</i> , na validação da simulação do Uso e Cobertura da terra para 2015.	99
Gráfico 4- Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 2008 e 2035 – (Cenário 1) simulado pelo LCM: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	105
Gráfico 5 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 2008 e 2035 (Cenário 2) simulado pelo LCM: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	110
Gráfico 6 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra de 2035 (simulado pelo modelo LCM – cenário 3 - sem Rodoanel como incentivo às mudanças) e 2035 (simulado pelo modelo LCM - cenário 4 - com Rodoanel como incentivo às mudanças): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Generalização da legenda dos mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1980/81 (Silva 2000) e 2008 (São Paulo, 2009).....	55
Tabela 2 – Bairros e localidades visitadas em trabalho de campo.	57
Tabela 3 - Variáveis explanatórias testadas para construção e calibração do sub-modelo de transição.....	63
Tabela 4 - Áreas das categorias de uso e cobertura da Terra dos anos de 1980, 2008 e 2015: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.	73
Tabela 5 - Resultado do teste e seleção das variáveis explanatórias para inclusão no sub-modelo de transição potencial.	88
Tabela 6 - Matriz de transição potencial para as classes de uso e cobertura da terra entre os anos de 2008 e 2015.....	93
Tabela 7 - Matriz de transição potencial para as classes de Uso e Cobertura da terra entre os anos de 2008 e 2035.....	102

LISTA DE SIGLAS

ADA - Área Diretamente Afetada

CA – Celular automata – Autômatos Celulares

CEM – Centro de Estudos da Metrópole

DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S/A

EMPLASA – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A

ETM+ - Sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (Satélite Landsat 7)

GIS – Geographic Information Systems – Sistemas de Informações Geográficas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LCM - *Land Change Modeler* - Modelador de Mudanças de Uso da Terra

LUC - LUCC - Land Use and Land Cover Change – Mudança de Uso e Cobertura da Terra

MC – Markov Chain – Cadeia Markov

MLP neural network – Rede neural “*Multi Layer Perceptron*”

PEAL – Parque Estadual Alberto Löefgren

PEC – Parque Estadual da Cantareira

REDD - Reducing Emissions from Deforestation and Degradation - Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SDA – Spatial Data Analysis – Análise de dados espaciais

SMA – Secretaria do Meio Ambiente

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação

TM – Thematic Mapper

TSA - Trend Surface Analysis - Análise de Superfície de Tendência

UCs – Unidades de Conservação

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UN-HABITAT - United Nations Human Settlements Programme

VASP – Viação Aérea São Paulo

VDM – Volume Diário Médio

SUMÁRIO

Sumário

1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótese	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Modelos e Modelagem.....	5
2.1.1 Conceitos	5
2.1.2 Tipos de Modelos	9
2.1.3 Características dos Modelos	12
2.1.4 As funções dos Modelos	13
2.2 Análise de Mudanças do Uso e Cobertura da Terra	15
2.3 Modelagem do Crescimento Urbano	21
2.4 O <i>Land Change Modeler</i> (LCM) como ferramenta na análise de mudanças de uso e cobertura da terra e modelagem.....	28
2.5 Mudanças no Uso e Cobertura da Terra e Áreas Protegidas.....	33
3 ÁREA DE ESTUDO	39
3.1 Localização	39
3.2 Contextualização da Área de Estudo na Região Metropolitana de São Paulo	40
3.3 Histórico de Ocupação da Área de Entorno do Parque Estadual da Cantareira.	42
3.4 O Parque Estadual da Cantareira	46
3.5 Rodoanel Mário Covas Trecho Norte	48
4 PROCEDIMENTOS TÉCNICO-OPERACIONAIS	50
4.1 Lista de Materiais.....	51
4.2 Mapeamento de Uso e Cobertura da terra dos anos de 1980, 2008 e 2015	54
4.2.2 Mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 1980	54
4.2.3 Mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2008.....	55
4.2.4 Mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2015.....	56
4.2.5 Trabalho de campo	57
4.3 Análise de mudanças do uso e cobertura da terra.....	58

4.3.1 Parâmetros do projeto	59
4.3.2 Análises de mudanças.....	59
4.3.3 Mapas de Mudanças.....	60
4.4 Potenciais de Transição.....	60
4.4.1 Sub-modelos de transição: status	60
4.4.2 Conversões de Variáveis	61
4.4.3 Elaboração de variáveis explanatórias	61
4.4.4 Teste e Seleção de Variáveis	62
4.4.5 Estrutura do Sub-modelo de Transição	63
4.4.6 Execução do Sub-modelo de Transição.....	64
4.5 Planejamento.....	65
4.5.1 Restrições à mudança	65
4.5.2 Incentivo à mudança	65
4.6 Previsão de Mudanças	66
4.6.1 Modelagem de Demanda de Mudanças	66
4.6.2 Alocação de Mudanças	66
4.6.3 Validação	67
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1 Mapeamento do Uso e Cobertura da para os anos de 1980, 2008 e 2015	69
5.1.1 Mapa de Uso e Cobertura da Terra do ano de 1980.....	70
5.1.2 Mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 2008.	71
5.1.3 Mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 2015.	72
5.2 Análise de mudanças do Uso e Cobertura da terra	74
5.2.1 Mapas de mudança.....	74
5.2.2 Exemplos de Transições entre categorias de Uso e Cobertura da Terra	79
5.3 Modelagem das mudanças do Uso e Cobertura da terra - Potenciais de Transição	81
5.3.1 Elaboração de variáveis explanatórias	81
5.3.2 Teste e Seleção de Variáveis	88
5.3.3 Execução do Sub-modelo de Transição.....	89
5.3.4 Mapas de Transição Potencial	89
5.4 Planejamento.....	92
5.4.1 Restrições à mudança - Parques Estaduais e Municipais.....	92
5.4.2 Incentivo à mudança - Rodoanel Mário Covas Trecho Norte.....	92

5.5 Previsão de Mudanças	93
5.5.1 Modelagem de Demanda de Mudanças	93
5.5.2 Alocação de mudanças - Simulação do Uso e Cobertura da terra para 2015	94
5.6 Validação do Uso e Cobertura da terra para 2015.....	97
5.6.1 Misses	99
5.6.2 <i>False alarms</i>	100
5.6.3 <i>Hits</i>	100
5.6.4 Considerações sobre os resultados da Validação da Simulação “ <i>Hard Prediction</i> ” para o ano de 2015.....	101
5.7 - Alocação de mudanças - Simulações do Uso e Cobertura da terra para 2035	101
5.7.1 Mapa de Uso e Cobertura da Terra de 2008 e Simulação 2035 - Cenário 1	103
5.7.2 Simulação 2035 “ <i>Soft Prediction</i> ”	106
5.7.3 Mapa de Uso e Cobertura da Terra de 2008 e Simulação 2035 - Cenário 2	108
5.7.4 Simulação 2035 - Cenário 3 e Simulação 2035 - Cenário 4.....	111
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

1 APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

Desde 1990, o mundo tem visto um aumento de aglomerações de sua população em áreas urbanas. Essa tendência não é nova, mas inexorável, e tem sido marcada por um aumento notável em números absolutos de moradores urbanos – de uma média anual de 57 milhões entre 1990-2000 para 77 milhões entre 2010-2015. Em 1990, 43% (2,3 bilhões) da população mundial morava em áreas urbanas; para 2015, cresceu para 54 % (4 bilhões). Com o aumento da população humana, as terras ocupadas pelas cidades aumentaram em um ritmo ainda maior. Uma amostra de 120 cidades observadas entre 1990, até o ano 2000, mostra que, enquanto a população cresce numa razão de 17% em média, a área construída aumenta em 28%. Tem sido projetado para 2030, que a população de países em desenvolvimento dobrará, enquanto que a área coberta pelas cidades triplicará (UN-HABITAT, 2016).

Megacidades continuarão a surgir em todo o mundo, representando motores potentes para o crescimento e prosperidade econômica, apesar deste crescimento ser acompanhado pela degradação do meio ambiente e perda de biodiversidade. A maior parte deste crescimento urbano ocorrerá em países menos desenvolvidos (Moghadam e Helbich, 2013).

Conforme São Paulo (2009), a concentração demográfica da Região Metropolitana de São Paulo, se distribui de maneira caótica, engendrando um ambiente social de contradições extremadas que se reflete na organização do espaço territorial, saturando e consumindo os recursos ambientais. O crescimento urbano se dá forma desordenada e muitas vezes próximo de áreas protegidas que abrigam remanescentes naturais que são fundamentais para a garantia da qualidade de vida da população residente na RMSP.

Nesse contexto, insere-se a área objeto de estudo, o Parque Estadual da Cantareira e seu entorno, principal unidade de conservação da Serra da Cantareira e que apresenta importância crucial na produção de serviços ambientais e na proteção dos remanescentes de Mata Atlântica da RMSP.

Como conciliar o crescimento da população com a conservação de áreas protegidas localizadas em áreas urbanas? Até quando unidades de conservação localizadas em áreas urbanas suportarão a pressão que usos da terra exercem sobre elas?

Uma das maneiras de responder a essas questões é por meio da realização de pesquisas que envolvem análise de mudanças do uso e cobertura da terra, o que pode auxiliar na identificação de impactos ambientais negativos sobre áreas protegidas. Em relação ao futuro, o uso de modelos permite simular diferentes cenários no entorno das Unidades de Conservação auxiliando planejadores e tomadores de decisão sobre quais as melhores alternativas em relação ao seu manejo ou ao ordenamento territorial dos municípios onde elas estão inseridas.

Em todo o mundo, são desenvolvidas pesquisas com esse tipo de abordagem. Verburg, P. H. et al. (2006) salientam que “no contexto do planejamento e gestão de áreas protegidas, na ausência de proteção, os efeitos das mudanças de uso da terra, podem ser avaliados para quantificar a pressão das mudanças de uso da terra. Além disso, projeções podem ser usadas como um sistema de aviso prévio para os efeitos de futuras mudanças no uso da terra e áreas pontuais de conflitos”.

Hansen et al., 2001 comentam que “as mudanças no uso da terra podem ter um profundo impacto nos recursos naturais em áreas protegidas. Admite-se a hipótese que somente áreas protegidas com extensões adequadas de habitats circundantes e ligações com outras áreas protegidas serão capazes de suportar níveis atuais de biodiversidade no futuro”.

Para De Fries, R. et al. (2007), “as áreas protegidas em todo o mundo são a chave para a conservação da biodiversidade, e o uso da terra é a solução para fornecimento de alimentos e outros serviços ecossistêmicos essenciais para o sustento humano. Como a mudança no uso da terra isola áreas protegidas de suas paisagens circundantes, o desafio é identificar oportunidades de gestão que mantenham a função ecológica, enquanto minimizam restrições no uso da terra humano”.

Desta forma, propõe-se para o presente trabalho, a utilização de técnicas de modelagem, a análise de mudanças do uso e cobertura da terra e a realização de

simulações de usos futuros para a área do Parque Estadual da Cantareira e seu entorno.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar as mudanças no uso e cobertura da terra no entorno do Parque Estadual da Cantareira ao longo do tempo e realizar modelagens. As análises são realizadas no *software Land Change Modeler*, a partir de mapeamentos de uso da terra existentes, elaborados por meio de fotointerpretação de fotografias aéreas, análise visual de ortofotos digitais e imagens de satélite de alta resolução.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos desse trabalho:

- ✓ Analisar as mudanças no uso e cobertura da terra no entorno de dois quilômetros do Parque Estadual da Cantareira no período 1980-2008-2015;
- ✓ Construir um modelo de mudança de uso e cobertura da terra baseado na análise de mudanças, com a integração de variáveis explanatórias para análise específica da expansão da área urbana;
- ✓ Obter simulações de uso e cobertura da terra futuros para o ano de 2035 levando em consideração variáveis de restrições e incentivo às mudanças, considerando que o crescimento da área urbana se manterá como observado entre 1980 e 2008.

1.3 Justificativa

Os estudos sobre o crescimento urbano e as análises sobre mudanças no uso e cobertura da terra permitem monitorar as mudanças ao longo do tempo e do espaço e desta forma, indicar possíveis impactos ambientais sobre áreas protegidas. Esses

estudos podem fornecer informações detalhadas e precisas sobre o crescimento urbano e a conversão de categorias de uso da terra.

O uso de técnicas de modelagem permite a previsão de usos e cobertura da terra futuros através da simulação de cenários. Desta forma, podem auxiliar tomadores de decisão e planejadores urbanos a optarem por exemplo, pelas melhores decisões quanto à abertura de novos assentamentos urbanos de forma a preservar os serviços ecossistêmicos oferecidos por áreas protegidas.

Da mesma forma que o entorno se relaciona com a Unidade de Conservação, a mesma também se relaciona com o entorno. Isto é, este trabalho também é importante para o gestor da UC que poderá estabelecer programas de manejo para a população que habita a área. Além disso, as prefeituras municipais podem utilizá-lo no estabelecimento ou instituição por exemplo, de zonas de preservação ambiental em seus planos diretores.

1.4 Hipótese

A análise de mudanças de uso e cobertura da terra permite o entendimento das principais transformações entre esses usos ao longo do tempo. Por sua vez, essa análise, integrada às técnicas de modelagem possibilitam a geração de simulações de cenários futuros, que são úteis para um melhor ordenamento territorial no entorno de unidades de conservação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelos e Modelagem

2.1.1 Conceitos

Para Maantay e Ziegler (2006) “modelos simulam alguns aspectos do mundo real para fornecer uma estimativa de condições existentes onde os dados são incompletos, sem medidas, ou difíceis de obter, para prever condições futuras, para explorar e avaliar cenários alternativos, ou para solucionar uma localização ideal”.

Segundo esses mesmos autores, modelos são divididos em três tipos: análogos, conceituais, e matemáticos; sendo que qualquer um desses podem ser usados em GIS. Modelos análogos são também chamados de modelos físicos, desde que eles sejam tangíveis ou modelos em escala onde uma unidade de medida no modelo representa “x” unidades de medida no mundo real. Um modelo em escala de uma casa, um avião ou um carro é um modelo análogo. Mapas são modelos análogos também, desde que haja uma relação lógica e direta entre as partes do modelo e o objeto no mundo real. Mapas são, na realidade, modelos análogos ou escalares da realidade geográfica.

Modelos conceituais simulam processos do mundo real ou entidade por diagrama, expressando as relações que fazem o processo de trabalho. Modelos conceituais são frequentemente retratados como fluxogramas demonstrando passos sequenciais e inter-relacionados para serem levados a efeito a certo resultado, tal como por exemplo, um diagrama delineando os passos necessários para um proprietário de imóvel adquirir informações sobre o zoneamento de sua cidade em um departamento de planejamento da cidade.

Modelos matemáticos expressam um processo por meio de fórmulas numéricas. Um modelo matemático requer que o processo envolvido, seja bem entendido, e que possa ser simulado e previsto precisamente e consistentemente, com equações conhecidas. Contudo, muitos processos em planejamento e exercícios de tomada de decisão são mais qualitativos, e dependem de julgamentos subjetivos.

O modelo pode ser uma teoria, uma lei, uma hipótese ou uma idéia estruturada. Pode ser uma função, uma relação ou uma equação. Pode ser uma síntese de dados. E, mais importante do ponto de vista geográfico, pode incluir também argumentos sobre o mundo real por meio de representações no espaço (para produzir modelos espaciais) ou no tempo (para produzir modelos históricos) Skilling (1964) *apud* Haggett e Chorley (1967, 1975).

Segundo Haggett e Chorley (1967, 1975) “modelo é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes”. São valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade. Essa seletividade significa que os modelos têm graus variáveis de probabilidade e amplitude limitada de condições sobre as quais se aplicam. Os modelos de maior sucesso possuem alta probabilidade de aplicação e amplo espectro de condições ao qual parecem apropriados. Realmente, o valor de um modelo muitas vezes está relacionado ao seu nível de abstração. Contudo, todos os modelos têm necessidade de constante aperfeiçoamento, à medida que surgem novas informações ou perspectivas da realidade, e quanto maior o sucesso em que o modelo foi originalmente estruturado, maior possibilidade há de que esse aperfeiçoamento deva provocar a construção de um modelo diferente.

Para Berry (1995) *apud* Christoforetti, A. (1999) “modelo é uma representação da realidade sob forma *material* (representação tangível) ou forma *simbólica* (representação abstrata)”. Em seu trabalho, o autor exemplifica que a modelagem no campo dos sistemas de informação geográfica envolve representação simbólica das propriedades *locacionais* (onde), assim como dos atributos *temáticos* (o que) e *temporais* (quando) descrevendo as características e condições do espaço e tempo.

Conforme Lang, S. e Blaschke, T. (2009), dito de um modo bastante geral, a modelagem de fenômenos espaciais ocorre, quando, para os fenômenos correspondentes, não estão disponíveis dados sobre uma determinada área. Os fatos observados num determinado local e numa determinada hora representam somente um mero recorte da extensão espacial-temporal total de um fenômeno. Blaschke (2004) *apud* Lang, S. and Blaschke, T. (2009), chama a atenção, nesse contexto, para

quatro aspectos que frequentemente não são identificados por meio de simples medições, a saber:

- ✓ Na ocorrência de fenômenos fortemente variáveis: a medida momentânea das respectivas feições precisa ser vista com relação à variabilidade total ou da média ao longo de vários anos (p. ex., dados climáticos);
- ✓ Com relação a problemas técnicos de medição (custo, acessibilidade, segurança), não há densidade ou frequência satisfatórias dos fenômenos diretamente observáveis. Conhecendo-se grandezas de comando, são possíveis as avaliações (p. ex., a propagação de substâncias tóxicas, conhecendo-se a direção e a intensidade do vento);
- ✓ Feições que ultrapassam o domínio observado. Aqui também é necessário o conhecimento das grandezas de comando e tendências, para se poder avaliar a faixa integral de todas as feições;
- ✓ Os fenômenos do mundo real atuam interpostos e sobrepostos, o que, no final das contas, condiciona a ocorrência dos fenômenos diretamente observáveis. As estruturas de efeitos frequentemente podem ser observadas só de forma incompleta, como fluxos ou alterações de estados.

Segundo Smith (1998), modelagem geográfica é a representação completa do ambiente espaço-temporal no espaço e tempo geográfico. Um modelo geográfico é uma abstração realística de todo ou parte do mundo físico ou de alguma parte do ambiente construído ou alterado que pode ser manipulado para analisar o passado, definir o presente, e considerar possibilidades para o futuro. Ainda segundo o autor, todos os modelos geográficos contêm ou relaciona-se com a mesma entidade: o planeta Terra como concebido pela mente humana. Como consequência, há muitas similaridades entre modelos. A teoria de modelagem geográfica deve definir claramente essas estruturas comuns, enquanto supre as necessidades específicas das aplicações de modelagem geográficas individuais.

Para Fischer et al. (1996), em geral, modelos espaciais podem ser usados para três propósitos: previsão e geração de cenários, análises de impactos de políticas públicas e geração e projetos de políticas públicas. O maior obstáculo no caminho de sua aplicação prática e interpretação é a especificidade de cada situação prática. O arranjo espacial, tamanho, forma e organização de unidades básicas espaciais dos dados que

são colhidos, afetam o processo espacial, o qual pode ser identificado nos parâmetros que são dependentes da estrutura de dados usada. Este problema, que tem sido extensivamente reconhecido em estatísticas espaciais, tem sido abordado em modelagem espacial somente recentemente e atualmente, há uma série de simulações resultantes para ilustrar estes efeitos. Todos esses modelos possuem funções as quais determinados GIS carecem, mas são importantes na escolha dos tomadores de decisão.

Falcidieno et al. (1996) propõem uma abordagem em que consideram os conceitos de modelagem descritiva e modelagem declarativa. Para eles, modelos descritivos são representações estáticas de uma situação corrente ou do passado e objetivam representar alguma visão de futuro, para simular processos conhecidos, ou para prever o comportamento de fenômenos geomorfológicos.

Segundo esses autores, futuras aplicações em Sistemas de Informações Espaciais necessitarão de modelos mais flexíveis, que melhor formalizem as necessidades e a visão de diferentes usuários. Desta forma, eles propõem uma abordagem diferente para a criação de sistemas de informações espaciais baseados em modelagem declarativa. O desenvolvimento de tais sistemas requer o fornecimento de descrição, geração e o entendimento de ferramentas juntamente com mecanismos de refinamento e abstração. O principal ponto desta abordagem é que o usuário necessita somente especificar o conjunto de condições e o modelo global obedecer a uma lista de propriedades e/ou restrições. O entendimento desta descrição formal e transferência para um modelo geométrico clássico são deixados para o computador. Para ser mais efetiva e eficiente, a modelagem declarativa é integrada com o modo descritivo, aqui considerado como uma abordagem para modelagem de dados espaciais que nos permite gerar descrições simbólicas de modelos geométricos.

Para Fabbri e Chung (1996), a análise de dados espaciais (SDA) e a modelagem espacial tem uma longa tradição nas ciências da terra. Uma das principais razões é a necessidade de representar as informações espacialmente com o objetivo de descobrir e caracterizar relações espaciais e usá-las para predição. Por esta razão, existe um grande número de ferramentas para análise de dados espaciais, sendo que a maioria dos Sistemas de Informações Geográficas possuem uma coleção de ferramentas para análise e manipulação de dados espaciais.

Conforme Sanders (1996), modelos dinâmicos são de grande utilidade para o entendimento da evolução de sistemas urbanos. O aperfeiçoamento técnico e teórico nesse campo tem aumentado o desenvolvimento de um número cada vez maior de ferramentas. Nesse trabalho, a autora objetiva comparar diferentes aplicações de modelos dinâmicos de sistemas urbanos, para mostrar suas respectivas vantagens e desvantagens e para analisar de que maneira eles podem ser acoplados em Sistemas de Informações Geográficas.

A autora salienta que, apesar de haver muita pesquisa em sistemas dinâmicos, a maior parte deles foca em desenvolvimentos teóricos e a maior parte dos modelos tem sido transferidos de outras disciplinas para a Geografia, tais como matemática, física, inteligência artificial e biologia. Aperfeiçoamentos no tratamento de sistemas complexos nesses campos têm levado à aplicações úteis em Geografia Urbana, onde conjuntos de unidades espaciais como cidades, em uma escala inter-urbana, ou distritos a um nível intra-urbano, frequentemente possuem uma organização sistêmica. Geógrafos tem sucessivamente incorporado ferramentas matemáticas tais como equações diferenciais não-lineares, autômatos celulares e inteligência artificial em seus modelos. Melhorias paralelas em Sistemas de Informações Geográficas, particularmente o crescimento da possibilidade de integração desses com análises espaciais, podem dar um novo ímpeto para o desenvolvimento e aplicação de modelos dinâmicos e aumentar sua utilidade como ferramentas de previsão e aprendizagem.

2.1.2 Tipos de Modelos

Chorley (1964) *apud* Haggett e Chorley (1967, 1975) fornece uma estrutura inicial para a classificação dos modelos correntemente usados em Geografia, e esse “modelo dos modelos” foi ampliado e revisto com referência especial à Geomorfologia.

Para esses autores, os modelos podem ser *descritivos*, quando dizem respeito à descrição estilística da realidade, *estáticos*, concentrando-se nas características do equilíbrio estrutural ou *dinâmicos*, concentrando-se nos processos e funções através do tempo. Onde o elemento tempo é particularmente acentuado, resultam os modelos

históricos. Os autores salientam ainda que, os modelos podem dizer respeito à organização das informações empíricas e serem chamados de modelos de *dados*, *classificatórios* (taxonômicos), ou de *projetos experimentais*. Os modelos *normativos* envolvem o uso de uma situação mais familiar, como modelo de outra menos familiar, quer num sentido de tempo (histórico) ou num sentido *espacial*, e têm conotação fortemente previsora.

Quanto à classificação segundo o material de que são feitos, os modelos podem ser:

- ✓ *Modelos baseados em construções concretas, materiais ou experimentais*. Icônicos – as propriedades importantes do mundo real são representadas pelas mesmas propriedades, apenas com mudanças de escala, ou modelos análogos (de simulação), sendo as propriedades do mundo real representadas por propriedades diferentes;
- ✓ *Modelos teóricos, simbólicos, conceituais e mentais*. Dizem respeito a afirmações simbólicas ou formais de um tipo verbal ou matemático em termos lógicos. Os modelos matemáticos podem ser classificados, conforme o grau de probabilidade associado com sua previsão, em determinísticos ou estocásticos;
- ✓ *Modelos como “Sistemas”* – são definidos com base no interesse relativo do construtor de modelos sobre as variáveis de entrada (input) e saída (output), que são distintas das variáveis do status interno;
- ✓ *Sistemas Sintéticos, sistemas parciais ou caixas-pretas* – Conforme a ordem de interesse decrescente na qualificação das variáveis internas;
- ✓ *Modelos Internalizados* – proporcionam visão provinciana da realidade;
- ✓ *Modelos Paradigmas* – de valor significativo para ampla comunidade de estudiosos.

Conforme Brunet, Ferras e Théry (1993) *apud* Christofolletti (1999), no verbete inserido no dicionário do vocabulário utilizado em Geografia, consideram que os geógrafos utilizam, sobretudo as seguintes categorias de modelos, no tocante à linguagem utilizada:

- ✓ Modelos matemáticos, que eventualmente são apresentados sob a forma de equações, como os da gravitação e da regressão;

- ✓ Modelos de sistemas, denominados também como esquemas lógicos, que procuram representar a estrutura do sistema e identificar os elementos, fluxos e retroalimentações;
- ✓ Modelos preditivos que, construídos como imagens de sistemas, como matrizes de relações entre os elementos de um mesmo sistema espacial, prevêm sua evolução quando se modificam alguns parâmetros, isto é, certas condições de input e valores das variáveis e de seus elementos e das relações;
- ✓ Modelos gráficos, ou mais adequadamente coromáticos, que representam a estrutura de um espaço determinado, de um campo geográfico.

Conforme Berry (1995) *apud* Christofolletti (1999), considerando que o modelo é uma representação da realidade, sob forma material ou simbólica, há duas categorias gerais de modelos: a estrutural e a relacional. A categoria estrutural focaliza a composição e construção de componentes, tais como objetos e ações. Os objetos são entidades sob a forma estática, formando uma representação visual de um elemento, e suas características incluem a escala, bidimensional ou tridimensional e representação simbólica. As ações são a dinâmica sob a forma de movimentos, focalizando as relações espaço-temporais dos elementos, e suas características envolvem períodos temporais, detecção de mudanças, estatísticas de transições e animação.

Segundo Christofolletti (1999) os modelos no campo dos sistemas de informações geográficas são de dois tipos básicos: cartográficos e espaciais. Os modelos cartográficos resultam da automação de técnicas manuais que tradicionalmente usam instrumentos de desenho e sobreposição de transparências. Os modelos espaciais são expressões da relação matemática entre variáveis mapeadas.

Para Câmara e Medeiros (1998), o processo de modelagem refere-se à forma que se dispõe para traduzir o mundo real em outros domínios. Conforme Gomes e Velho, (1995) *apud* Câmara e Medeiros (1998), uma das abordagens mais úteis para esse problema é o chamado “paradigma dos quatro universos”, que distingue:

- ✓ O universo do mundo real, que inclui as entidades da realidade a serem modeladas no sistema;

- ✓ O universo do mundo matemático (conceitual), que inclui uma definição matemática (formal) das entidades a serem incluídas no modelo;
- ✓ O universo de representação, onde as diversas entidades formais são mapeadas para representações geométricas; e
- ✓ O universo de implementação, onde as estruturas de dados e os algoritmos são escolhidos, baseados em considerações como desempenho, capacidade do equipamento e tamanho da massa de dados. É neste nível que acontece a codificação.

2.1.3 Características dos Modelos

Conforme Haggett e Chorley (1967, 1975) *apud* Christofolletti, A. (1999) os modelos podem ter as seguintes características:

- ✓ *Seletividade* - a característica fundamental dos modelos é que sua construção implica numa atitude altamente *seletiva* quanto às informações, na qual os ruídos e os sinais menos importantes são eliminados para permitir que se veja algo no âmago das coisas. Os modelos podem ser considerados como aproximações seletivas que, pela eliminação dos detalhes acidentais, permitem salientar alguns aspectos fundamentais, importantes ou interessantes do mundo real sob forma generalizada;
- ✓ *Estruturação* - representa outra característica importante, pois os aspectos selecionados da “teia da realidade” são explorados em termos de suas conexões;
- ✓ *Enunciativo* - o delineamento da estrutura mostra a existência de determinado padrão, no qual os fenômenos são considerados em termos de relação sistêmica. Esse quadro reveste-se do significado enunciativo (ou potencial de sugestões), pois os modelos bem sucedidos contêm sugestões para sua ampliação e generalização;
- ✓ *Simplicidade* - o modelo deve ser suficientemente simples de manipular e de se compreender pelos seus usuários, mas sem detrimento de ser representativo do espectro total das implicações que possa ter e da complexidade necessária para representar com precisão o sistema em estudo;

- ✓ *Analógicos* - os modelos são analogias, porque são diferentes do mundo real, mostrando uma maneira aproximada de compreendê-lo;
- ✓ *Reaplicabilidade* - é pré-requisito dos modelos nas ciências empíricas. O modelo não se apresenta apenas como descritivo de um caso, mas possibilita que seja usado para outros casos da mesma categoria.

2.1.4 As funções dos Modelos

Os modelos são necessários por constituírem ponte entre os níveis de observação e os teóricos; e se preocupam com a simplificação, a redução, a concretização, a experimentação, a ação, a ampliação, a globalização, a formação de teorias e a explicação. Um de suas funções principais é *psicológica*, permitindo que determinado grupo de fenômenos seja visualizado e compreendido, o que de outra forma não seria possível devido à sua magnitude ou complexidade. Outra é *aquisitiva*, no sentido de que o modelo proporciona arcabouço dentro do qual as informações podem ser definidas, coletadas e ordenadas. Os modelos também têm a função *organizacional* com respeito a dados ao permitir extrair dos dados a quantidade máxima de informações. Os modelos também exercem função *lógica*, ajudando a explicar como acontece com determinado fenômeno. Os modelos apresentam a função *normativa*, ao comparar algum fenômeno com outro mais familiar. Na *função sistemática* da construção de modelos a realidade é considerada em termos de sistemas interligados, de tal modo que na história da Ciência ela representa a construção de uma sucessão de modelos no qual sistemas foram explorados e testados. Isto leva à função *construtiva* dos modelos, no sentido de que eles formam degraus para a construção de teorias e leis. Os modelos e as teorias estão intimamente ligados diferindo talvez apenas quanto ao grau de probabilidade com o qual podem prever a realidade. Os termos *verdadeiro ou falso* não podem ser úteis na avaliação dos modelos e devem ser substituídos por outros como *apropriado, incentivante ou importante*. As leis são afirmações de probabilidade muito alta e, como tal, são modelos, mas nem todos os modelos são leis. Finalmente, há a função do *parentesco* dos modelos, promovendo a comunicação das ideias científicas (Haggett e Chorley, 1967, 1975).

Dentre as funções dos modelos apresentadas por HAGGETT e CHORLEY, 1975; KIRKBY, 1987 *apud* Christofolletti (1999) as mais adequadas para a aplicação nesse trabalho seriam:

- ✓ *Previsibilidade* – em muitos casos, os modelos são construídos para fornecer previsões específicas como base para tomada de decisão imediatas. No setor de pesquisas, os modelos são sempre usados para propiciar uma previsão, a qual então será comparada com a realização do fenômeno em outro local ou em outra época. Esse procedimento permite a checagem independente do modelo, antes que o mesmo venha a ser adotado;
- ✓ *Simulação de cenários possíveis em função de mudanças ambientais* - Uma das funções dos modelos é servir como instrumentos para o planejamento. O planejamento envolve-se em realizar previsões, considerando as implicações de planos alternativos sem os custos de esperar ou colocá-los em prática. A simulação pode ser feita desde uma simples projeção ou tendência para sistemas mais complexos em sua distribuição espacial. Se as previsões forem corretas, pode-se tomar decisões e fazer escolhas entre os cenários simulados pela modelagem. No contexto de “o que será – se”, um modelo adequado não necessita fornecer apenas informações detalhadas mas também deve ser apto para compatibilizar uma gama flexível de opções possíveis. A simulação de cenários é um instrumento fundamental nos estudos de impactos ambientais, a fim de avaliar as repercussões em face das possíveis alternativas da implantação de projetos;
- ✓ *Condensação têmporo-espacial* - A necessidade de relacionar mensurações em curto prazo com a evolução das formas em longo prazo é justamente um exemplo que mostra que os modelos têm a função de condensar e comprimir as escalas temporais e espaciais. Nos modelos computacionais as dimensões espaciais são geralmente compostas por uma grade de pontos nos quais as propriedades encontram-se definidas, tais como altitude, declividade, temperaturas, precipitações, etc. A área máxima que pode ser modelada é igual ao número de pontos de grade multiplicada pela área unitária que cada ponto representa. A dimensão espacial representada por um modelo computacional encontra-se relacionada com a disponibilidade do computador de rodar os programas, inserindo e absorvendo as modificações que vão

ocorrendo ao longo da sequência. A grandeza representada pelos pontos liga-se com a escala espacial do fenômeno a ser modelado;

- ✓ *Desenvolver “explicações” palpáveis aplicáveis a todas as escalas* - Uma função inerente consiste em propiciar melhoria na compreensão do sistema que o modelo tenta descrever. Essa função repercute tanto na fundamentação teórica como no direcionamento aplicativo, ganhando realce, por exemplo, na avaliação e manejo ambiental. Para essa finalidade, os modelos necessitam estar fundamentados da melhor maneira possível em princípios considerados como estabelecidos. Como o modelo atua como sendo um experimento mental, encadeando-se ao longo de um conjunto de pressuposições, os seus resultados podem ser comparados com a experiência.

2.2 Análise de Mudanças do Uso e Cobertura da Terra

O Uso da Terra é uma preocupação de cientistas sociais tais como economistas, geógrafos, antropólogos, planejadores e outros. Denota o emprego “humano” da terra. Inclui assentamentos, cultivos, pastagens, recreação etc. O termo Cobertura da Terra, refere-se às ciências naturais, denota o estado físico da terra. Abrange, por exemplo, a quantidade e tipo de superfície de vegetação, água e materiais da terra (Meyer e Turner II, 1994).

Conforme Lang, S. e Blaschke, T. (2009), a observação do desenvolvimento de paisagens no tempo é um importante pré-requisito para entender os processos que estão ocorrendo e para o prognóstico de tendências futuras. Para muitas tarefas dos órgãos de planejamento e do meio ambiente, a documentação da condição atual e a detecção de mudanças são de significado central. Em especial, a proteção à natureza, por estar relacionada ao espaço, tem uma grande necessidade de dados atualizados e espaciais. Dados atuais de uso e cobertura do solo são necessários tanto como base na tomada de decisões para o planejamento de medidas relevantes de proteção à natureza, como também para o controle sobre o êxito de tais medidas. Para os órgãos federais e estaduais, que, em princípio, são responsáveis por essas tarefas, é importante que esses levantamentos sejam realizados de modo eficiente, em razão do elevado custo de detecção e manutenção desses dados.

Ainda segundo esses autores, observações ambientais que ocorrem durante um longo tempo, são designadas observação constante (*monitoring*). Observação “constante”, por motivos metodológicos, não pode equivaler a uma observação “permanente”, porém significa a análise repetitiva, em intervalos de tempo, da mudança de uma região, para uma avaliação do seu desenvolvimento. Observação constante, segundo Bayfield *apud* (1997) Lang, S. e Blaschke, T. (2009), é definida sucintamente como “monitoring is to record a change” (monitorar é gravar uma mudança). Trata-se, portanto, de registrar mudanças. O monitoramento implica de modo simplificado, a seguinte sequência: num momento t_0 , os dados de um recorte de paisagem, de uma área definida, são levantados com uma metodologia predefinida. Num tempo posterior t_1 , repete-se o registro da mesma área. Uma característica importante do monitoramento com base científica é a premissa de que a detecção e a interpretação feita a cada espaço de tempo t_n sejam feitas com a mesma metodologia, e que os espaços temporais sejam aproximadamente iguais, porém não muito afastados entre si. Dessa forma, deve-se possibilitar a detecção e o balanço das mudanças ocorridas, as quais, por sua vez, entram nas tomadas de decisão de proteção à natureza ou apoiam outras tarefas do planejamento setorial. As mudanças consideradas como essenciais sob determinados pontos de vista devem ser apresentadas, ou seja, indicadas. Trata-se quase de uma amostragem ao longo do tempo. O procedimento de detecção, por isso, deveria ser o mais padronizado possível.

As mudanças no uso e cobertura da terra são um processo complexo e dinâmico que pode ser exacerbado pelo número de atividades humanas. Os fatores de condução de mudanças no uso e cobertura da terra incluem aumento da população humana e resposta da população a oportunidades econômicas (Lambin et al., 2001 *apud* Leh, M. et al. (2013)). Apesar dos benefícios econômicos e sociais das mudanças no uso e cobertura da terra, essas conversões usualmente possuem uma consequência não intencional no meio ambiente natural. A detecção de mudanças no uso da terra é, portanto, um requisito essencial para a avaliação de impactos potenciais no meio ambiente e desenvolvimento de uma gestão eficaz da terra e estratégias de planejamento.

Em geral, a importância da acurácia e atualização de informações cartográficas que descrevem a natureza e a extensão de recursos naturais e agricultáveis está

aumentando, especialmente no rápido desenvolvimento de áreas metropolitanas. Nessas situações, é crucial ter informações geoespaciais sobre os padrões e tendências do uso da terra. Esses dados poderiam constituir uma base de informações para tomadores de decisão sobre regulação e gerenciamento territorial. A importância da construção de um inventário, quantificando mudanças e monitorando as mudanças de características físicas de cobertura da terra têm sido amplamente reconhecida pela comunidade científica internacional como um elemento chave no estudo de mudanças globais (Fearnside, 2000; Foley et al., 2005; IPCC, 2000 *apud* Rodriguez-Galiano e Chica-Olmo, M. (2012).

Embora amostragens tradicionais e inventários possam ser usados para monitorar o uso e cobertura da terra, o sensoriamento remoto fornece uma grande quantidade de informações sobre a distribuição de coberturas e mudanças espaço-temporais. Esse método nos permite mapear grandes áreas usando pouco tempo e recursos econômicos. Detecção de mudanças é o processo de identificação de diferenças no estado de um objeto ou fenômeno em diferentes datas (Singh, 1989 *apud* Rodriguez-Galiano e Chica-Olmo, M. (2012). Três aspectos são importantes quando discutimos mudanças: detectar alterações que ocorreram, identificar a natureza das mudanças e a medição da área total de mudança (Malila, 1980 *apud* Rodriguez-Galiano e Chica-Olmo, M. (2012). O sensoriamento remoto tem sido um método altamente popular para monitorar mudanças porque tem um grande potencial para o estudo desses três aspectos.

Theobald, D. M. et al. (2011) incorporaram os efeitos de mudanças no uso da terra em espécies florestais por meio da modelagem de expansão de loteamentos residenciais e infraestrutura de transportes que resultaram em perda de habitat de áreas florestadas e decréscimo da conectividade. Além disso, os autores usaram dados de uso da terra, densidade habitacional, e infraestrutura de transportes (rodovias e ferrovias) para estimar a proporção de distúrbio que poderia reduzir habitats florestais e a habilidade de espécies florestais em se mover através da paisagem. Os autores estimaram a conectividade para a data corrente do trabalho (ano 2000) e as condições da paisagem, comparando as prováveis mudanças quando dados sobre uso da terra são incorporados, bem como as prováveis mudanças na conectividade conforme a previsão de uso da terra para o ano de 2013.

Patterson e Hoalst-Pullen (2011) comentam que, as mudanças no uso e cobertura da terra têm sido estudadas por geógrafos em várias escalas espaciais e temporais (Cohen e Goward, 1994), avanços recentes em imageamento por sensoriamento remoto e suas aplicações fornecem um avanço na identificação e entendimento das mudanças com alta resolução temporal e espacial. (Buchanan, Nelson, Mayaux, Hartley e Donald, 2009). Além das mudanças físicas na paisagem, geógrafos e outros cientistas estão interessados na identificação e avaliação de fatores e processos de condução de tais mudanças. Enquanto mudanças na cobertura da terra direcionam-se a transformações físicas dos solos, biomassa, e estruturas humanas, as mudanças no uso da terra relacionam-se a fins multifuncionais da cobertura da terra (Verburg, Van de Steeg, Veldkamp e Willemen, 2009). Assim, as mudanças no uso da terra são comumente inferidas a partir de mudanças na cobertura da terra, espacialmente e temporalmente. Inerente a estas paisagens culturais estão mudanças na agricultura, urbanização, florestas, recursos naturais, além de outras.

Dados espaciais são requeridos para mapear e monitorar processos e mudanças espaço-temporais (Bunce, et al. 2008 *apud* Mallinis, Georgios et al. 2011). O entendimento dos fatores que causam essas mudanças é também essencial para o desenvolvimento de políticas de gestão para minimizar futuros distúrbios e mais degradações. Além disso, informações de conteúdo e função ecológica de habitats protegidos são necessários para restaurá-los às suas condições naturais; tais informações são necessárias após grandes catástrofes ou distúrbios abruptos que podem modificar a habilidade dos ecossistemas em sua recuperação em estados de pré-distúrbios, ou para seguir sua trajetória de desenvolvimento histórico (Patterson e Hoalst-Pullen, 2011).

Para tratar dessas questões, o sensoriamento remoto juntamente com os Sistemas de informações Geográficas (SIG), podem fornecer uma excelente estrutura de suporte para uma rápida e confiável captura de dados, suas medições e sínteses, todas elas essenciais para minuciosa eco-análise ambiental (Koutsias e Karteris, 2003; Shalaby e Tateishi, 2007; Siyuan, Jingshi, e Cunjian, 2007 *apud* Mallinis, Georgios et al. (2011). Dados de satélite tais como aqueles fornecidos hoje em dia pelos satélites de alta resolução espacial (GeoEye-1 ou Quickbird) ou mesmo sensores de resolução espacial mais baixa (por exemplo LANDSAT, SPOT), oferecem

fonte ilimitada de informações guiadas por seu rico conteúdo de informação espectral e espacial (Mallinis, Koutsias, Tsakiri-Strati, e Karteris, 2008). Contudo, a extensão temporal limitada de dados de satélite disponíveis apenas a partir de 1972 restringem estudos espaciais de longo prazo em mapeamento de monitoramento de cobertura da terra. Portanto, a fotointerpretação de fotografias aéreas históricas tem sido reconhecida como uma importante fonte de informações para estudar as dinâmicas de ecossistemas naturais (Kadmon e Harari-Kremer, 1999; Mapedza, Wright, e Fawcett, 2003; Mendonça-Santos e Claramunt, 2001; Reger et al., 2007; Rhoades, O'Neal, e Pizzuto, 2009 *apud* Mallinis, Georgios et al. (2011)).

Para Schulz J. J. et al. (2010), as características da cobertura da terra tem importantes impactos no clima, biogeoquímica, hidrologia e diversidade de espécies. Mudanças de cobertura da terra são indicadas como prioritárias em questões relacionadas à pesquisa e ao desenvolvimento de estratégias para o desenvolvimento sustentável (Turner, Moss, e Skole, 1993; Vitousek, 1994). Recentemente, atenção especial foi dada às mudanças de uso da terra e a degradação de terras áridas (Reynolds, Maestre, Kemp, Stafford-Smith, e Lambin, 2007). A cobertura vegetal nesses ecossistemas com produtividade limitada possui um papel crucial no fornecimento de serviços como regulação da água e do clima (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Para adquirir uma compreensão sistemática da magnitude de mudanças de cobertura das terras em escala regional, os autores consideraram as vantagens da obtenção de dados de sensoriamento remoto para detectar, medir e monitorar as mudanças, devido à habilidade deste sistema em capturar uma visão sinótica instantânea de grande parte da superfície terrestre e adquirir medições repetidas da mesma área regularmente (Donoghue, 2002 *apud* Schulz. J. J. et al. (2010)). O monitoramento e a detecção de mudanças na cobertura da terra são especialmente úteis em regiões onde há lacunas de informação cartográfica com resolução espacial insuficiente para examinar de que forma o homem provoca mudanças na cobertura da terra, bem como para fornecer bases para a conservação e planejamento da restauração.

Ainda segundo Schulz J. J. et al. (2010), as mudanças na superfície terrestre podem estar relacionadas às dinâmicas naturais ou atividades humanas, como podem ocorrer de repente ou gradualmente (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, Muys, & Lambin, 2004

apud Bakr, N. et al. (2010). A detecção de mudanças precisas e adequadas da superfície terrestre fornece aspectos para um melhor entendimento das interações entre fenômenos naturais e humanos para uma melhor gestão e uso dos recursos naturais (Lu, Mausel, Brondizio e Moran, 2004). Dois dos usos mais comuns de imagens de satélite são o mapeamento de cobertura da terra, via classificação de imagens e mudanças de cobertura da terra, via detecção de mudanças (Song, Woodcock, Seto, Pax Lenney e Macomber, 2001). Dados do satélite Landsat são os mais amplamente usados para mapeamento de cobertura da terra e fornecem dados de observação da terra para atender a uma ampla gama de informações desde 1972 (Williams, Goward e Arvidson, 2006).

A detecção de mudanças pode ser realizada por abordagens supervisionadas e não-supervisionadas (Singh, 1989). A técnica supervisionada requer pontos de “verdade terrestre” para obter amostras de treinamento contendo informações sobre assinaturas espectrais das mudanças sem informações adicionais além das imagens brutas consideradas; contudo, ela também possui algumas limitações críticas (Bruzzone e Prieto, 2002). Como essas operações possuem utilidade limitada independentemente, o método de classificação híbrida foi usado (pelos autores) a fim de obter alta precisão de acurácia e mudança (Schowengerdt, 2007).

O processo de mudanças no uso da terra é um elo crítico entre atividade humana e mudança na biosfera (Turner et al. 1995, *apud* Brown, D. G. et al. (2005). Embora as tendências de mudanças no uso das terras influenciem mudanças nos sistemas ecológicos no mundo, dados espaciais sobre essas tendências não são fáceis de adquirir. Segundo Brown, D. G. et al (2005), uma das maneiras de examinar o uso da terra humano é mapear a distribuição das populações humanas, como um indicador de demanda humana para vários serviços fornecidos pelos sistemas ecológicos. A vantagem de trabalhar com população e dados demográficos associados, é que podemos analisar ambas as mudanças e seus componentes demográficos (por exemplo, aumento e decréscimo natural e migração).

A urbanização contudo, é definida como a expansão de usos da terra urbanos, incluindo usos comerciais, industriais e residenciais. Dados de população estão amarrados a usos residenciais e assim subestimam o desenvolvimento em áreas rurais, especialmente aquelas de uso recreacional e sazonal. Além do mais, há

importantes mudanças no uso da terra além da franja urbana, incluindo a conversão de terras em agricultura e florestas, que não são bem representadas nas definições tradicionais de urbanização. Essas mudanças, como as afetadas pela urbanização, necessitam ser quantificadas porque afetam grandes áreas geográficas e possuem efeitos cumulativos importantes nos sistemas ecológicos.

2.3 Modelagem do Crescimento Urbano

Conforme Puertas et al. (2014) a análise de cenário de dinâmicas urbanas de modelos de uso da terra espacial, pode auxiliar no planejamento e políticas urbanas. No trabalho desses autores foi aplicada uma abordagem de modelagem integrada, na avaliação de dinâmicas urbanas, para a área metropolitana de Santiago, no Chile. O modelo de uso da terra integrado utilizado combina regressão logística, Cadeia Markov, e autômatos celulares. Este modelo foi calibrado com dados de 1975 a 2010, e usado para fazer previsões para os anos de 2030 e 2045, utilizando duas datas de origem, além de variáveis explanatórias urbanas e não urbanas. O crescimento urbano foi igual a +27.000 ha (72%) para o período 1975-2010. A cidade de Santiago é projetada para, alcançar aproximadamente 93.000 ha em 2045 (+43% a mais que 2010). Previsões para 2030 estimam que, a expansão urbana ocorrerá além dos limites estabelecidos pelo Plano Regulatório proposto, aproximadamente 15% além da expansão projetada. Os resultados demonstram a capacidade de modelos integrados para estabelecer comparações com planos urbanos, e sua utilidade para explicar a quantidade e as restrições do crescimento urbano. A abordagem integrada de avaliação de dinâmicas urbanas utilizando modelagem de uso da terra é útil para a representação espaço-temporal de formas de crescimento urbano distintas.

Segundo Weber et al. apud Puertas (2014), a expansão urbana tem tido grande enfoque no planejamento do uso da terra devido à complexidade das forças atuantes e suas interações. Há necessidade de entender a expansão bem como seus fatores explanatórios (Batisani e Yarnal, 2009). Tomadores de decisão e planejadores urbanos requerem informações precisas e detalhadas sobre o crescimento urbano potencial e conversão de terras para avaliar novas tendências de crescimento, sua localização e características, bem como as consequências do crescimento urbano

subsequente (Jiang e Yao, 2010). A implementação de modelamento espacial de mudanças no uso das terras (LUC) pode contribuir para um melhor entendimento de fatores socioeconômicos e do meio-ambiente que promovem os padrões de urbanização. (Batisani e Yarnal, 2009). Recentemente tem crescido o interesse em modelagem de uso da terra. Uma série de modelos urbanos estatísticos e geoespaciais tem sido implementados, tais como regressão logística, autômatos celulares, e cadeias Markov.

Recentemente, grupos de pesquisadores propuseram o uso de abordagens integradas, combinando estes modelos. A maioria destes modelos urbanos dependem das funções de vizinhança, tais como autômatos celulares (CA). A habilidade dos autômatos celulares para simular o crescimento urbano espacial é baseado no pressuposto de que crescimentos urbanos passados afetam padrões futuros através de interações locais entre usos da terra. Os modelos de cadeia Markov (MC) tem sido historicamente uma das ferramentas mais utilizadas para prever mudanças entre estados categóricos. Os modelos MC são usados para modelar mudanças ao longo do tempo entre categorias dentro de uma paisagem, sendo que cada pixel na paisagem é classificado como uma categoria, e possui uma probabilidade de fazer uma transição para outra categoria em cada passo de tempo. A análise de regressão logística tem sido usada comumente como uma abordagem para prever o modelamento do uso da terra há duas décadas. Este método é capaz de estabelecer relações funcionais entre o uso da terra potencial e as forças desta mudança, representada por uma série de fatores explanatórios. Recentemente CA, em combinação com métricas de paisagem tem sido implementados comumente na previsão de tendências urbanas futuras. Como áreas urbanas têm mudado rapidamente durante a última década, análises das dinâmicas urbanas têm aumentado pois podem produzir resultados rapidamente, além de serem fáceis de usar em análises comparativas rápidas. Uma aplicação de um modelo de uso da terra integrado de CA, MC e regressão logística em conjunto com métricas de paisagem de dinâmicas urbanas, podem ser úteis para avaliar as necessidades de crescimento (Puertas et al., 2014).

Moghadam e Helbich (2013) salientam que uma série de fatores contribuem para os desafios do planejamento espacial e políticas urbanas em megacidades. Esses

fatores seriam mudanças populacionais rápidas, áreas urbanas menos organizadas e localidades com lacunas de dados para monitorar o crescimento urbano e as mudanças de uso da terra. A pesquisa dos autores foi conduzida para examinar as mudanças nos usos da terra urbanos passados com base em dados de sensoriamento remoto coletados entre 1973 e 2010, dando suporte ao desenvolvimento sustentável de Mumbai. Um modelo integrado de Cadeia_Markov e Cellular Automata (MC-CA) foi criado para prever a expansão da cidade para os anos 2020-2030. Para considerar os fatores que afetam o crescimento urbano, o modelo MC-CA também foi conectado à avaliação multicritério para gerar mapas de probabilidade de transição. Os resultados da detecção das mudanças multi-temporais mostraram que a maior razão de crescimento urbano, 142% ocorreu entre 1973 e 1990. Em contraposição, a razão de crescimento diminuiu para 40% entre 1990 e 2001 e também diminuiu para 38% entre 2001 e 2010. As áreas mais afetadas por esta degradação foram as terras abertas e áreas de cultivo. O modelo MC-CA previu que esta tendência irá continuar no futuro. Comparado ao ano de referência, 2010, são previstos aumentos de áreas construídas de 26% para 2010 e de 12% para 2030. Fortes evidências são previstas no que se refere a um crescimento urbano futuro complexo, caracterizado por uma mistura de padrões de crescimento. A expansão urbana mais pronunciada é em direção ao norte, ao longo da principal infraestrutura de tráfego, ligando duas faixas atualmente ainda não filiadas. Além disso, são esperadas áreas de crescimento urbanos a emergir à leste, aumentando assim, a pressão urbana.

Para Mohammadi et al. (2012), a expansão urbana tem se tornado uma característica notável de crescimento urbano no mundo inteiro nas últimas décadas. A expansão urbana refere-se à extensão da urbanização, que é um fenômeno global dirigido principalmente pelo crescimento populacional e migração em larga escala. Em países em desenvolvimento como o Irã, a expansão urbana está avançando sobre recursos naturais em ritmo alarmante. A proposta do trabalho desses autores, é estudar o crescimento urbano e os fatores efetivos sobre ele na cidade de Urmia, Irã. Os autores utilizaram dados quantitativos da área de estudo do período entre 1989 e 2007, e o censo populacional de Urmia. O caso de Urmia é interessante por várias razões: primeiro, é um caso de crescimento urbano muito rápido, mesmo para um país em desenvolvimento; segundo, ilustra como razões mais rápidas de expansão urbana devem corresponder à cidades de tamanho médio em vez de grandes centros;

terceiro, retrata um processo de substituição de terras no qual terras agricultáveis não são o principal provedor de terras urbanas o que é relativamente raro em contexto urbanos, e quarto, também ilustra de que maneira a expansão urbana deve esconder usos da terra importantes tais como a presença de parcelas de agricultura dentro dos limites urbanos.

Ali, M. J. e Varshney, D. (2012) comentam que a urbanização e o desenvolvimento regional estão intimamente relacionados. Para os autores, a alocação de instalações de ordem mais alta e mais baixa e a especialização de negócios influenciam o crescimento urbano que difunde seus benefícios na paisagem circundante. Em poucos centros urbanos há um grande número de oferta de serviços, enquanto que outros carecem, não correspondendo à sua dimensão populacional. A formulação de modelos de planejamento pragmáticos é uma tentativa de analisar o crescimento hierárquico de centros urbanos associados com suas funcionalidades potenciais e difusão de impulsos de crescimento urbano para a zona rural circundante. Os autores propõem um modelo para o desenvolvimento econômico para a Índia para solucionar o problema de variações regionais de desenvolvimento, além de examinar a adequabilidade e inadequação de facilidades nos centros urbanos e fazer recomendações de planejamento à frente, de modo que um desenvolvimento regional balanceado possa ser alcançado sem deixar qualquer parte rural fora da zona de influência funcional do centro urbano.

A simulação de mudanças de uso da terra (LUC) é frequentemente necessária, mas um processo difícil. Ela é importante para uma variedade de questões de gestão e planejamento (Deng et al., 2008 *apud* Xin, Y et al. (2012)). A simulação de mudanças de uso da terra pode ajudar na avaliação de impactos do crescimento, na preparação de planos de uso da terra e na procura por padrões ótimos de uso da terra, e possibilita a planejadores rurais e urbanos fornecer ao público instalações e serviços necessários para sustentar o crescimento (Li and Yeh, 2002). No entanto, LUC é um sistema espacial dinâmico não-linear altamente complexo (Verburg et al., 2002). Os fatores atuantes e os mecanismos de restrição dos processos de LUC são muito complexos, particularmente, desde que fatores naturais e humanos possam ser trabalhados em diferentes escalas (Lambin et al., 2001).

Tian, G. et al. (2011) investigaram os padrões dinâmicos espaciais e temporais do crescimento urbano de cinco áreas urbanas (Shanghai, Nanjing, Suzhou, Wuxi and Changzhou) na China. Segundo os autores, os padrões de expansão urbana refletiram ajustes de políticos e econômicos desenvolvidos ao longo do tempo. Análises métricas da paisagem através de zonas *buffers* concêntricas foram conduzidas para elucidar a área, forma, tamanho, complexidade e configuração da expansão urbana. Finalmente, os autores mencionam que o trabalho beneficia o entendimento, o tamanho da distribuição e o processo de urbanização da região megametropolitana na China.

Para Thapa, R. B e Murayama, Y. (2011) a complexidade do sistema urbano requer técnicas e ferramentas integradas para entender o processo espacial do crescimento urbano e projetar cenários futuros. O objetivo da pesquisa desses autores foi simular padrões de crescimento urbano na região metropolitana de Katmandu, no Nepal. A região, circundada por terrenos montanhosos complexos, possui recursos naturais muito limitados para novos desenvolvimentos. Parecida com muitas cidades do mundo no que se refere ao desenvolvimento, vem enfrentando um rápido crescimento populacional e problemas ambientais preocupantes. Três séries de mapas de uso da terra em fina escala (30 m de resolução), derivados de sensoriamento remoto, para as últimas três décadas do século 20 foram utilizadas para esclarecer os processos espaciais da urbanização. Baseados em experiências históricas de transições de uso da terra, os autores adotaram o método de peso de evidências integrados em estrutura de autômatos celulares para prever o futuro de padrões espaciais de crescimento urbano. Os autores extrapolaram o desenvolvimento de padrões urbanos para 2010 e 2020 sob o cenário atual através da região metropolitana. Dependendo das características locais e taxas de transição de cobertura da terra, o modelo utilizado, produz padrões espaciais de mudanças perceptíveis na região. Baseado na extrapolação de padrões espaciais, o crescimento urbano no Vale de Kathmandu continuará através do preenchimento de áreas urbanas existentes e em rápida expansão do espaço urbano em direção ao leste e sul. O desenvolvimento global será muito afetado pela existência de espaços urbanos, redes de transportes e complexidade topográfica.

O crescimento urbano é reconhecido como provocador de mudanças físicas e funcionais devido à transição de paisagens rurais em formas urbanas. As relações tempo-espaço possuem um papel importante para entender os processos dinâmicos do crescimento urbano. O processo dinâmico consiste em uma interação complexa não-linear entre uma série de componentes, por exemplo, topografia, rio, uso da terra, transportes, cultura, população, economia e políticas de crescimento. Enquanto novos modelos urbanos fornecem percepções dentro de dinâmicas urbanas, um profundo entendimento de padrões físicos e socioeconômicos associados com urbanização, ainda é limitado em países em desenvolvimento no sul da Ásia. Tal pressão da urbanização resulta em rápidas mudanças nos padrões da paisagem urbana da região acrescentando mais construções e a perda de terras naturais (Thapa e Murayama, 2011).

Conforme Augustijn-Beckers, E-W. et al. (2011), a simulação do crescimento de assentamentos informais pode ser um elemento essencial para gerir os processos de urbanização nas cidades no mundo em desenvolvimento. Os autores usaram um modelo de habitação em micro escala para simular o crescimento de assentamentos informais. Um protótipo do modelo de habitação foi implementado em Dar es Salaam, Tanzânia. Os resultados mostraram que tal modelo de habitação baseado em vetor construído em três regras simples de mudança espacial (preenchimento, extensão e ampliação de casas existentes) pode simular com sucesso o padrão de habitação de crescimento de assentamentos informais.

O rápido crescimento de assentamentos informais (IS) é um dos maiores problemas das cidades dos países em desenvolvimento. Assentamentos informais são áreas urbanas que se desenvolvem e crescem sem planejamento e nos quais faltam as provisões básicas. O termo “informal” refere-se ao fato de que estes assentamentos são normalmente construídos sem a posse legal e não seguem planos de regulação e construção estabelecidos (Abbott, 2002 *apud* Augustijn-Beckers, E-W. et al. (2011)). Razões importantes para o crescimento dos assentamentos informais são a deficiência de planos legais e uma forte migração rural-urbana, levando a um crescimento substancial da população. Apesar do crescimento de assentamentos informais ser predominantemente espontâneo, as casas nessas áreas invadidas normalmente exibem um padrão de crescimento regular.

Os objetivos do desenvolvimento do milênio, (United Nations, 2009 *apud* Augustijn-Beckers, E-W. et al. 2011) enfatizam a necessidade de garantir a sustentabilidade ambiental e de atingir “uma significativa melhora das vidas de no mínimo cem milhões de moradores de favelas no mundo”. Para alcançar este objetivo, a simulação do crescimento de futuros assentamentos informais é uma ferramenta essencial para gerir o processo de urbanização no mundo em desenvolvimento de uma maneira sustentável e estruturada. Intervenções tais como a criação de provisões básicas para distribuição de água ou clínicas de saúde podem ser melhor projetadas e implementadas baseadas em uma compreensão adequada dos processos de crescimento e das forças atuantes que influenciam esse crescimento.

O planejamento urbano evoluiu através do século 20 e levou a uma grande variedade de formas urbanas que receberam cada vez mais atenção devidos aos seus impactos sobre o meio ambiente. No mundo desenvolvido, o aumento da expansão urbana é a principal forma de crescimento urbano e tem sido objeto de críticas nos últimos anos por causa de seus efeitos negativos sociais, econômicos e ambientais. (Newman and Kenworthy, 1989, 1992; Jenks et al., 2000; Ewing, 1997; Burton, 2000; Hasse and Lathrop, 2003; Shen and Zhang, 2007 *apud* Terzi, F. and Bölen, F. (2012)). A dramática expansão do crescimento à custa de espaços livres e recursos naturais têm suscitado um interesse intenso e debates sobre os problemas relacionados à “expansão urbana”.

Para Bhatta, B. et al. (2010), o crescimento urbano é um processo demográfico e espacial e refere-se à crescente importância dos centros e cidades como concentração de população dentro de especificidades da economia e da sociedade. Análises do crescimento urbano por meio de dados atuais e históricos é uma operação realizada essencialmente em estudos geográficos urbanos e para o planejamento futuro. O crescimento urbano pode ser mapeado, medido e modelado pelo uso de dados de sensoriamento remoto e técnicas de Sistemas de Informações Geográficas juntamente com várias medidas estatísticas. Os autores utilizaram uma série temporal com três imagens de satélite com quinze anos de intervalo (1975, 1990 e 2005) que foram classificadas para determinar a extensão urbana e o crescimento de Kolkata-Howrah (Oeste de Bengal, India) em oito diferentes direções dentro de uma região circular. Além dos resultados derivados, o estudo também mostra o potencial dos

dados de sensoriamento remoto e a eficácia dos modelos propostos em estudos geográficos urbanos.

2.4 O *Land Change Modeler* (LCM) como ferramenta na análise de mudanças de uso e cobertura da terra e modelagem

A seguir são apresentados trabalhos que utilizaram a ferramenta *Land Change Modeler* do software IDRISI para fins de análises de mudanças de uso e cobertura da terra.

Conforme Eraso, N. R. et al. (2013) as mudanças no uso e cobertura da terra (LUCC) são reconhecidas como uma das mais relevantes forças na perda de biodiversidade dos ecossistemas. Através da análise de imagens de satélite, os autores quantificaram as mudanças no uso e cobertura da terra que ocorreram entre 1985 e 2008 nos Andes Colombianos. Quatro submodelos de mudanças foram analisados: desmatamento, intensificação da agricultura, conversão para pastagens e áreas abandonadas. Eles associaram a essas mudanças variáveis abióticas, demográficas, socioeconômicas, alguns fatores de mudanças da paisagem e consideraram cenários de mudanças, tais como aumento nas pastagens e intensificação de cultivos. As dinâmicas de mudanças no uso e cobertura da terra foram dominadas por sistemas de transição entre cultivos, pastagens, e secundariamente, vegetação. De todos os submodelos, a conversão de pastagens tem uma importante contribuição em termos de taxa de acurácia (84%). As variáveis mais relevantes para explicar as mudanças na cobertura da terra na região foram elevação, tipo de solo, distância de estradas, cidades e pastagens. As simulações sugerem que o cenário de conversão em pastagem poderia ter maior impacto nos ecossistemas naturais e poderia causar uma perda de 28 a 30% de área de cobertura em 2050. Os resultados desse trabalho indicam que alguns desses *hotspots* de mudança, atualmente ainda estão sob um bom estado de conservação, com grandes extensões de florestas.

As análises deste trabalho foram realizadas utilizando-se o Modelador de Mudanças no Uso da Terra (LCM) versão Idrisi Taiga 9. Segundo esses autores este programa, desenvolvido pelos Laboratórios e Universidade Clark (2006), que contém ferramentas para análise de mudanças de cobertura da terra e leva o usuário a

mapear as mudanças na paisagem, identificar transições de classes e tendências, modelar e prever o meio ambiente para criar cenários de paisagens futuras que integram forças atuantes de mudança.

Václavík, T. e Rogan, J. (2013) realizaram um estudo onde analisam a tendência de mudanças no uso e cobertura da terra (LULCC) no contexto de transformação econômica política da República Tcheca, usando a grande região de Olomouc no período entre 1991 e 2001, como um estudo de caso. Imagens do Landsat Thematic Mapper (TM) e Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de 1991 e 2001 foram adquiridas e processadas por classificação de máxima verossimilhança para produzir mapas de uso e cobertura da terra de ambas as datas. Os resultados mostraram significativa marginalização de atividades agrícolas (12%), uma mudança na composição de floresta mista para floresta decídua (6%), e um aumento global no crescimento residencial em terras aráveis (3.5%). Os resultados do trabalho são consistentes com estudos políticos e econômicos recentes que descrevem as forças atuantes nas mudanças no uso da terra no pós-socialismo na Europa Oriental e Central, tal como a diminuição da necessidade por agricultura intensiva, mudando para manejo ecológico de áreas florestais, ou aumento da suburbanização.

Os autores mencionam que o Modelador de Uso da Terra (LCM) para sustentabilidade ecológica leva o usuário a avaliar perdas e ganhos em classes de cobertura da terra, cobertura da terra persistente, e transições específicas entre categorias selecionadas. Usando mapas de uso e cobertura da terra de 1991 e 2001 como parâmetros de entrada, essa ferramenta foi aplicada para identificar a localização e magnitude das maiores mudanças entre categorias de uso e cobertura da terra. Adicionalmente, os autores estimaram as tendências espaciais das maiores transições entre as categorias de uso da terra de interesse especial na área de estudo, usando análise de superfície de tendência (TSA). TSA é um procedimento de interpolação que desagrega os amplos padrões regionais de padrões não sistemáticos, obtendo-se uma variação de fina escala nos dados (Chorley and Haggett, 1965; Eastman, 2006 *apud* Václavík, T. e Rogan, J., 2013). TSA é projetado para extrair o componente regional de um mapa, tal como localização geral de uma tendência de mudança de uso da terra específica, de componentes residuais (Gittins, 1968 *apud* Václavík, T. e Rogan, J. (2013).

Munsi, M. et al. (2012) realizaram um estudo utilizando dados de sensoriamento remoto dos anos de 1990, 2001 e 2006 para avaliar padrões de mudanças de cobertura de florestas em Shiwalik, Himalaia. Conforme os autores, as florestas estão intimamente associadas com o bem-estar humano. Contudo, com o aumento de atividades antropogênicas, o desmatamento aumentou. Análises de mudanças quantitativas sobre cobertura florestal das duas últimas décadas forneceram informações valiosas para a conservação das florestas sujeitas às atividades econômicas na região. Conjuntos de dados espaço-temporais juntamente com variáveis bióticas e abióticas fornecem oportunidades para modelar as mudanças na cobertura florestal. O Modelador de Uso da Terra (LCM) foi usado para prever o status de cobertura florestal para 2010 e 2015, usando cenários de perturbação atuais. Os autores compararam o atual LULC de 2006 com o LULC previsto de 2006 validado pelo modelo de predição de mudança e a concordância foi de 61.03%. As áreas florestadas estão degradadas devido às atividades antropogênicas, mas o desmatamento/degradação não contribuiu muito para a expansão da área urbana. Áreas agrícolas e áreas de pousios foram os principais contribuidores para o aumento da área urbana. O estudo desses autores demonstrou o potencial de ferramentas geoespaciais para o entendimento de mudanças na cobertura florestal e geração de cenários futuros.

Para Schulz, J. J. et al. (2010), a cobertura da terra e sua configuração na paisagem são componentes cruciais na provisão da biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Os autores investigaram as mudanças na cobertura da terra no Chile central usando imagens de satélite multi temporais tomadas em 1975, 1985, 1999 e 2008. As análises e o mapeamento da distribuição espacial das transições, persistência, ganhos e perdas foram elaborados com o modelador de uso da terra (LCM). No geral, as mudanças na cobertura da terra documentadas, aumentaram serviços de provisionamento, tais como colheitas, gado e madeira, mas podem causar perdas irreversíveis da biodiversidade e esgotamento de outros serviços ecológicos fornecidos por florestas e vegetação campestre.

Conforme Wilson, C. O. e Weng, Q. (2011) a modelagem dos efeitos de composições do uso da terra atuais e do passado e de padrões climáticos sobre a qualidade de águas superficiais, fornece informações valiosas sobre o meio ambiente e

planejamento do uso da terra. O estudo desses autores prediz os impactos futuros de usos da terra urbanos e mudanças climáticas nas águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Des Plaines, Illinois, entre 2010 e 2030. O modelador de mudanças de uso da terra (LCM) foi usado para caracterizar três cenários futuros de planejamento de uso da terra. Em cada cenário foram mapeadas as classes: baixa densidade de crescimento residencial, crescimento urbano normal e crescimento comercial, respectivamente. A análise combinada de uso da terra e mudanças climáticas revelaram que planos de crescimento de uso da terra podem ser adotado para mitigar futuros prejuízos na qualidade da água. A pesquisa desses autores fornece importantes conhecimentos no que se refere à possíveis consequências adversas na qualidade da águas superficiais e recursos submetidos à certas mudanças climáticas e cenários de uso da terra.

Para modelar e simular as alterações na cobertura da terra, Luiz (2014), utilizou o modelo *Land Change Modeler* (LCM). A modelagem foi feita baseada em dados da cobertura da terra obtidos a partir de classificações de imagens de satélite (TM/Landsat) para os anos de 1985, 2010 e 2013. A área de estudo correspondeu aos municípios da Bacia do Rio Piracicaba e da Região Metropolitana do Vale do Aço em Minas Gerais, que abrigam importantes indústrias do setor siderúrgico, de papel e celulose, e que, segundo o autor, trouxe consigo grandes transformações na cobertura da terra.

Deus, B. de (2013) propõe a integração da abordagem quantitativa e qualitativa na construção e análise de cenários espacializados pretéritos, atual e futuros. Os estudos estão focados na área do planejamento ambiental, tendo como tecnologias e instrumentos básicos a Cartografia Histórica a Classificação Digital de Imagens e Modelagem de Mudanças para a simulação com base em Cadeias Markov e Redes Neurais Artificiais. O trabalho buscou contribuir para o desenvolvimento de metodologias de construção de cenários de uso e cobertura da terra, voltadas para o planejamento ambiental de bacias hidrográficas e/ou áreas regionais, a partir da integração de diferentes abordagens, tecnologias e instrumentos espaço-temporais.

A abordagem de Adami (2011) buscou integrar modelos autômatos celulares, sistemas de informações geográficas e métodos de avaliação multicriterial para simular a dinâmica espacial da cana-de-açúcar no território do escritório

desenvolvimento regional de Araçatuba no período de 2001 e 2008. Os procedimentos metodológicos propostos pelo autor permitem simular a expansão da cana-de-açúcar e dimensionar seus efeitos sobre os usos das terras em nível regional e, assim, subsidiar os debates sobre o modelo de desenvolvimento do campo brasileiro.

O trabalho de Rosseti (2011), teve como objetivo avaliar as mudanças do uso do solo da cidade de Rio Claro (SP) e de seu entorno imediato, com o suporte das tecnologias de Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Modelos de Autômatos Celulares para as simulações dos cenários. Foram avaliados os cenários de 1972 a 1988; 1988 a 1995 e 1995 a 2006, bem como as simulações de prognósticos de curto e médio prazos, respectivamente 5 e 10 anos. Constatou-se que no período de 1972 a 1988, ocorreram as transições mais significativas no uso do solo urbano de Rio Claro.

O trabalho de Furlan (2012) teve como objetivo modelar a dinâmica de uso e cobertura da terra ocorrida em dois períodos de tempo: 1991-2002 e 2002-2011, e realizar a simulação de cenários até o ano de 2020, na bacia do Arroio Grande, região central do Rio Grande do Sul. O processo de modelagem foi realizado no aplicativo dinâmica EGO através dos métodos: Cadeias Markov, Pesos de Evidência e Autômatos Celulares. Os mapas simulados para os anos de 2002 e 2011, alcançaram índices de similaridade satisfatórios. O cenário simulado para o ano de 2020 apresentou percentuais de mudanças de uso e cobertura significativamente menores do que os verificados para os períodos anteriores, prevendo aumentos para as áreas florestais e agrícolas e diminuição das áreas de campo.

Conforme Delaneze (2011), o emprego de modelos matemáticos em estudos ambientais gera importantes contribuições científicas ao planejamento ordenado de uma área, uma vez que ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e a prever alterações futuras nos ecossistemas. A área de estudo compreendeu porções dos municípios de Duque de Caxias, Belford Roxo e Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. A modelagem realizada no trabalho foi desenvolvida no *software* Dinâmica-EGO, utilizando como entrada mapas classificados de cobertura da terra, obtidos através de imagens do satélite Landsat 5/TM, e variáveis espaciais para explicar as mudanças ocorridas na cobertura da terra. Os resultados mostraram que, para os dois períodos analisados (1987-1998 e 1998-2010), a taxa de mudança

para a transição “vegetação arbórea para outros” foi bem maior do que para as outras transições observadas nos mesmos períodos.

2.5 Mudanças no Uso e Cobertura da Terra e Áreas Protegidas

Neste item, procurou-se fazer uma revisão sobre pesquisas internacionais e nacionais que tratam do tema mudanças no uso e cobertura da terra no entorno de áreas protegidas.

Segundo Verburg, P. H. et al. (2006) modelos são capazes de descrever as mudanças que ocorrem num complexo conjunto de relações, sendo adequados para formalizar teorias dinâmicas sobre certos fenômenos, que podem ser comparados com nossas observações. Modelos dinâmicos também permitem ao pesquisador até certo ponto, experimentar diferentes cenários e explicar sequências particulares de causas e efeitos. Além de ser uma ferramenta de aprendizado para desvencilhar as forças atuantes e sistemas dinâmicos, os modelos de uso da terra desempenham um importante papel na investigação de possíveis desenvolvimentos futuros em sistemas de uso da terra. Dado que os usos da terra humanos tendem a se expandir ao longo do tempo e a perda de habitat não é aleatória, a quantificação e o monitoramento da extensão e do padrão da cobertura da terra no entorno de áreas protegidas é essencial.

A perda ou conversão de cobertura da terra natural resultam em três distintas mudanças em padrões da paisagem: redução de áreas naturais, criação de bordas (efeito de borda) e aumento de isolamento de fragmentos. Avaliar essas mudanças em condições através da aplicação de métricas de padrões de paisagem para dados de produtos de satélite tem sido uma prática comum, particularmente a nível local (e.g., Colombo et al., 2004; Griffith et al., 2003 *apud* Svancara, L. K. et al., 2009).

De Fries, R. et al. (2007) baseados em estudos de caso e princípios ecológicos, identificaram oportunidades para a gestão regional da terra que mantém tanto a função ecológica em áreas protegidas, como também opções de uso da terra humanos, incluindo a preservação de habitats e corredores de migração, reduzindo a dependência das populações humanas locais sobre os recursos das áreas protegidas. A identificação de oportunidades de gestão efetiva e apropriada depende de claras

definições de: (1) atributos de biodiversidade relacionados (2) conexões de paisagem para delinear localizações particulares com interações ecológicas entre a área protegida e sua paisagem circundante; e (3) dinâmica socioeconômica que determina os usos da terra atuais e futuros recursos no entorno da área protegida.

Conforme Jones, D. A. et al. (2009) muitos habitats e recursos que influenciam o funcionamento ecológico dentro de Parques Nacionais e áreas protegidas, em geral estão localizados fora de seus limites, em áreas não protegidas. Assim, as mudanças no uso e cobertura da terra nas áreas circundantes devem influenciar substancialmente os recursos naturais dentro dos parques. O objetivo do trabalho desses autores é fornecer um quadro baseado em uma abordagem conceitual, baseado na teoria ecológica, que ilustra como as mudanças no uso e cobertura da terra impactam os recursos naturais de parques, e ajuda a identificar indicadores de monitoramento que medirão atributos relevantes das mudanças no uso e cobertura da terra. Eles também descrevem os passos para análise dos dados de monitoramento, de modo que a intensidade e a direção de mudanças no uso e cobertura da terra ao longo do tempo são quantificadas, bem como as tendências no status de importância de recursos do parque impactados por estas mudanças. A integração de dados do monitoramento de uso e cobertura da terra e dados de recursos naturais do parque permitiu as análises de mudança do passado para o presente e pode ser usado para projetar tendências para o futuro para fornecer conhecimento sobre cenários potenciais de mudanças do uso e cobertura da terra e impactos ecológicos.

Segundo McDonald R. I. et al. (2009) vivemos em um mundo cada vez mais urbano, onde mais da metade da humanidade vive em áreas urbanas. Em 2030, haverá 1.750.000.000 mais moradores em áreas urbanas (PNUD, 2005), e as novas áreas urbanas poderiam, caso fossem somadas juntas, cobrir todo o Estado da Califórnia. Na realidade, este crescimento será distribuído ao longo de dezenas de milhares de áreas urbanas, com quase 50% do crescimento da população urbana ocorrendo em áreas urbanas com menos de 500 mil pessoas (PNUD, 2005 *apud* McDonald R. I. et al. 2009).

Os mesmos autores salientam que a quantidade de terras designadas como protegidas têm crescido dramaticamente. Em 1950, menos do que 0,5% de superfície

terrestre do planeta estava protegida. Hoje as áreas protegidas, com diferentes graus de proteção, cobrem 11,5% de superfície. A expansão das áreas urbanas e crescimento de áreas protegidas se interceptam e criam uma tendência cada vez maior de proximidade entre áreas urbanas e áreas protegidas. Uma questão que preocupa é o que esse aumento da proximidade com áreas urbanas pode significar para a integridade ecológica das áreas protegidas (cf., Grimm et al., 2008). Avaliações quantitativas dos efeitos globais de crescimento urbano sobre áreas protegidas são raros, com exceção dos Parques do programa Peril, que considerou as ameaças a um conjunto de áreas protegidas na América Latina.

Para Bergsten A. et al. (2013) reservas são sistemas abertos e suas comunidades de espécies são afetadas pela paisagem dos arredores (Janzen, 1983; Piekielek e Hansen, 2012). A resposta de espécies florestais à perturbação depende de fatores locais e da interação com subpopulações que residem em manchas de habitat vizinhas. Um conceito central nesse contexto é a conectividade, por exemplo, na medida em que a paisagem facilita ou impede movimentação com e entre as manchas de habitats. (cf. Taylor et al., 1993). A conectividade permite dispersão e permite recolonização de padrões após eventos de extinções locais, que é a condição necessária para a persistência a longo-prazo de espécies em uma região. O entendimento sobre a maneira como manchas de habitats e padrões espaciais na paisagem afetam a conectividade da paisagem é a questão chave para o manejo ecologicamente sustentável de paisagens.

O zoneamento é cada vez mais usado na concepção de um dos mais comuns tipos de áreas protegidas, as reservas naturais. A presença do homem no entorno de áreas protegidas na China, tem frequentemente ameaçado sua efetividade, em alguns casos causando declínio dos ecossistemas, apesar de seu status de proteção (Harris, 2008; Liu et al., 2001 apud Hull, V. et al., 2011). A zona “core” é designada para proteger ecossistemas naturais e a zona experimental é configurada para permitir desenvolvimento humano, com a zona buffer posicionada entre as duas a fim de atenuar os impactos humanos nos ecossistemas naturais (McNeely, 1994; Yu and Jiang, 2003 apud Hull, V. et al., 2011).

Segundo Gaspareto et al. (2008), “com o crescimento e expansão das cidades, o meio urbano é cada vez mais presente ao redor das unidades de conservação, gerando

conflitos sociais e impactos ambientais significativos. Os gestores de unidades de conservação ambiental precisam estar atentos para esta realidade ambiental, que tende a se agravar com o tempo, e estabelecer estratégias para se trabalhar com o entorno urbano. Para esses autores, uma das estratégias é mapear e caracterizar o uso da terra do entorno da unidade de conservação, o que permite identificar vetores de pressão e atividades impactantes. Com base nessas informações é possível a elaboração de programas de manejo específicos para solucionar os problemas detectados e a delimitação da zona de amortecimento, que daria um maior grau de proteção à unidade de conservação”.

Nesse sentido, os autores tiveram como objetivos, mapear e caracterizar o uso do solo no entorno dos Parques Estaduais da Cantareira e Alberto Löefgren, identificar os principais vetores de pressão urbana e impactos ambientais provocados pela expansão metropolitana e, subsidiar o planejamento e a gestão dessas unidades de conservação, notadamente a delimitação e a implantação das zonas de amortecimento, conforme preconiza o Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Concluem que, como produto do mapeamento do uso do solo foi possível identificar os principais vetores de pressão antrópica sobre os Parques Estaduais da Cantareira e Alberto Löefgren. Além disso, observou-se quais as classes de uso do solo que estão em expansão ou em retração no entorno das Unidades de Conservação. Obteve-se um panorama de como se dá a dinâmica urbana ao redor destes parques e quais são as principais atividades antrópicas que estão comprometendo sua conservação.

Ecossistemas florestais são recursos ambientais e econômicos essenciais que são largamente difundidos na maior parte das regiões do mundo. Infelizmente, em países desenvolvidos e em desenvolvimento, muitas florestas são ameaçadas pela expansão da agricultura, urbanização e áreas industriais ou pelo fenômeno de degradação causado indiretamente por atividades humanas (Waring e Running, 1998).

Segundo Mazzotti e Morgenstern (1997), devido ao crescimento populacional natural e afluência de população de outras áreas, o sul da Flórida está experimentando um rápido crescimento urbano. É um desafio conciliar a conservação ecológica integrada em paisagens urbanas ou em urbanização e isso também depende do desenvolvimento do sistema de reservas ecológicas local. No sul da Flórida isto

significa gerenciar manchas de habitats frequentemente perturbados, isolados e fragmentados para a conservação da integridade ecológica e bem-estar humano. Uma ciência baseada no plano de manejo de áreas naturais fornece uma base para tomar as melhores decisões possíveis, ter a flexibilidade de modificá-las, e promover confiança pública nesse processo.

Para Townsend, P. A. et al. (2009), o manejo da diversidade da biota de áreas protegidas é afetado pelas mudanças de uso e cobertura da terra dentro da área protegida e também pela perda de habitat e fragmentação da paisagem dos arredores. Segundo esses autores, as imagens de satélite fornecem uma visão sinótica de padrões de cobertura da terra. Porém, o uso de tais imagens requer cuidados em relação ao tipo de sensor, resolução, extensão e as métricas utilizadas para quantificar as mudanças ecológicas significantes.

Dentre os autores nacionais, Gaspareto (2014) realizou estudos de Ecologia de Paisagem utilizando diferentes softwares que trabalham com sistemas de informações geográficas na análise da paisagem e principalmente os diagnósticos de fragmentação de habitats e de locais de maior pressão no entorno de Unidades de Conservação, na Região Metropolitana de São Paulo. Os resultados foram apresentados na forma de mapas, tabelas e gráficos, apontando locais de maior pressão no entorno dos Parques Estaduais e para a paisagem como um todo. O estudo concluiu que, apesar da alta antropização no entorno dos Parques Estaduais ainda existem locais que podem ser utilizados para o aumento do nível do habitat na paisagem.

Silva (2005) apresentou um zoneamento ambiental de um setor do Parque Estadual da Cantareira e entorno seccionado pela rodovia Fernão Dias (BR 381). O trabalho foi realizado com base em uma abordagem sistêmica, considerando-se a integração das informações referentes ao meio físico-biótico, uso da terra e aspectos legais, obtidas por meio de levantamentos bibliográfico e cartográfico, interpretação de produtos de sensores remotos e trabalhos de campo. Verificou-se no trabalho, que os instrumentos de planejamento urbano e a legislação ambiental incidentes na área não foram eficientes no controle da expansão da mancha urbana em direção ao Parque, ocasionando a ocupação de setores frágeis do ponto de vista geomorfológico e degradação ambiental.

A pesquisa de Silva (2004) consiste na realização de um estudo dos processos de expansão urbana e de ocupação da franja sul do Parque Estadual da Cantareira (municípios de São Paulo e Guarulhos) entre as décadas de 1990 a 2000, com especial atenção aos processos sociais e físico-territoriais de conformação do espaço. A partir da perspectiva da Zona de Fronteira e da Bacia do Alto Cabuçu de baixo, a autora efetuou análises dos processos de expansão urbana e de ocupação, de um lado, e das transformações da Serra da Cantareira, de outro.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A área de estudo localiza-se na Região Metropolitana de São Paulo entre as coordenadas 23° 19' a 23° 29' de latitude S e 46° 27' e 46 ° 43' de longitude W. Compreende a área do Parque Estadual da Cantareira e seu entorno de dois quilômetros. Abrange parte dos municípios de São Paulo, Guarulhos, Mairiporã e Caieiras, perfazendo uma área de 22.078,98 hectares (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo

3.2 Contextualização da Área de Estudo na Região Metropolitana de São Paulo

Segundo Marques (2015), a cidade de São Paulo é hoje a maior e mais importante metrópole brasileira e uma das maiores cidades do mundo, e apresenta tanto desafios quanto potencialidades. Em 2010, os 39 municípios da região metropolitana reuniam cerca de 19% do Produto Interno Bruto nacional e 10% da população do país. Por outro lado, cerca de 15% dessa população vivia abaixo da linha de pobreza, assim como quase 2,8 milhões de seus moradores habitavam áreas com precariedade urbana ou habitacional. Em termos populacionais, a metrópole paulista pulou de 4,8 milhões de habitantes em 1960, para 19,7 milhões, em 2010. Conforme a FUNDAÇÃO SEADE (2016), a projeção da população para o ano de 2020 é de 21.138.247 habitantes e para o ano de 2030 de 22.143.440 habitantes.

Essa dinâmica demográfica e social reflete crescimento populacional intenso e avanço da ocupação urbana que reduz, principalmente em áreas periféricas e de mananciais, a cobertura vegetal ameaçando os últimos remanescentes de recursos naturais da metrópole. A face sul do Parque Estadual da Cantareira é caracterizada pela presença de bairros com altas taxa de crescimento populacional, enquanto na face norte, a ocupação é menos densa, por condomínios de médio e alto padrão (São Paulo, 2009).

Grande parte da população de baixa renda procura por terrenos nas regiões mais longínquas, como é o caso da face sul do Parque Estadual da Cantareira. A facilidade de aquisição de terrenos à baixo custo, em sua grande maioria irregulares, acarreta uma ocupação densa, que pressiona esta unidade de conservação (São Paulo, 2009).

O uso e a ocupação do solo do entorno do parque e, conseqüentemente, o desenvolvimento de atividades econômicas, associados ao perfil de baixa e média renda dos habitantes dos municípios estudados; a baixa capacidade ação do poder público, como ente regulador e controlador do uso e da ocupação do solo urbano; e a intensificação dos processos de urbanização metropolitana que, demandam cada vez mais a implantação de infraestrutura de transportes (rodoanel e outros), podem ser considerados dentre outros fatores, como as causas fundamentais das pressões exercidas sobre o Parque.

Carvalho (2012) comenta que, na face norte da Serra da Cantareira encontram-se diversas áreas de ocupação de residências de alto padrão, bem como ocupações irregulares; as primeiras, frutos do *apetite* do mercado imobiliário que desenvolve grandes projetos, aproveitando-se da arborização do local. Os principais bairros nobres estão localizados na cidade de Mairiporã, porém, no sopé paulistano e nas suas adjacências, há um crescimento desse tipo de loteamento, em especial no distrito do Tremembé, uma das regiões paulistanas que mais se valorizou nos últimos anos. Este crescimento tem provocado um grande impacto e adensamento populacional. A localização da Serra nas áreas limítrofes dos municípios colabora sobremaneira para esse processo que tende a provocar um grande impacto na região nos próximos anos.

A expansão urbana ao redor do parque, muitas vezes tem ocorrido em áreas impróprias ao assentamento urbano, em áreas de risco ou de preservação ambiental. As principais ameaças futuras ao parque estão associadas diretamente à expansão descontrolada das áreas destinadas à habitação, tais como assentamentos precários e condomínios de alto padrão. (São Paulo, 2009).

Quanto às características físicas, a área de estudo encontra-se localizada no maciço da Cantareira, que se alonga na direção nordeste-sudoeste por cerca de 30 km e ocupa uma área de cerca de 320 km². Essa serra salienta-se aproximadamente 300 metros acima do nível da topografia local. O lado voltado para sul (calha do Tietê) apresenta-se como uma frente escarpada, enquanto ao norte, na bacia do Juquery (Franco da Rocha) e no município de Mairiporã possui uma escultura granítica maciça e suave composta por um conjunto de morros. (ibidem).

O clima da região é classificado como mesotérmico e úmido com verão chuvoso e inverno seco (Cwa de Koeppen), em que os meses com temperaturas médias mais elevadas são janeiro e fevereiro, com 23°C e 22,8°C, respectivamente, e os meses com temperaturas mais reduzidas são junho e julho, com 16,6°C e 16,5°C, respectivamente. O período chuvoso estende-se de outubro a março, sendo o período seco entre os meses de abril a setembro. A precipitação média anual é de 1.322 mm por ano (série 1992-2007), sendo que o mês mais chuvoso é Janeiro (229,8 mm) e o mês mais seco é agosto (31,7 mm). (ibidem).

Quanto à rede hídrica, a área de estudo é drenada pelas bacias dos rios Cabuçu de Cima e Guaraú e pelos ribeirões Santa Clara e Juqueri, todos afluentes do Rio Tietê, e está inserida no Domínio Morfoclimático dos *mares de morros* florestados (AB'SABER, 1970 *apud* São Paulo, 2009).

Em relação à cobertura vegetal da Serra da Cantareira é possível identificar grande heterogeneidade. As áreas de maior altitude, são recobertas por uma floresta densa e seca, com indivíduos de porte baixo, enquanto que em áreas mais baixas, a cobertura vegetal é tipicamente de floresta úmida, assemelhando-se com a própria Mata Atlântica. Ao Norte, nos vales e serra do Juquery, ocorre cobertura vegetal com predominância de cerrados. Trata-se dos últimos remanescentes de *ilhas de cerrado* em área do Brasil Tropical Atlântico sob influência da Mata Atlântica. (São Paulo, 2009).

De maneira geral, no entorno do PEC os usos do solo predominantes são a ocupação urbana (principalmente os assentamentos precários – loteamento ou favela – e os condomínios de alto padrão/chácaras residenciais); ocupação urbana consolidada, formada por bairros mais antigos, os acessos (rodovias, vias pavimentadas e caminhos de terra-trilha); atividades de mineração; e as estruturas lineares (linhões). (ibidem).

3.3 Histórico de Ocupação da Área de Entorno do Parque Estadual da Cantareira

A ocupação do setor Oeste da Zona Norte da cidade de São Paulo iniciou-se a partir da década de 30 por meio da implantação de novos loteamentos tais como Itaberaba, Moinho Velho, Vila Brasilândia e Vila Nova Cachoeirinha, além das já abertas e isoladas Vila Portuguesa e São Vicente (Herling, 2002).

Tomando como base o Levantamento Aerofotogramétrico do Município de São Paulo, executado em 1954 pela VASP, a autora anteriormente citada destaca o novo bairro de Brasilândia e a urbanização efetuada ao longo dos principais eixos viários. A nordeste a urbanização atingiu as bordas do Horto Florestal, no bairro de Vila Santos, e no extremo leste surgiu o Parque Novo Mundo. (ibidem).

Ao final da década de 1950, após o paulatino avanço da urbanização sobre a Zona Norte de São Paulo, a zona intermediária entre a cidade e a floresta está ocupada

predominantemente por usos rurais (agricultura caipira e especializada) e extrativistas, entremeados já por alguns aglomerados suburbanos. Totalmente vinculados a este mercado consumidor e pressionados pela expansão urbana, os usos rurais vão se retraindo e, como no período anterior, buscam otimizar a ocupação da terra, reduzindo suas propriedades e deslocando-se cada vez mais para a periferia. Ainda que pressionados pela expansão urbana, estes usos permacerão na região até a década de 80, sofrendo seu maior declínio, de fato, na década de 90 (ibidem).

Com relação à substituição de áreas agrícolas por áreas urbanas no bairro de Cachoeira, localizado no entorno do PEC, Vieira (1988) comenta “as áreas agrícolas localizadas muito próximas do centro urbano, acabam sendo muito valorizadas e com isso os produtos que são cultivados, não conseguem acompanhar a elevação dos preços da terra e desaparecem. A partir dos bairros vizinhos inicia-se um avanço dos processos de urbanização em busca de terrenos para a expansão da metrópole, atingindo as áreas de atividades agrícolas”.

O mesmo autor ainda destaca: “Nessa competição, a ocupação urbana tende a levar vantagens, pois retém mais valor que o uso para atividades agrícolas. Passando essas terras para fins de especulação fundiária ou o chamado “pousio para valorização”, os produtores agrícolas se vêem expelidos para áreas mais distantes, onde possam dar continuidade às suas atividades econômicas. A área de Cachoeira e seus arredores também foi atingida pelos fenômenos dos loteamentos e especulação imobiliária causando certa transformação na paisagem local”.

Segundo Vieira (1988), “as situações estudadas fazem parte do contexto urbano paulistano, zona norte, onde o processo de expansão da cidade começa a se fazer sentir na Área de Cachoeira e seus arredores, capturando espaços até então ocupados pelas atividades agrícolas. O dinamismo da cidade começa a penetrar naquele recanto “paulistano”, onde o trabalho da terra – evidenciado pelas plantações e modestas habitações rurais, entre outras formas – atrai a presença dos homens”.

Durante as décadas de 1960 e 1970, a ocupação predominante é a realizada pelo mercado imobiliário informal e, portanto, sem investimentos públicos diretos para a sua produção. Desta forma, a ocupação urbana avança ao longo dos antigos acessos de viários de cumeeira, sinuosos, estreitos e saturados, antigas estradas

intermunicipais transformadas em avenidas municipais atendidas pelo ônibus. Esta forma de ocupação gera continuamente uma frente de ocupação clandestina que vai subindo paulatinamente para as áreas à montante das principais linhas de drenagem da região, até atingir as zonas próximas à Reserva Florestal da Cantareira no período posterior, onde situam-se as cabeceiras destas drenagens (Herling, 2002).

Conforme a autora anteriormente citada, a ocupação dos loteamentos se inicia pelas cotas mais baixas, onde se localizam as porções mais planas dos morrotes. As encostas mais íngremes e os topos são ocupados posteriormente. Ainda que o sistema viário se adapte ao relevo movimentado destas regiões, quase sempre concordante com as curvas de nível, as soluções individuais – construções de casas em lotes estreitos, transversais às curvas de nível, geram problemas sérios de estabilidade de encosta, escorregamentos e carreamento de sedimentos para as principais linhas de drenagem. Tais ocupações agravarão os problemas ambientais deflagrados pelas ocupações dos períodos anteriores: a abertura indiscriminada de loteamentos sem os cuidados técnicos necessários, o desmatamento generalizado, o assoreamento das linhas de drenagem e a sua canalização e retificação acabarão por gerar várias áreas de risco na cidade (quer de inundação, quer de escorregamentos de terras e rochas).

Durante a década de 90, o padrão de expansão urbana da cidade de São Paulo – extensivo, periférico, de baixa densidade – volta a ganhar força. Apesar de as duas últimas décadas do século XX apresentarem queda sistemática nas taxas de crescimento demográfico da população municipal e metropolitana, as áreas periféricas da metrópole apresentam forte incremento demográfico, atestando um deslocamento (ou expulsão) populacional das áreas centrais para terrenos mais baratos da periferia (ibidem, 2002).

Ainda segundo estimativas realizadas pela autora anteriormente citada, ao final da década de 90, estima-se que as ocupações dos baixos esporões da Serra da Cantareira, no entorno da reserva, superem 200.000 habitantes. Deve ser acrescentada ainda a este contingente, a população que mora nas áreas non aedificandi de córregos, em favelas com barracos implantados quase sobre o leito das drenagens, sobre as quais não dispomos de dados estatísticos.

Conforme (Herling, 2002) nos últimos anos, aos problemas ambientais decorrentes das formas tradicionais de ocupação do meio físico, se somam os prejuízos ambientais causados diretamente pela ocupação irregular das áreas de proteção ambiental - poluição e assoreamento dos mananciais de água potável, com a consequente diminuição de sua capacidade. A ocupação irregular das antigas propriedades rurais avança de maneira acelerada na última década. A forma de acesso à terra na zona de fronteira e as formas de parcelamento e ocupação das glebas mais assemelhadas às invasões e às favelas, caracterizarão estas ocupações como extremamente precárias e agressivas ao meio físico, potencializando os problemas ambientais a jusante das bacias hidrográficas, e ameaçando a preservação dos limites da floresta a montante.

Herling (2002) destaca ainda que esta urbanização foi feita basicamente pela combinação simultânea de três formas de produção habitacional: casas auto-construídas em loteamentos clandestinos ou irregulares, conjuntos habitacionais promovidos pelo Poder Público em diferentes programas habitacionais e favelas ocupando áreas livres dos loteamentos abertos no período anterior. Essas formas de produção têm como traço em comum a inadequação de traçados e as formas de ocupação do meio físico, geradoras de problemas ambientais, além da desarticulação geral da malha viária.

Herling (2002) menciona que a situação de rápida ocupação das áreas do entorno da Reserva Florestal da Cantareira poderia se agravar ainda mais com a implementação do trecho Norte do Rodoanel, à época, em fase de planejamento. Sobre as alternativas de traçado, a autora comenta que a alternativa de atravessar o interior do maciço seria eleita como a que menor impacto causaria, tanto para o meio físico, como para as áreas urbanizadas. Ainda assim, estariam previstas algumas interligações deste Rodoanel com a malha urbana [...] que certamente trariam impacto à ocupação urbana das regiões limítrofes à Reserva. [...] Apesar disso, já se esboçaria uma primeira indagação sobre os impactos que a abertura de túneis no maciço granítico poderia acarretar sobre o lençol freático, sobre o regime hidrológico de toda a Serra, e sobre o ecossistema em geral, principalmente durante a execução das obras.[...]

Ao final do século XX, a floresta e a cidade vivem um momento de transição da maior importância. A floresta da Cantareira, regenerada e preservada até agora pela

Reserva Florestal da Cantareira, encontra-se ameaçada pelas ocupações irregulares do entorno, que avançaram de maneira rápida e violenta sobre a zona de fronteira durante os anos 90 e que podem se acentuar ainda mais com a futura implantação do Rodoanel (Herling, 2002).

3.4 O Parque Estadual da Cantareira

Segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), o Parque Nacional tem como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades de educação e interpretação ambiental, de recreação em contato com a natureza e de turismo ecológico. É de posse e domínio públicos, sendo que as áreas particulares incluídas em seus limites devem ser desapropriadas (BRASIL 2000).

A visitação pública está sujeita às normas e restrições estabelecidas no Plano de Manejo da unidade e às normas estabelecidas pelo órgão responsável por sua administração. A pesquisa científica depende de autorização prévia do órgão responsável pela administração da unidade e está sujeita às condições e restrições por este estabelecidas. As unidades dessa categoria, quando criadas pelo Estado ou Município, serão denominadas, respectivamente, Parque Estadual e Parque Natural Municipal (ibidem).

O Parque Estadual da Cantareira ocupa uma área de 7.916,52 hectares e 90,5 km de perímetro, abrangendo parte de quatro municípios: São Paulo, Mairiporã, Caieiras e Guarulhos. O PEC foi criado em 1963 com base na Lei Nº 6.884/62, sendo que para sua regularização outro decreto-lei foi elaborado, o de nº 41.626/63.

A área do atual Parque Estadual da Cantareira começa a se configurar no final do século XIX, quando uma área muito próxima da atual é tombada, visando de modo preventivo, garantir o abastecimento de água da cidade de São Paulo por meio das represas do Engordador, Barrocada e Cabuçu. A origem de seu nome vem justamente da sua importância como área de manancial para a região, já que Cantareira tem origem na palavra cântaro (Ayres, 2006 *apud* São Paulo, 2009).

A partir de 1890 o Governo do Estado de São Paulo desapropriou várias fazendas das redondezas da serra com o intuito de preservar e recuperar a mata nativa que mantinha conservado seus mananciais e que estava, aos poucos, sendo desmatada ou substituída por espécies exóticas e plantações como o café.

Um dos maiores incentivadores da conservação da floresta da Cantareira foi o naturalista sueco Alberto Löfgren, ainda no século XIX. Löfgren chegou ao Brasil em 1874 para participar da expedição botânica dirigida por Hjalmar Monsén, que explorou entre 1874 e 1877 os estados de Minas Gerais e São Paulo. Em 1896, graças aos esforços de Löfgren, aliados aos de Derby e Ramos de Azevedo, foi instalado o Horto Botânico da Cantareira, tendo sido Löfgren seu primeiro diretor.

Atualmente, a gestão do Parque Estadual da Cantareira está organizada em quatro núcleos – Águas Claras, Engordador, Pedra Grande e Cabuçu, que contam com equipes mínimas para a implantação de atividades e com alto grau de autonomia com relação a tomada de decisão e execução operacional. Contudo, os núcleos se reportam à administração do Parque e seu gestor, informando-o sobre o andamento das atividades e consultando-o sobre questões estratégicas ou de maior potencial de risco. Todos os núcleos têm estrutura para recebimento de visitantes e o PEC como um todo recebeu, ao longo dos últimos três anos, uma média de 60 mil pessoas por ano, sendo que metade deste público visita o Núcleo Pedra Grande; o restante se mantém dividido de forma equilibrada entre os outros três núcleos.

Em relação à biodiversidade, o Parque Estadual da Cantareira com 7.916,52 hectares de florestas protegidas representa o mais importante remanescente florestal da região metropolitana de São Paulo. A Floresta Ombrófila Densa Montana é a principal formação vegetacional do PEC e foi originada a partir da regeneração florestal de áreas que foram adquiridas no final do século XIX para o abastecimento de água da cidade de São Paulo. Quanto à fauna, estima-se que haja um total de 388 espécies de vertebrados presentes no Parque, dos quais 97 são mamíferos, 233 são aves, 28 são anfíbios, 20 são répteis e 10 são peixes. Para invertebrados, há registros de 478 espécies, das quais 91 espécies de abelhas, 303 espécies de aracnídeos, 62 espécies de formigas e 22 espécies de culicídeos. O total estimado de espécies da fauna é de 866 espécies (São Paulo, 2009).

Nesse contexto, insere-se o PEC e sua área de entorno, situado em área com densa urbanização consolidada no município de São Paulo. Essa unidade de conservação é de alta relevância para a Região Metropolitana, pois, além de minimizar o impacto ambiental provocado pelos setores urbano e industrial, contribui para o sistema de unidades de conservação da Região Metropolitana, para o sistema de áreas verdes do município de São Paulo, bem como para o sistema de abastecimento de água da região. (ibidem).

3.5 Rodoanel Mário Covas Trecho Norte

O Rodoanel Mário Covas Trecho Norte é uma obra de alto impacto ambiental que atravessa a área de estudo no sentido oeste-leste.

Conforme São Paulo (2010), os objetivos da opção pela construção do Rodoanel Trecho Norte são:

- ✓ Completar o anel rodoviário da RMSP, permitindo seu contorno completo e a interligação de todas as rodovias de acesso;
- ✓ Desviar da malha urbana os fluxos rodoviários de carga que cruzam a região metropolitana especialmente na direção Oeste/Leste, aliviando o eixo formado pela Marginal Tietê e pelas rodovias Presidente Dutra e Ayrton Senna.

O Trecho Norte atravessará as regiões noroeste, norte e nordeste da RMSP e permitirá agregar ao Rodoanel Mario Covas a Rodovia Fernão Dias (BR-381), além de criar um novo corredor viário, com elevada capacidade e padrão de tráfego, situado no limite norte da área urbanizada contínua da RMSP. Além disso, possíveis acessos ao Aeroporto Internacional em Guarulhos e à zona norte do município da capital também estão sendo propostos. Como vantagens de implantação da obra os estudos realizados pela Assessoria de Planejamento da Secretaria dos Transportes mostram que haverá progressiva redução da velocidade média do tráfego de veículos na região. A implantação do Trecho Norte deverá contribuir com a redução dos tempos de viagem nos principais eixos viários e os benefícios econômicos (São Paulo, 2010).

Em março de 2013, tiveram início as obras do Rodoanel Mário Covas Trecho Norte, Conforme informações que constam no sítio da DERSA¹ – Desenvolvimento Rodoviário S/A, o Trecho Norte do Rodoanel Mário Covas desenvolve-se a partir do final do trecho Leste, entre o trevo de interseção com a Rodovia Presidente Dutra e Av. Raimundo Pereira de Magalhães (início do trecho Oeste), interligando com o aeroporto Internacional de Guarulhos e a Rodovia Fernão Dias. Sua extensão é de 44 km e mais 3,6 km de ligação ao aeroporto Internacional de Guarulhos. Abrange os municípios de São Paulo, Guarulhos e Arujá. A Empresa destaca como benefícios da obra:

- ✓ Desviar e distribuir o tráfego de passagem, sobretudo de caminhões, para o entorno da região metropolitana de São Paulo, principalmente na ligação norte e Sul do País, melhorando o fluxo nas marginais e tendo como consequência a melhoria do trânsito dos veículos de transporte coletivo e individual;
- ✓ Permitir o acesso mais ágil ao porto de Santos;
- ✓ Redefinir a plataforma logística de transportes da região metropolitana de São Paulo de radial para anelar;
- ✓ Diminuir o tempo gasto nos congestionamentos, os gastos com combustível e, consequentemente, a emissão de poluentes;
- ✓ Redução de 23% do VDM (volume diário médio) de caminhões na marginal Tietê, o que representa 17.000 caminhões por dia (conclusão da obra) e;
- ✓ Redução de 6% a 8% da emissão de CO veicular (gases de efeito estufa) na região metropolitana de São Paulo – Rodoanel como um todo. (Fonte: Avaliação Estratégica do Rodoanel).

Conforme São Paulo (2010), o Trecho Norte do Rodoanel, percorre 3 municípios - São Paulo, Guarulhos e Arujá - atravessando principalmente as áreas em expansão da periferia norte da mancha urbana contínua metropolitana, muito próxima aos limites das áreas de preservação dos Parques Estaduais, passando também por diversos remanescentes de atividades rurais e áreas de lazer, entre outros usos.

¹ <http://www.dersa.sp.gov.br/Empreendimentos/GrupoEmpreendimento.aspx?idGrupo=2>

O traçado é composto principalmente por usos rurais (49%), na sua maior parte (35%) campos antropizados que compreendem as áreas desmatadas, subutilizadas ou degradadas, os loteamentos não ocupados ou abandonados, os remanescentes de usos rurais e os fragmentos alterados de vegetação em estágios iniciais de regeneração - tais como campos e pastos, faixas de servidão, movimentos de terra, solo exposto, loteamentos abandonados entre outros usos de baixa intensidade, seguidos das atividades rurais, com 12% da área total. Cerca de 106 ha (24% do total) são compostos por usos urbanos, dos quais a categoria menos atingida é a Urbanização Consolidada com apenas 0,5%. As áreas de urbanização diferenciada, representadas pela categoria Núcleos de Chácaras, respondem por apenas 1,4% da área total. Destaca-se ainda que a Área Diretamente Afetada – ADA, irá atingir cerca de 13 ha de ocupações subnormais, o que irá demandar trabalhos sociais de apoio à realocação de população em situação de alta vulnerabilidade. O restante dos usos urbanos – áreas de expansão, industriais e equipamentos de porte – contribuem quase equitativamente com 5 a 6% do total (São Paulo, 2010).

Ainda segundo São Paulo (2010), a metodologia adotada para avaliação ambiental do empreendimento é constituída pelas etapas Identificação de Impactos Potenciais, Identificação e proposições de medidas preventivas mitigadoras e corretivas e, por uma avaliação e balanço socioambiental final. As medidas propostas são para evitar alterações de caráter potencial negativo sobre os componentes ambientais. Elas são organizadas em programas de forma a permitir a sua futura aplicação, acompanhamento e avaliação de resultados. Constituem compromissos do empreendedor para as etapas subsequentes de planejamento, construção e operação do Trecho Norte do Rodoanel.

Os programas ambientais devem ser implementados em todas as fases do empreendimento: fase pré-constitutiva, fase de construção e fase de operação. No momento, a obra encontra-se em fase de construção, sendo que a previsão para o término é março de 2018.

4 PROCEDIMENTOS TÉCNICO-OPERACIONAIS

Conforme pode ser observado na Figura 2, metodologia do trabalho baseou-se na execução das seguintes etapas:

- ✓ Levantamento e aquisição de dados: compilação e revisão de dados bibliográficos, tais como livros, periódicos eletrônicos nacionais e estrangeiros e levantamento de material cartográfico em formato analógico e digital;
- ✓ Mapeamento do uso e cobertura da terra: adaptação de mapeamentos existentes dos anos de 1980 e 2008. Generalização das legendas dos mapeamentos por meio da utilização de ferramentas de edição do software ArcGIS 2.0;
- ✓ Mapeamento do uso e cobertura da terra do ano de 2015;
- ✓ Trabalhos de campo;
- ✓ Análise das mudanças do uso e cobertura da terra no *software* LCM;
- ✓ Configuração dos Potenciais de Transição no *software* LCM e
- ✓ Previsão de Mudanças - Geração de simulações e cenários para os anos de 2015 e 2035.

Assim como no trabalho de Silva (2000), optou-se pela manutenção do entorno de 2 km do PEC como área objeto de estudo, por considerar que esta sofre influência imediata das mudanças de categorias de uso e cobertura da terra e que, por consequência, poderiam trazer impactos ambientais negativos ao PEC.

Com relação à escolha das datas dos mapeamentos, os anos de 1980 e 2008 foram escolhidos por apresentarem mapeamentos pré-existent da área de estudo. O ano de 2015 foi escolhido para execução do mapeamento atual e tornou-se possível graças à disponibilidade de produtos sensores de alta resolução espacial (imagens de satélite PLEIADES) para a área de estudo. O ano de 2035 foi escolhido como tempo futuro, pois considera-se que um período de 20 anos (2015-2035) é razoável para se observar mudanças significativas nas categorias de uso e cobertura da terra presentes no entorno do PEC.

4.1 Lista de Materiais

Mapas e Dados

- SMA/EMPLASA – Folhas IBGE Guarulhos (1984) e Itaquaquecetuba (1984), escala 1:50.000.
- Arquivos vetoriais em formato digital do Plano de Manejo do Parque Estadual da Cantareira;
- Arquivos vetoriais em formato digital da PMSP (2014);
- Arquivos vetoriais em formato digital do Centro de Estudos da Metrópole – CEM. (Setores censitários e Vulnerabilidade)

Softwares

- Land Change Modeler – LCM Clark Labs
- ArcGIS 10.3 ESRI

Produtos Sensores:

- Ortofotos digitais, Base Aerofotogrametria e Projetos, 2008.
- Imagens do Satélite Pleiades (EMPLASA) Projeto Rodoanel Mário Covas Trecho Norte, ano 2013.
- Imagens do Google Earth, anos 2014 e 2015.

Figura 2 – Fluxograma da Metodologia. Adaptado de Luiz (2014)

4.2 Mapeamento de Uso e Cobertura da terra dos anos de 1980, 2008 e 2015

Neste item serão expostos os procedimentos técnico-operacionais para a elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra da área de estudo.

4.2.2 Mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 1980

O mapa de uso e uso e cobertura da terra do ano de 1980 foi compilado e modificado do trabalho de Silva (2000). Para elaboração desse mapa, o autor utilizou técnicas tradicionais de fotointerpretação sobre fotografias aéreas em formato analógico.

A legenda detalhada do trabalho de Silva (2000) para o mapeamento de 1980 é constituída por 23 classes. Adotou-se para esse trabalho uma legenda genérica formada por quatro classes, sendo elas: cobertura vegetal natural, área urbana/expansão, utilização agrícola e lago/represa. Tabela 1

A categoria cobertura vegetal natural engloba áreas de vegetação primária (mata) e capoeira (vegetação arbórea-arbustiva secundária), o Parque Estadual da Cantareira, e pelos clubes que possuem significativa cobertura vegetal remanescente.

A categoria área urbana/expansão é formada por bairros, áreas residenciais, conjuntos habitacionais, condomínios, loteamentos, além de áreas industriais, áreas de mineração, área institucionais, aterro sanitário e movimento de terra/solo exposto. Parte-se do pressuposto que esses usos ocorrem predominantemente em áreas urbanas.

A categoria utilização agrícola engloba as classes reflorestamento (plantios antigos de *pinus* e eucaliptos), hortifrutigranjeira (hortas de chuchu e outras hortaliças) e campo antrópico/pastagem.

A categoria lago/represa engloba as massas d'água presentes na área do PEC e entorno tais como: Reservatórios do Engordador, Cabuçú e Águas Claras, além de pequenos lagos.

A generalização da legenda foi executada no *software* ArcGIS 9.3 com a utilização de ferramentas de edição. Em seguida, foi elaborado o respectivo *layout*, obtendo-se o mapa de uso e cobertura da terra do ano de 1980.

Tabela 1- Generalização da legenda dos mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1980/81 (Silva 2000) e 2008 (São Paulo, 2009)

LEGENDA DETALHADA (23 classes)	LEGENDA GENÉRICA (4 classes)
Mata Capoeira Parques Estaduais da Cantareira e Alberto Löfgren Clube	Cobertura vegetal natural
Reflorestamento Hortifrutigranjeira Campo antrópico/pastagem	Utilização agrícola
Bairro de médio padrão Bairro jardim Casas autoconstruídas Área residencial parcialmente ocupada Conjuntos habitacionais uni e multi-familiares Condomínio de alto padrão e chácara residencial-baixa densidade Condomínio de alto padrão e chácara residencial-alta densidade Loteamento desocupado Indústria Pedreira ativa Pedreira desativada Olaria Área institucional Aterro sanitário Movimento de terra/solo exposto	Área urbana/expansão
Lago/represa	Lago/represa

4.2.3 Mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2008

O mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2008 foi compilado do Plano de manejo do Parque Estadual da Cantareira (São Paulo, 2009). O processo de interpretação e análise visual foi realizado no *software* ArcView GIS 3.2, utilizando-se ortofotos em formato digital do ano de 2007, com resolução espacial de 0,68 cm.

A legenda detalhada do mapeamento do ano de 2008 (São Paulo, 2009) é constituída por 23 classes. Adotou-se para o mapeamento de 2008, o mesmo procedimento que foi adotado para o mapeamento de 1980. Utilizou-se uma legenda genérica formada

por quatro classes, sendo elas: cobertura vegetal natural, área urbana/expansão, utilização agrícola e lago/represa.

Assim como para o mapa de 1980, generalização da legenda também foi executada no *software* ArcGIS 9.3 com a utilização de ferramentas de edição. Em seguida foi elaborado o respectivo *layout*, obtendo-se o mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2008.

4.2.4 Mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2015.

O Mapa de uso e cobertura da terra de 2015 foi elaborado por meio da atualização do mapeamento de São Paulo (2009), utilizando-se imagens de satélite pancromáticas de alta resolução do Satélite Plêiades com 50 cm de resolução espacial, ano de 2013.

Além disso, para a área das obras do Trecho Norte do Rodoanel Mário Covas, foram utilizadas imagens do *software* Google Earth dos anos de 2014 e 2015.

As classes de uso e uso e cobertura da terra mapeadas foram as mesmas dos outros mapeamentos: cobertura vegetal natural, área urbana/expansão, utilização agrícola e lago/represa.

4.2.5 Trabalho de campo

Os trabalhos de campo foram realizados na área do Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km com o objetivo de observar as transformações ocorridas de 2008 para 2015, conferir e atualizar as categorias de uso e cobertura da terra mapeadas. Na Tabela 2 e Figura 3, podem ser observadas as vias percorridas e os locais visitados.

Tabela 2 – Bairros e localidades visitadas em trabalho de campo.

Data	Setor PEC	Bairros/Localidades
31/03/2014	sudoeste	V. N. Nova Cachoeirinha, Jd. Damasceno e Taipas.
12/02/2015	leste e noroeste	Cabuçu, Recreio São Jorge, Invernada (Guarulhos) e zona rural do município de Mairiporã.
23/09/2015	oeste	Condomínio Pq Suíço, Bairro Pq. Santa Inês e Condomínio Alpes da Cantareira.
18/12/2015	sudoeste	Horto Florestal, Vila Marieta, Vila Albertina e Jd. Cachoeira.
14/02/2016	oeste e sudoeste	Pedra Branca, Condomínio Itatinga II, Jd. Antártica, Jd. Vista Alegre, Jd. Paraná, Jd. Vitória Régia, Parque Taipas e Jd. Botuquara.

Figura 3 - Pontos visitados e vias percorridas em trabalho de campo: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

4.3 Análise de mudanças do uso e cobertura da terra

Neste item são apresentados os procedimentos técnico-operacionais realizados no *software* LCM-IDRISI para que fossem executadas a análise de mudanças de uso e

cobertura da terra e a modelagem da área de estudo. Todos os procedimentos foram descritos conforme *Land Change Modeler Help* (Clark Labs, 2013).

Conforme Clark Labs (2013) “a análise de mudanças no uso e cobertura da terra é um tema crucial para o meio ambiente e gerenciamento de recursos naturais, planejamento do uso e cobertura da terra, conservação da biodiversidade e redução das emissões de CO₂ por desmatamento e degradação florestal - REDD. O modelador de uso da terra *Land Change Modeler* - LCM do *software* Idrisi Selva, o primeiro passo é analisar mudanças históricas entre dois mapas de uso e cobertura da terra em diferentes períodos. O usuário especifica dois mapas de diferentes datas e o LCM executa rapidamente as mudanças entre os dois períodos. O usuário pode imediatamente observar e avaliar perdas e ganhos, variação líquida, persistência e transições específicas em mapas e em forma de gráfico”.

4.3.1 Parâmetros do projeto

Nessa aba são especificados os arquivos associados com as análises de mudanças de cobertura da terra de uma área específica. Para análises de predição e mudanças, a exigência mínima é a especificação de dois mapas de cobertura da terra que podem ser a base da compreensão da natureza de mudanças na região estudada e também o estabelecimento de amostras de transição que deverão ser modeladas. Os dois mapas de cobertura da terra devem ter *backgrounds*, legendas e características espaciais correspondentes. Se esses requisitos não forem cumpridos, uma nova tabela intitulada “*Harmonize*” será carregada para resolver essas questões (Clark Labs, 2013).

4.3.2 Análises de mudanças

O painel “análise de mudanças” fornece três tipos de gráficos de mudanças entre os dois mapas especificados no painel “parâmetros do projeto”. Possibilita ao usuário a geração de gráficos em diversas unidades de medidas (células, hectares, quilômetros

quadrados, acres, milhas quadradas, porcentagem de mudanças e porcentagem de área). As mudanças de unidades nesse painel faz com que as unidades do painel “mapas de mudanças” também mudem e vice-versa (Clark Labs, 2013).

Desta forma, para o presente trabalho, realizou-se a Análise de Mudanças do período de (1980-2008). Foram inseridos no LCM, os mapas de uso e cobertura da terra destas respectivas datas, obtendo-se gráficos de perdas e ganhos, de variação líquida por categoria e de contribuições para a variação líquida experimentado pelas classes de uso mapeadas.

4.3.3 Mapas de Mudanças

Esse painel fornece a capacidade de criar uma variedade de mapas de mudanças, incluindo mapas de persistência, perdas e ganhos, transições e trocas. As mudanças de unidades nesse painel fazem com que as unidades do painel “Análise de mudanças” também mudem e vice-versa (Clark Labs, 2013).

A geração dos mapas acima citados, permitiu o entendimento das principais mudanças e transições entre as classes ocorridas no período (1980-2008). Além disso, alguns desses mapas, tais como os mapas mudanças, se constituíram como base para gerar variáveis explanatórias posteriormente inseridas na etapa modelagem.

4.4 Potenciais de Transição

4.4.1 Sub-modelos de transição: status

Nesse painel, uma tabela lista todas as transições que existem entre os dois mapas de cobertura da terra (exceto aqueles filtrados no painel de análise de mudanças) e requerem que o usuário especifique quais transições serão usadas para calcular os potenciais de transição.

No caso do presente trabalho, observou-se na etapa anterior à análise de mudanças, que a principal mudança ocorrida no período 1980-2008, foi o aumento expressivo da

categoria área urbana/expansão. Desta forma, nesse painel, foram escolhidas as mudanças de todas as categorias para a categoria área urbana, sendo que o sub-modelo foi denominado como “urbanização”. Para a geração das simulações dos cenários 3 e 4, também foram escolhidas transições para áreas de utilização agrícola.

4.4.2 Conversões de Variáveis

O Painel de Utilidades de Conversão de Variáveis é um painel opcional para modelagem da transição potencial que fornece uma seleção das transformações mais comumente utilizadas. As conversões disponíveis incluem: *natural log*, exponencial, *logit*, raiz quadrada, *power*, e probabilidade.

No presente trabalho, foi utilizada a transformação “Evidence Likelihood”. Ela tem um significado efetivo na incorporação de variáveis categóricas dentro da análise. Para executar o modelo de transição potencial na opção “*MLP Neural Network*” variáveis qualitativas devem ser convertidas em um conjunto de variáveis booleanas, ou transformadas utilizando-se a opção de conversão “Evidence Likelihood”. (Clark Labs, 2013).

4.4.3 Elaboração de variáveis explanatórias

As variáveis explanatórias devem ter um “potencial explicativo” das mudanças do uso e cobertura da terra predominantes em um determinado período. Elas entrarão no sub-modelo de transição potencial em formato raster.²

No presente trabalho, as variáveis explanatórias derivaram de mapeamentos prévios, como por exemplo:

² Entende-se como “Estrutura de dados *raster*” a representação de dados espaciais em que os elementos são codificados na forma de uma matriz (*grid*). Quanto menor for o tamanho da quadrícula dessa matriz, maior será a semelhança com a representação vetorial do elemento. O tamanho da quadrícula é função da escala de trabalho e do nível de detalhe desejado (Teixeira e Christofolletti, 1997).

- ✓ Mapas de mudanças - resultantes da comparação entre os mapas de uso de 1980 e 2008, obtidos por meio da aba “*change maps*” do LCM e posteriormente inseridos na extensão Spatial Analyst do software ArcGIS 10.3 Ex: Distância de mudanças.
- ✓ Mapas obtidos de fontes secundárias:
 - Altimetria, Parques Estaduais, Declividade, Vias de Circulação, Vetores de Pressão Negativos (São Paulo, 2009);
 - Parques Municipais (PMSP, 2014);
 - População residente em domicílios particulares (IBGE, 2010);
 - Vulnerabilidade Social (CEBRAP, SESC e SAS-PMSP, 2004);
 - Empreendimentos imobiliários residenciais. (CEM, 2013)

Esses mapeamentos foram elaborados inicialmente em formato vetorial (shape) e posteriormente convertidos em formato raster por meio da extensão *Spatial Analyst* do software ArcGIS 10.3 .

4.4.4 Teste e Seleção de Variáveis

Esse painel fornece um rápido teste do poder do potencial explanatório de uma variável. É um teste grosseiro, que não reconhece interações entre os efeitos. Se o usuário estiver utilizando a ferramenta de modelagem “Multi-Layer-Perceptron” (MLP), baseado em redes neurais, existe um processo de estimativa relacionado ao processo de desenvolvimento do modelo (Clark Labs, 2013).

Variáveis quantitativas e qualitativas podem ser testadas (contudo, as variáveis qualitativas necessitam ser fracionadas em um conjunto de camadas separadas booleanas ou transformadas com a ferramenta de transformação no painel “*Variable Transformation Utility*” do LCM. Em geral, as variáveis que apresentam resultados no Teste de Cramer V com cerca de 0.10 ou valor mais alto, são úteis e poderão ser selecionadas para entrada no sub modelo de transição potencial (Clark Labs, 2013).

Um alto Cramer V, indica que o valor do potencial explanatório da variável é bom, mas ele não garante um forte desempenho desde que ele não leve em consideração requisitos matemáticos da abordagem de modelagem utilizada e a complexidade das

relações. Contudo, é uma boa indicação de que a variável pode ser descartada se o Cramer V for baixo (Clark Labs, 2013).

A Tabela 3 apresenta a relação de variáveis explanatórias testadas para a construção e calibração do sub modelo de transição utilizado no trabalho.

Tabela 3 - Variáveis explanatórias testadas para construção e calibração do sub-modelo de transição.

Variáveis explicativas	Unidade
Altimetria	%
Declividade	m
Distância das áreas de utilização agrícola	m
Distância das áreas urbanas	m
Distância de cursos d'água	m
Distância de mudanças (geral)	m
Distância de mudanças para áreas urbanas	m
Distância dos empreendimentos imobiliários residenciais	m
Distância dos vetores de pressão negativos	m
Distância Vias	m
EV likelihood 1980-2008	-
Parques Estaduais e Municipais	-
População residente em domicílios particulares	-
Vulnerabilidade Social	-

4.4.5 Estrutura do Sub-modelo de Transição

Esse painel fornece uma tabela para especificação e descrição das variáveis que farão parte do sub modelo de transição. Elas podem ser adicionadas ao modelo como componentes estáticos ou dinâmicos. As variáveis estáticas expressam aspectos de adequação básica para a transição sob consideração e são imutáveis ao longo do tempo. As variáveis dinâmicas são forças condutoras dependentes do tempo, tais como a proximidade de infraestruturas ou desenvolvimento (por exemplo estradas) e são recalculadas ao longo do tempo durante o curso da uma predição (Clark Labs, 2013).

No presente trabalho, foram escolhidas 11 variáveis para serem utilizadas no sub modelo de transição, conforme a Tabela 3. As variáveis “Parques Estaduais e

municipais” e “Rodoanel” foram escolhidas como “dinâmicas”, todas as outras foram escolhidas como “estáticas”.

4.4.6 Execução do Sub-modelo de Transição

Conforme (Clark Labs, 2013), esse painel é onde a modelagem real é implementada. Ele executa o sub-modelo de transição com base nas transições que foram previamente especificadas no painel “Sub-modelos de transição: status”. O usuário pode escolher uma, entre três metodologias que são fornecidas para modelagem: *Multi-Layer Perceptron* (MLP)³ (redes neurais), *Similarity-Weighted Instance-based Machine Learning* (SimWeight) e Regressão logística. A rede neural (MLP) oferece um modo automático que não requer intervenção do usuário. O resultado em ambos os casos é um mapa de transição potencial para cada transição - uma expressão do potencial específico de tempo para a mudança.

Quando o botão “Executar Sub-modelo” é clicado, amostras são extraídas dos dois mapas de cobertura da terra de áreas que foram submetidas às transições modeladas bem como as áreas que foram eleitas para mudar, mas não mudaram.

No presente trabalho, a metodologia escolhida para a modelagem baseou-se em MLP Neural Network (redes neurais). Após 10.000 iterações, a taxa de precisão do sub modelo foi de 75%. No final do processamento do sub modelo, foram obtidos mapas com três tipos de transições:

- ✓ De cobertura vegetal natural para área urbana/expansão;
- ✓ De utilização agrícola para área urbana/expansão e;
- ✓ De lago/represa para área urbana/expansão

³ *MLP Neural Network* - Uma rede neural artificial consiste de uma rede conectada de unidades de processamento que são modeladas com base nas propriedades básicas dos neurônios do cérebro humano. Uma das suas principais vantagens é que ela é livre de distribuição, isto é, nenhum modelo subjacente é assumido para a distribuição multivariada dos dados específicos de classe. Redes neurais são não-lineares e podem ser concebidas como uma função matemática complexa que converte dados de entrada (por exemplo, imagem de satélite) para uma saída desejada (por exemplo, uma classificação da cobertura da terra).

4.5 Planejamento

Segundo Clark Labs (2013), no painel de “restrições e incentivos” o usuário especifica mapas de restrições/incentivos para cada uma das transições no modelo. Esse painel deve ser preenchido antes de ser executado o painel de “alocação de mudanças”.

Restrições e incentivos são tratados de forma unificada. Valores com valor zero (0) no mapa são tratados como restrições absolutas, enquanto que mapas com valor um (1) não possuem restrições (são espontâneos) e consequentemente não tem impacto. Valores menores que um (1), mas acima de zero atuam como “desincentivos”, enquanto que valores maiores que um (1), atuam como incentivos. Um mapa de restrições/incentivos, pode ser por exemplo, um mapa de áreas de reservas propostas existentes e ou incentivos fiscais. A forma como feições de restrições e incentivos trabalham é baseada no potencial de transição associado com cada transição e são multiplicados pelo mapa de incentivos/restrições (Clark Labs, 2013).

Conforme recomendações de Clark Labs (2013), restrições e incentivos devem ser utilizados com cuidado, pois pequenas mudanças podem ter grandes impactos. Normalmente, o usuário terá áreas de restrições absolutas (0), áreas onde potenciais de transições são aplicáveis (1) e poucas áreas que podem ser ligeiramente acima ou abaixo de 1 (por ex. 0.9 to 1.1).

4.5.1 Restrições à mudança

No presente trabalho a variável “Parques Estaduais e Municipais” foi inserida na “aba planning” como tema restritivo, para isso foi atribuído valor zero (0) para a área dos parques, que foi considerada como de “restrição absoluta” às mudanças do uso e cobertura da terra na área de estudo.

4.5.2 Incentivo à mudança

No presente trabalho a variável “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” foi incluída nessa aba. Foi atribuído o valor 1.6 para a área abrangida pela rodovia, portanto,

colocando-o como “incentivo” às mudanças de uso e cobertura da terra na área de estudo. A data efetiva de sua implantação é o ano de 2018, quando a rodovia deverá entrar em fase de operação.

4.6 Previsão de Mudanças

4.6.1 Modelagem de Demanda de Mudanças

Esse painel leva o usuário a determinar a quantidade de mudanças que ocorrerá em uma data futura, utilizando o processo de predição Cadeia Markov ou um modelo especificado pelo usuário.

O procedimento padrão Cadeia Markov determina a quantidade de mudanças utilizando um mapa de cobertura da terra mais antigo e outro mais recente, com uma data especificada. O procedimento determina exatamente quanto de cobertura da terra seria esperado de mudar de uma data mais recente para a data da previsão, baseada na projeção dos potenciais de transição para o futuro e cria um arquivo de probabilidades de transição. O arquivo de probabilidades de transição é uma matriz que grava a probabilidade que cada categoria de cobertura da terra possui para mudar para todas as outras categorias. Alternativamente, o usuário pode especificar um arquivo de probabilidade de transição desenvolvido por um modelo externo.

No trabalho, foram escolhidas as datas de 2015 e 2035 para conhecer as probabilidades de transição entre as categorias de uso e cobertura da terra mapeadas e posteriormente realizar simulações.

4.6.2 Alocação de Mudanças

Nesse painel, o usuário configura os parâmetros para a predição e executa o processo. Predições rígidas (*hard prediction*) e flexíveis (*soft prediction*) podem ser produzidas.

Dada a data de previsão, especificada no Painel anterior “Modelagem de Demanda de Mudanças”, a data da imagem de cobertura mais recente, o número de estágios de recálculo dita a frequência com que os elementos dinâmicos são recalculados. A

variável dinâmica é uma das que variam com o tempo. Por exemplo, uma das variáveis associadas com uma transição específica pode ser distância de áreas desmatadas. Com o avanço do tempo, a extensão destas áreas desmatadas aumentará, mudando assim esta variável de distância. Todas as variáveis indicadas como sendo dinâmicas, são recalculadas em cada estágio. Componentes opcionais podem ser incorporados no processo. O usuário deverá selecionar essas opções, previamente configuradas na aba “planning” para as mesmas serem incorporadas na alocação das mudanças. O usuário também pode selecionar a opção vídeo, caso queira que seja produzido um vídeo da alocação de mudança.

No presente trabalho foram realizadas simulações de uso e cobertura da terra para os anos de 2015 e 2035. As simulações levaram em consideração o estabelecimento dos componentes: *Constraints/Incentives*, no qual o tema “Parques e Estaduais” foi considerado como “restritivo” às mudanças; e “Alterações de Infraestruturas Planejadas”, onde a variável “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” foi considerada como possível empreendimento indutor de mudanças no uso e cobertura da terra.

4.6.3 Validação

Esse painel leva o usuário a determinar a qualidade da predição do mapa de uso e cobertura da terra em relação ao mapa da realidade. Ele faz isso, por meio da execução de uma tabulação cruzada entre o mapa de cobertura da terra, o mapa de predição e o mapa da realidade.

A imagem de saída da validação, ilustrará a precisão dos resultados do modelo, onde:

A | B | B = Hits (acertos) - O modelo previu uma mudança e houve mudança.

A | A | B = Misses (erros) - O modelo previu uma persistência e houve mudança.

A | B | A = False alarm (Falsos alarmes) - O modelo previu uma mudança e houve persistência.

Segundo o quadro, A e B são classes mapeadas ou simuladas.

No caso deste trabalho:

$M^1 \mid S \mid M^2$ correspondem a uma determinada classe:

- ✓ M^1 : mapeada em 2008. (Mapa de Uso e Cobertura da Terra);
- ✓ S: simulada em 2015 (Mapa de Predição) e;
- ✓ M^2 : mapeada em 2015. (Mapa da realidade)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos mapeamentos dos anos de 1980, 2008 e 2015. Em seguida, são analisadas as mudanças no Uso e Cobertura da terra e apresentados os resultados da modelagem e as simulações de mudanças.

5.1 Mapeamento do Uso e Cobertura da para os anos de 1980, 2008 e 2015

A seguir, são apresentados os resultados relacionados ao mapeamento do uso e cobertura da terra para os anos de 1980, 2008 e 2015. Ver Figuras 4, 5 e 6.

5.1.1 Mapa de Uso e Cobertura da Terra do ano de 1980

Figura 4 - Mapa de Uso e Cobertura da terra, 1980. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.1.2 Mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 2008.

Figura 5 -Mapa de Uso e Cobertura da terra, 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.1.3 Mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 2015.

Figura 6 - Mapa de Uso e Cobertura da terra, 2015. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Na Tabela 4 são apresentadas as categorias de Uso e Cobertura da terra dos anos de 1980, 2008 e 2015, suas respectivas quantificações em hectares e percentuais em relação à área de estudo.

Tabela 4 - Áreas das categorias de uso e cobertura da Terra dos anos de 1980, 2008 e 2015: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Categoria	1980		2008		2015	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
cobertura vegetal	12.433,59	56,31	13.349,25	60,46	13.884,93	62,89
área urbana/expansão	5.954,76	26,97	7.270,83	32,93	6.601,32	29,90
utilização agrícola	3.640,59	16,49	1.412,37	6,40	1.536,48	6,96
lago/represa	50,04	0,23	46,53	0,21	56,25	0,25
Total	22.078,98	100	22.078,98	100	22.078,98	100

Conforme pode ser observado na Tabela 4 e no Gráfico 1, a categoria de Uso e Cobertura da terra predominante na área de estudo é representada pela cobertura vegetal natural. Em 1980 essa categoria possuía uma área de 12.433,59 ha, (56,31%), em 2008, houve aumento da categoria para 13.349,25 ha (60,46%) e em 2015 para 13.884,93 ha (62,89%).

Gráfico 1 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 1980, 2008 e 2015: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

cvn – cobertura vegetal natural

au – área urbana/expansão

agri – utilização agrícola

l/r – lago/represa

No ano de 1980, a categoria área urbana/expansão apresentava uma área de 5.954,76 ha (26,97%) e em 2008, 7.270,83 ha (32,93%), fato que chama a atenção pois representa grande aumento no período (1980-2008). Já no ano de 2015, essa classe apresenta uma diminuição de área para 6.601,32 ha (29,90%).

Por sua vez, a categoria utilização agrícola, apresentou um decréscimo significativo no período 1980-2008. No ano de 1980, esta categoria ocupava 3.640,59 ha (16,49%), já no ano de 2008 reduziu-se para 1.412,37 ha, representando apenas 6,40% da área de estudo. No ano de 2015, houve um pequeno incremento dessa categoria para 1.536,48 ha (6,96%) da área de estudo.

No ano de 1980, a categoria lago/represa apresentava área de 50,04 ha (0,23%). No ano de 2008, essa área reduziu para 46,53 ha (0,21%) em 2015, houve um pequeno aumento para 56,25 ha (0,25%). Portanto, essa categoria não apresentou variação muito significativa nos três anos mapeados.

5.2 Análise de mudanças do Uso e Cobertura da terra

5.2.1 Mapas de mudança

Conforme apresentado na Figura 7, entre 1980 e 2008, o crescimento das áreas urbanas se deu principalmente sobre áreas de utilização agrícola, com 66.16%, e de cobertura vegetal natural, com 33.70%. Dessa maneira, é possível afirmar que a expansão das áreas urbanas tem forte relação com a conversão de áreas de utilização agrícola e cobertura vegetal natural.

Essa tendência é reforçada pelas áreas que mudaram para utilização agrícola, que podem ser observadas na Figura 8. As classes que contribuíram para a transformação

da categoria utilização agrícola foram: área urbana 50,15% e cobertura vegetal natural 49,85%.

Em relação às áreas que mudaram para cobertura vegetal natural (Figura 9), temos: 55,94% das áreas urbanas/expansão foram ocupadas por cobertura vegetal natural, 43,99 % por áreas de utilização agrícola e apenas 0,07% por lago/represa.

Cabe aqui destacar que a transição de áreas urbanas mapeadas em 1980, para áreas de cobertura vegetal natural mapeadas em 2008, deve-se a alguns fatores:

- ✓ Produtos sensores e escalas utilizados nos mapeamentos. Como descrito no Capítulo 4 - Metodologia (item 4.2), em 1980 o mapeamento foi realizado por meio de processos tradicionais de fotointerpretação e em escala 1:35.000, o que impossibilitava a visualização e demarcação das categorias de uso da terra com precisão. No ano de 2008, o mapeamento foi realizado com base em ortofotos digitais, inseridas em Sistemas de Informações Geográficas, com a opção de utilização de recursos de “zoom”, o que facilitou a visualização e demarcação de uma quantidade maior de áreas com cobertura vegetal;
- ✓ Em 2008, algumas áreas mapeadas como cobertura vegetal natural, correspondem a áreas anteriormente mapeadas como condomínios ou loteamentos desocupados, portanto, pertencentes a áreas urbanas. Com o passar do tempo, algumas delas não foram efetivamente ocupadas, havendo regeneração da cobertura vegetal natural. Uma possível solução para esse problema, seria a criação de uma classe específica para condomínios e chácaras, que não “área urbana/expansão”.
- ✓ Os respectivos mapeamentos foram realizados com objetivos e técnicos diferentes. Apesar dos mapeamentos terem sido realizados com base na mesma técnica, envolvem certa subjetividade;

5.2.1.1 Mapa de mudança de Uso e Cobertura da terra para área urbana

Figura 7- Áreas onde ocorreram mudanças de uso e cobertura da terra para área urbana entre os anos de 1980 e 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.2.1.2 Mapa de mudança de Uso e Cobertura da terra para utilização agrícola

Figura 8 - Áreas onde ocorreram mudanças de uso e cobertura da terra para utilização agrícola entre os anos de 1980 e 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.2.1.3 Mapa de mudança de Uso e Cobertura da terra para cobertura vegetal natural

Figura 9 – Áreas onde ocorreram mudanças de uso e cobertura da terra para cobertura vegetal natural entre os anos de 1980 e 2008. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.2.2 Exemplos de Transições entre categorias de Uso e Cobertura da Terra

Para exemplificar transições entre categorias, foram elaboradas ilustrações com base em fotografia aérea de 1980, ortofoto digital de 2008 e fotografia do local de 2015. (Figuras 10 e 11)

5.2.2.1 Transição da categoria utilização agrícola/ campo antrópico/pastagem para área urbana/expansão no período 1980-2008.

Figura 10 - Condomínio Parque Itaguaçu da Cantareira em 1980, 2008 e 2015, respectivamente.

5.2.2.2 Transição da categoria cobertura vegetal natural para a urbana/expansão no período 1980-2008.

1980

2008

2015

Figura 11 - Loteamento Vitória Régia em 1980, 2008 e 2015, respectivamente.

5.3 Modelagem das mudanças do Uso e Cobertura da terra - Potenciais de Transição

Nesse item são apresentados os passos para a elaboração do sub modelo de transição potencial. São eles: definição das transições de interesse; elaboração de variáveis explanatórias, teste e seleção de variáveis; e modelagem das transições potenciais (descritas no Capítulo 4 - Item 4.4 Potenciais de Transição).

5.3.1 Elaboração de variáveis explanatórias

A seguir, são apresentadas, as variáveis explanatórias selecionadas para entrada no sub-modelo de transição potencial (Figuras 12 a 22). Elas foram elaboradas segundo procedimentos descritos no capítulo 4, item 4.4.3.

Figura 12 - Altimetria: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Figura 13 - Distância em relação às áreas de utilização agrícola: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Figura 14 - Distância em relação às áreas urbanas: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Figura 15 - Distância das áreas de mudança: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Figura 16 - Distância de mudança em relação às áreas urbanas: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Figura 17 - Distância dos empreendimentos imobiliários residenciais: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km. Fonte: (CEM, 2013)

Figura 18 - Distância de Vetores de Pressão Negativos: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km. Fonte: (São Paulo, 2009)

Figura 19 - Distância de Vias de Circulação: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Figura 20 - EV Likelihood⁴ 1980-2008: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

⁴ A transformação “EV Likelihood” é um meio eficaz para incorporação de variáveis categóricas dentro da análise de mudanças. O procedimento procura a frequência relativa de pixels pertencentes às diferentes categorias dessa variável dentro de áreas de mudança (CLARK LABS, 2013).

Figura 21 - Parques Estaduais e Municipais

Figura 22- Vulnerabilidade Social: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.
Fonte: (CEBRAP, SESC e SAS-PMSP, 2004).

5.3.2 Teste e Seleção de Variáveis

Após a definição das transições de interesse (descrita no Capítulo 4 – Item 4.4.1), foi feito o teste e seleção das variáveis explicativas relacionadas às mudanças do Uso e Cobertura da terra. O critério para inclusão das variáveis explicativas no sub-modelo final, foram definidos no Capítulo 4 – Item 4.4.4. Foram utilizadas no sub-modelo final todas as variáveis que apresentaram Cramer-V superior a 0,10. Na Tabela 6 são apresentadas as variáveis explicativas testadas e o status em relação à inclusão ou não no sub-modelo de transição potencial.

Tabela 5 - Resultado do teste e seleção das variáveis explanatórias para inclusão no sub-modelo de transição potencial.

Variáveis explanatórias	Cramer -V	Unidade	Status de Seleção
Altimetria	0.2623	%	selecionada
Declividade	0.1084	m	não selecionada
Distância das áreas de utilização agrícola	0.1816	m	selecionada
Distância das áreas urbanas	0.2042	m	selecionada
Distância de cursos d'água	0.0359	m	não selecionada
Distância de mudanças (geral)	0.1879	m	selecionada
Distância de mudanças para áreas urbanas	0.1890	m	selecionada
Distância dos empreendimentos imobiliários residenciais	0.1737	m	selecionada
Distância dos vetores de pressão negativos	0.1564	m	selecionada
Distância Vias	0.1680	m	selecionada
EV likelihood 1980-2008	0.6214	m	selecionada
Parques Estaduais e Municipais	0.2809	m	selecionada
População residente em domicílios particulares (com base nos setores censitários 2010)	0.0627	-	não selecionada
Vulnerabilidade Social	0.1682	-	selecionada

As variáveis com Cramer-V mais alto são: EV_Likelihood (0.6214), Parques Estaduais e Municipais (0.2809), Altimetria (0.2623), Distância das áreas urbanas (0.2042), Distância das áreas de utilização agrícola (0.1816), e Distância das áreas de mudança

e Distância das áreas de mudança para áreas urbanas, apresentaram resultados similares (0,1879 e 0.1890), respectivamente.

Conforme Luiz (2014), “para as áreas urbanas é esperado que quanto mais próximo das áreas ocupações urbanas, maior seja o potencial de ocorrerem mudanças. O raciocínio é o mesmo para as áreas de mudança: quanto mais próxima de alguma área que ocorreu mudanças, maior a chance de ocorrer alguma conversão no uso e cobertura da terra”.

5.3.3 Execução do Sub-modelo de Transição

O melhor resultado do treinamento da MLP Neural Network a partir da interação das variáveis explanatórias com as transições de interesse (descritas no Capítulo 4 – Item 4.4.6) foi de 75 % após 10.000 iterações.

5.3.4 Mapas de Transição Potencial

No final do processamento do sub-modelo de transição potencial, são gerados mapas de conversão potencial pelo *software*. Para cada transição escolhida anteriormente, é gerado um mapa com probabilidade de mudança com valores entre zero e um.

Na Figura 23 são apresentados os mapas de potencial de conversão para área urbana, principal transição ocorrida no período 1980-2008. Os mapas representam as transições de cobertura vegetal natural para área urbana e de utilização agrícola para área urbana.

Em relação ao mapa potencial de conversão de cobertura vegetal para área urbana, observa-se que as áreas com alta probabilidade de mudança (em vermelho), encontram-se predominantemente na face norte do PEC, a oeste (município de Caieiras), centro (município de Mairiporã, próximo ao limite do PEC) e à nordeste e também leste, no município de Guarulhos. Por sua vez, as áreas do PEC, PEAL e Parques Municipais (em verde), apresentam baixo potencial de conversão em área urbana, já que são Unidades de Conservação.

As áreas de utilização agrícola com probabilidade alta de mudança para área urbana, concentram-se preferencialmente na face sul do PEC, no bairro Cabuçu, município de Guarulhos. Áreas com média probabilidade de mudança, localizam-se próximas ao bairro Cachoeira, em São Paulo. Áreas de utilização agrícola com baixa probabilidade de mudança, localizam-se preferencialmente na face norte do PEC.

Figura 23 - Mapas de Potenciais de Conversão para área urbana: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.4 Planejamento

5.4.1 Restrições à mudança - Parques Estaduais e Municipais

A variável “Parques Estaduais e Municipais” foi inserida na “aba planning” como tema “restritivo às mudanças”, para isso foi atribuído valor zero (0) para a área dos parques, que foi considerada como de “restrição absoluta” às mudanças do Uso e Cobertura da terra na área de estudo. Essa variável encontra-se representada na Figura 21 do item 5.3.1 deste mesmo capítulo.

5.4.2 Incentivo à mudança - Rodoanel Mário Covas Trecho Norte

A variável “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” (Figura 24) foi inserida na “aba planning” como tema “incentivo às mudanças”. Foi atribuído o valor 2.0 para a área abrangida pela rodovia.

Figura 24 – Rodoanel Mário Covas Trecho Norte como “Incentivo à mudança”

5.5 Previsão de Mudanças

5.5.1 Modelagem de Demanda de Mudanças

A modelagem de demanda de mudanças e validação do modelo de mudança de Uso e Cobertura da terra é efetuada pelo *software* LCM, por meio da correlação entre os mapas de potenciais de conversão e a matriz de transição das cadeias Markov⁵. Para gerar a matriz de transição, o usuário apenas digita o ano desejado para a alocação de mudança. Conforme Clark Labs (2013) “o arquivo de probabilidades de transição é uma matriz que grava a probabilidade que cada categoria de Uso e Cobertura da terra possui para mudar para todas as outras categorias”. A matriz de transição do uso cobertura da terra, entre 1980-2008, é apresentada na Tabela 7 que mostra nas diagonais os percentuais de persistência e nas linhas o percentual de mudança”.

Tabela 6 - Matriz de transição potencial para as classes de uso e cobertura da terra entre os anos de 2008 e 2015.

2008/2015	1.cvn.	2. au	3.agri	4. l/r
1.cvn.	0.9726	0.0192	0.0082	0
2. au	0.0579	0.9207	0.0213	0.0001
3.agri	0.1038	0.3675	0.5287	0
4.l/r	0.0035	0.0223	0	0.9742

1. cvn – cobertura vegetal natural
2. au – área urbana/expansão
3. agri – utilização agrícola
4. l/r – lago/represa

Assim como no trabalho de Luiz (2014), o cálculo da quantidade de mudança para 2015, mostra que para um período de sete anos, a tendência das classes de cobertura é maior para persistência do que para mudança. Tal fato pode ser observado por meio dos valores na diagonal em negrito, que destacam a persistência das categorias. Para a maioria das classes de cobertura, o valor da persistência foi superior a 90 % de probabilidade. A única exceção são as áreas de utilização agrícola. Em relação às

⁵ Cadeias Markov - Um processo markoviano é aquele em que o estado de um sistema pode ser determinado pelo conhecimento do seu estado anterior e da probabilidade de transição de um estado para outro (CLARK LABS, 2013).

demais classes de cobertura, a maior probabilidade de mudança envolve a conversão de áreas agrícolas para áreas urbanas (36,75%)

Desta forma temos em ordem decrescente, os valores de persistência das classes: l/r para l/r (97,42%), cvn para cvn (96,26%), au para au (92,07%), agri para agri (52,87%). A maior probabilidade de conversão envolve a mudança da categoria “utilização agrícola” para “área urbana” (36,75%). Em segundo lugar, a conversão de “utilização agrícola” para “cobertura vegetal natural” com (10,38%). As demais probabilidades de conversão apresentam valores pouco representativos.

5.5.2 Alocação de mudanças - Simulação do Uso e Cobertura da terra para 2015

Na Figura 25 são apresentados dois mapas: o primeiro, de Uso e Cobertura da terra para o ano de 2015, elaborado por meio de interpretação visual de imagens de alta resolução e o segundo, o mapa simulado pelo LCM, também para o ano de 2015.

Figura 25 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra para 2015 (mapeado a partir de imagens de alta resolução) e 2015 (simulado pelo modelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Gráfico 2 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 2015 (mapa real) e 2015 (simulado pelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Observando-se a Figura 25 e o Gráfico 2, temos:

- Diminuição da cobertura vegetal natural de 13.884.96 ha, (62,89%) para 13.093.20 ha, (59,30%)
- Aumento da categoria área urbana/expansão de 6.601.32 (29,90%) para 8.046.63 ha, (36,44%);
- Diminuição drástica da categoria “utilização agrícola”, de 1.536.48 (6,96%) para 893.52 ha (4,05%) e,
- Diminuição da categoria lago/represa, de 56.25 ha (0,25%) para 45.63 ha (0,21%)

Desta forma, pode-se dizer que a simulação de Uso e Cobertura da terra efetuada pelo LCM se mostrou mais “negativa” do que o mapa real, em relação à conservação da cobertura vegetal natural, uma vez que apresentou menor quantidade dessa categoria, aumento expressivo de área urbana e diminuição significativa das áreas de utilização agrícola. Lembramos que, na simulação para 2015 efetuada pelo LCM, a variável “Parques Estaduais e Municipais” foi adicionada na “Aba Planning” como “restritiva às mudanças”, ou seja, com probabilidade nula de mudança. Por esse

motivo as áreas, cobertas por vegetação natural, não apresentaram mudanças na simulação feita pelo LCM.

5.6 Validação do Uso e Cobertura da terra para 2015

O processo de validação do Uso e Cobertura da terra para 2015 foi realizado no LCM como descrito no Cap. 4 Metodologia, item 4.6.3

Segundo CLARK LABS (2006-2007), “o processo de validação leva o usuário a determinar a qualidade da simulação do mapa de uso da terra em relação ao mapa da realidade. Ele é executado por meio da execução de uma tabulação cruzada entre o mapa de Uso e Cobertura da terra, o mapa de simulação e o mapa da realidade”. O resultado do processo de validação é apresentado na forma de um mapa, contendo *hits*, *misses* e *false alarms* que podem ser definidos como:

$A | B | B = \text{Hits (acertos)}$ - O modelo previu uma mudança e houve mudança.

$A | A | B = \text{Misses (erros)}$ - O modelo previu uma persistência e houve mudança.

$A | B | A = \text{False alarm (Falsos alarmes)}$ - O modelo previu uma mudança e houve persistência.

Onde A e B são classes mapeadas ou simuladas

$M^1 | S | M^2$

Onde M^1 : classe mapeada em 2008.

S: classe simulada em 2015.

M^2 : classe mapeada em 2015

A Figura 26 e o Gráfico 3 – ilustram a validação da simulação do Uso e Cobertura da terra para o ano de 2015 para a área de estudo.

Figura 26 - Validação da Simulação do Uso e Cobertura da terra para 2015. Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Gráfico 3 -Representatividade de *hits*, *misses* e *false alarms*, na validação da simulação do Uso e Cobertura da terra para 2015.

Observando-se a Figura 26 e o Gráfico 3, em relação às áreas que apresentaram mudanças, a validação apresentou *misses* (erros), em sua maior parte (59,69%); em segundo lugar, *false alarms* com 37,44% e poucos *hits* (acertos), representando 2,87% da área.

5.6.1 Misses

Os misses são “não acertos” que ocorrem quando o modelo previu a persistência de uma determinada categoria, quando na realidade, houve uma mudança. Nesse caso, os *misses* representam áreas que foram mapeadas em 2008 como classe (A); apontadas na simulação como a mesma classe (A); mas no mapeamento real de 2015, ocorreu alteração de classe (B).

Nesse caso, os *misses* representam áreas que foram mapeadas em 2008 como classe (A); apontadas na simulação como a mesma classe (A); mas no mapeamento real de 2015, ocorreu alteração de classe (B).

Encontram-se distribuídos em toda a área de estudo, como pode ser observado na Figura 26, correspondendo às áreas de “movimentação de terra” da obra do Rodoanel Mário Covas Trecho Norte, localizadas na face sul do PEC e também a manchas de cobertura vegetal natural que anteriormente haviam sido mapeadas como área urbana, e que atualmente encontram-se em processo de regeneração. A simulação necessita de uma classe de uso e uma tendência de mudança, do contrário, não há como prever a mudança, ou seja, fatos isolados resultam em misses.

5.6.2 False alarms

Os falsos alarmes são um tipo de “não acerto” que ocorrem quando o modelo previu uma mudança, mas na realidade houve persistência de uma determinada categoria. Nesse caso, falsos alarmes representam áreas que foram mapeadas em 2008 como classe (A); apontadas na simulação como outra classe (B); e no mapeamento real de 2015, houve persistência de classe (A).

Na área de estudo os falsos alarmes localizam-se na face sul e norte do PEC, com predominância do setor leste. essas manchas correspondem em sua maior parte, a áreas que em 2008 foram mapeadas como “utilização agrícola” e em 2015 ainda permanecem como áreas agrícolas, porém, pela simulação, haviam sido indicadas como áreas urbanas.

Essas manchas localizam-se predominantemente na face sul do PEC. Já na face norte, manchas de falsos alarmes foram mapeadas como cobertura vegetal natural em 2008, mas em 2015 permaneceram como tal, sendo que a simulação havia previsto mudança para área urbana. Ou seja, para esses dois tipos de ocorrência, a simulação não previu a persistência dos usos, por isso o resultado em “falsos alarmes”.

5.6.3 Hits

Os *hits* são acertos, casos em que o modelo previu uma mudança e realmente houve mudança. Representam áreas que foram mapeadas em 2008 como classe (A); apontadas na simulação como outra classe, (B); e no mapeamento real de 2015, houve mudança de classe (B).

Correspondem em sua maior parte, a áreas que eram de utilização agrícola, e foram mapeadas e simuladas como áreas urbanas, resultando em acertos. Localizam-se predominantemente na face sul do PEC, em áreas próximas às obras de implantação do Rodoanel Mário Covas Trecho Norte.

5.6.4 Considerações sobre os resultados da Validação da Simulação “*Hard Prediction*” para o ano de 2015.

Segundo Luiz (2014), na alocação *hard prediction* a simulação do Uso e Cobertura da terra se dá de forma determinista, sendo mais difícil determinar a localização exata das mudanças. Conforme Clark Labs (2006-2007), se não houver grandes mudanças na área, os *hits*, *false alarms* e *misses* tendem a ocorrer geralmente nos mesmos locais. Desta forma, pode-se obter localizações das mudanças razoavelmente bem. Entretanto, sempre que há mais locais elegíveis para mudança do que a atual quantidade de mudança, é difícil atingir uma previsão exata.

No caso do presente trabalho, no primeiro período estudado (1980-2008), a principal tendência em relação às mudanças no Uso e Cobertura da terra foi o aumento das áreas urbanas. Já no segundo período (2008-2015), essa tendência não se manteve, sendo que predominou a regeneração de áreas de cobertura vegetal natural. Concordando com Clark Labs (2006-2007), a primeira dura lição sobre simulação de mudanças de cobertura da terra é que “a história passada nem sempre é um bom indicador para o futuro”.

Esses fatores podem explicar em parte o baixo número de *hits*, e alto número de *misses* e *false alarms* obtidos na validação da simulação para o ano de 2015.

5.7 - Alocação de mudanças - Simulações do Uso e Cobertura da terra para 2035

No período 1980-2008 as principais conversões entre categorias de Uso e Cobertura da terra ocorreram para a categoria área urbana, sendo que a mesma apresentou maior aumento de área. Como um dos objetivos do trabalho é realizar simulações futuras, foi feita uma simulação de Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035 sob o cenário de que a expansão urbana continuará aumentando.

Como no trabalho de Luiz (2014), foi realizada uma simulação do Uso e Cobertura da terra de duas formas: uma *hard prediction* (simulação rígida) que se dá de forma determinista e outra, *soft prediction*, que indica o potencial de vulnerabilidade às mudanças.

A Tabela 8 – apresenta a matriz de transição potencial para as classes de Uso e Cobertura da terra entre os anos de 2008 e 2035.

Tabela 7 - Matriz de transição potencial para as classes de Uso e Cobertura da terra entre os anos de 2008 e 2035.

2008/2035	1.cvn.	2. au	3.agri	4. l/r
1.cvn.	0.9189	0.0677	0.0134	000000
2. au	0.1781	0.7933	0.0283	0.0002
3.agri	0.2305	0.4655	0.3040	000000
4.l/r	0.0258	0.0680	000000	0.9062

5. cvn – cobertura vegetal natural
6. au – área urbana/expansão
7. agri – utilização agrícola
8. l/r – lago/represa

Em 27 anos (2008 a 2035) as categorias com maior probabilidade de persistência são: cobertura vegetal natural (91,89%); lago/represa (90,62%); área urbana (79,33%) e utilização agrícola (30,40%). Assim como no período 1980-2008, a transição mais significativa no período 2008-2035, continua sendo da categoria “utilização agrícola” para “área urbana” (46.55%) e em seguida da categoria “utilização agrícola” para “cobertura vegetal natural” (23,05%). Segundo a simulação, ainda existe a possibilidade de áreas urbanas/expansão se transformarem em áreas com cobertura vegetal natural (17,81%), o que remete à possibilidade de regeneração. As demais transições entre as classes são pouco representativas para esse período, estando todas abaixo de 5% de representatividade.

5.7.1 Mapa de Uso e Cobertura da Terra de 2008 e Simulação 2035 - Cenário 1

Na Figura 27 são apresentados o mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 2008 (São Paulo, 2009) e a simulação de Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035, com o tema “Parques Estaduais e Municipais” como restrição às mudanças.

Figura 27 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra de 2008 (São Paulo, 2009) mapeado a partir de ortofotos digitais) e 2035 - cenário 1 (simulado pelo modelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Gráfico 4- Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 2008 e 2035 – (Cenário 1) simulado pelo LCM: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Comparando-se o Uso e Cobertura da Terra de 2008 com a Simulação para 2035 - Cenário 1, Figura 27 e observando-se o Gráfico 4, temos:

- Diminuição da categoria cobertura vegetal natural, de 13.349,25 ha (60,46%) para 13.260,81 ha (60,06%) ;
- Aumento da categoria área urbana/expansão de 7.270,83 ha (32,93%) para 7.489,23 ha (33,92%);
- Diminuição da categoria utilização agrícola de 1.412,37 ha (6,40%) para apenas 1.286,32 ha (5,83%) e ;
- Diminuição da categoria lago/represa, de 46,53 ha (0,21%) para 42,62 ha (0,19%).

Em relação à localização das principais mudanças, nota-se que, segundo a simulação, a cobertura vegetal natural sofrerá pequena redução. As áreas de utilização agrícola, sofrerão diminuição principalmente na face sul do PEC, nos municípios de São Paulo (próximo ao bairro Cachoeira) no município de Guarulhos (bairro Cabuçu), devido à expansão de áreas urbanas. Ressalta-se que essa simulação considerou o tema “Parques Estaduais e Municipais” (Figura 23) como tema restritivo às mudanças, por esse motivo, essas áreas não sofreram mudanças na simulação.

5.7.2 Simulação 2035 “*Soft Prediction*”

Segundo Clark Labs (2013) “*hard prediction*” é uma projeção para um cenário específico. O resultado é um mapa de cobertura da terra com as mesmas categorias de entrada. Um modelo “*hard prediction*” é baseado em um modelo de alocação da terra competitivo, similar a um processo de decisão multi-objetivo. Por outro lado, a saída “*soft*” é um mapeamento contínuo de vulnerabilidade à mudança para as transições selecionadas. Ela não diz o que irá mudar, mas preferencialmente, o grau de mudança para o qual as áreas têm as condições adequadas para acelerar a mudança. A “*hard prediction*” produz somente uma percepção única, enquanto que a “*soft prediction*” é uma avaliação completa de mudança potencial.

Desta forma, além da simulação “*hard prediction*” foi gerada para a área de estudo, uma simulação “*soft prediction*” para o ano de 2035, que assim como no trabalho de Luiz (2014), mostra a vulnerabilidade à mudança numa escala de 0 a 100%.

Conforme pode ser observado na Figura 28, a simulação *soft prediction* para o ano de 2035, apresenta 6 seis classes de vulnerabilidade à mudança, que vão desde áreas onde “não haverá mudança”, até áreas com “muito alta vulnerabilidade à mudança”.

As áreas onde “não haverá mudança” representam (95,95%), correspondendo à maior parte da área de estudo, abrangendo também as Unidades de Conservação PEC e PEAL.

Observando-se o mapa, nota-se que as áreas com “muito alta e alta vulnerabilidade à mudança”, (1,11%) da área de estudo, localizam-se predominantemente no município de Guarulhos, próximo ao bairro Cabuçu. As áreas com “média vulnerabilidade à mudança” (1,08%) da área de estudo, concentram-se predominantemente no município de São Paulo, próximas ao bairro Cachoeira. As áreas com “baixa e muito baixa vulnerabilidade à mudança”, somam (1,86%) da área de estudo, concentrando-se predominantemente no município de Guarulhos.

As áreas mais vulneráveis à mudança, coincidem com as áreas anteriormente apontadas também na simulação “*hard prediction*” para 2035 sendo em sua maior parte representadas por áreas de utilização agrícola.

Figura 28 - Mapa de vulnerabilidade às mudanças até 2035: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

5.7.3 Mapa de Uso e Cobertura da Terra de 2008 e Simulação 2035 - Cenário 2

Na Figura 29 são apresentados o mapa de Uso e Cobertura da terra do ano de 2008 (São Paulo, 2009) e a simulação de Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035, cenário 2.

Essa simulação foi realizada com o objetivo de saber o que ocorreria com relação às mudanças de uso e cobertura da terra a partir de 2008, se nenhuma variável fosse adicionada à modelagem como “restrição às mudanças” e como “incentivo às mudanças.

Figura 29 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra de 2008 (São Paulo, 2009) mapeado a partir de ortofotos digitais) e 2035 - cenário 2 (simulado pelo modelo LCM): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Gráfico 5 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra dos anos de 2008 e 2035 (Cenário 2) simulado pelo LCM: Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Comparando-se o Uso e Cobertura da Terra de 2008 com a Simulação para 2035 - Cenário 2 , Figura 29 e observando-se o Gráfico 5, temos:

- ✓ A categoria cobertura vegetal natural em 2008 apresentava área de 13.349,25 ha (60,46%) e a cobertura vegetal natural do cenário - 2 prevê que a área diminuiria para 12.445,65 (56,37%);
- ✓ A categoria área urbana/expansão em 2008, apresentava uma área de 7.270,83 ha (32,93%) e no cenário 2, aumentaria para 8.835,03 ha, (40,02%) e
- ✓ A categoria utilização agrícola em 2008, apresentava área de 1.412,37 ha, apenas (6,40%) e no cenário 3 diminuiria para apenas 754,92 ha, (3,42%); e no cenário 3 diminuiria para 43,38 ha (0,21%).

De maneira geral, observa-se que de 2008 para 2035 cenário 2, haveria diminuição da cobertura vegetal natural, em virtude do aumento de área urbana, que inclusive, adentraria na área do PEC (observar manchas circulares dentro da área do PEC); diminuição expressiva das áreas de utilização agrícola, localizadas na face sul do PEC e diminuição da categoria lago/represa.

5.7.4 Simulação 2035 - Cenário 3 e Simulação 2035 - Cenário 4

Com o objetivo de verificar se a implantação do “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” poderia causar mudanças do Uso e Cobertura da terra na área de estudo no futuro, foram realizadas duas simulações do tipo “*hard prediction*” para o ano de 2035. A primeira delas, sem o tema Rodoanel, e a segunda, com esse tema como “incentivo às mudanças”.

Na Figura 30 são apresentados a simulação de Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035, cenário 3 e a simulação de Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035, cenário 4.

Figura 30 - Mapas de Uso e Cobertura da Terra de 2035 (simulado pelo modelo LCM – cenário 3 - sem Rodoanel como incentivo às mudanças) e 2035 (simulado pelo modelo LCM - cenário 4 - com Rodoanel como incentivo às mudanças): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Gráfico 6 - Áreas das categorias de Uso e Cobertura da Terra de 2035 (simulado pelo modelo LCM – cenário 3 - sem Rodoanel como incentivo às mudanças) e 2035 (simulado pelo modelo LCM - cenário 4 - com Rodoanel como incentivo às mudanças): Parque Estadual da Cantareira e entorno de 2 km.

Analisando-se a Figura 30 e o Gráfico 6, temos:

- ✓ A categoria cobertura vegetal natural sem o Rodoanel, apresenta área de 13.279,81 ha (60,15%) e a cobertura vegetal natural com o Rodoanel apresenta área de 13.170,33 ha, (59,65%);
- ✓ A categoria área urbana/expansão sem o Rodoanel possui uma área de 6.775,03 ha (30,69%) e com o rodoanel, 7.066,8 ha, (32,01%);
- ✓ A categoria utilização agrícola sem o Rodoanel possui uma área de 1.979,31 ha, (8,96%) e com o rodoanel, área de 1.797,03 ha, (8,14%) e
- ✓ A categoria lago/represa não apresentou variação nessa comparação.

Essa simulação, considerou transições entre as categorias cobertura vegetal natural, utilização agrícola e áreas urbanas. Segundo a mesma, a implantação do “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” causaria diminuição da cobertura vegetal natural, diminuição de áreas de utilização agrícola, e aumento de área urbana e não haveria mudanças para a categoria lago/represa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de mudanças do Uso e Cobertura da terra na área do PEC e entorno de 2 km, no período 1980-2008, permitiu concluir que as mudanças mais expressivas, ocorreram com a expansão de áreas urbanas sobre as áreas de utilização agrícola (reflorestamentos, cultivos e campo antrópico/pastagem). As transições entre essas duas categorias ocorreram em função do intenso processo de urbanização ocorrido na RMSP. Devido à desvalorização de suas terras e à queda expressiva dos preços dos seus produtos, os antigos proprietários de áreas agrícolas, pressionados pela expansão dos loteamentos urbanos nas antigas zonas rurais, se viram obrigados a vendê-las. Além disso, áreas de campo antrópico/pastagem, são áreas “limpas” praticamente prontas para a implantação de assentamentos urbanos, o que facilitou sua ocupação.

A construção do submodelo de transição a partir da avaliação das mudanças no uso e cobertura entre 1980 e 2008, condicionadas à uma série de variáveis explicativas, possibilitou mapear os padrões de mudança. Com isso, foi possível construir um modelo de previsão do uso e cobertura no tempo futuro, a partir da modelagem de transições potenciais para o período estudado, e posteriormente, a alocação de mudança com a geração de simulações do Uso e Cobertura da terra para o ano de 2035. Foram elaborados 4 cenários de simulação do uso e cobertura da terra com a inserção de variáveis restritivas e incentivadoras às mudanças.

Em comparação com o mapa de uso e cobertura da terra mapeado em 2015, a simulação para o mesmo ano obtida a partir da construção do modelo, cenário 1, indicou redução de áreas de cobertura vegetal natural, aumento expressivo de áreas urbanas, diminuição significativa de áreas de utilização agrícola e diminuição da categoria lago/represa. Em outras palavras, pode-se dizer que essa simulação foi “pessimista” em relação à realidade, pois apontou mudanças em uma direção negativa em relação à conservação da cobertura vegetal natural do entorno, mesmo com a inserção da variável “Parques Estaduais e Municipais” como restrições às mudanças.

Em parte, isso ocorreu porque a simulação “*hard prediction*” se dá forma distribuída e estocástica, sendo difícil determinar a localização exata das mudanças. Além disso, o processo de modelagem funciona bem, desde que sejam mantidas as mesmas

tendências de mudança para uma determinada área. No presente trabalho no primeiro período (1980-2015), a tendência de mudanças predominante foi a expansão de áreas urbanas, enquanto que no segundo período (2008-2015), foi o aumento das áreas de cobertura vegetal natural. Por esse motivo, a validação da simulação não apresentou resultados satisfatórios, apontando pequena quantidade de acertos e grande quantidade de erros e falsos alarmes. Portanto, de acordo com Clark Labs (2006-2007), a primeira dura lição sobre simulação de mudanças de cobertura da terra é que “a história passada nem sempre é um bom indicador para o futuro”. Além disso, a representação de fenômenos tão complexos em ambiente computacional é um grande desafio.

A simulação 2035 - cenário 2, foi gerada com o objetivo de saber quais mudanças ocorreriam no uso e cobertura da terra a partir de 2008, se nenhuma variável fosse adicionada à modelagem como “restrição às mudanças” e como “incentivo às mudanças”. Nesse caso, foi considerado um cenário de tendência de aumento das áreas de expansão urbana, como o ocorrido no período 1980-2008. De maneira geral, observou-se que, de 2008 para 2035 - cenário 2, haveria diminuição da cobertura vegetal natural, em detrimento do aumento de área urbana, que inclusive, adentraria na área do PEC; diminuição expressiva das áreas de utilização agrícola, e diminuição da categoria lago/represa.

A simulação 2035 - cenário 4, foi gerada com o objetivo de verificar se a implantação do “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” poderia causar mudanças do Uso e Cobertura da terra na área de estudo no futuro. Para tanto, essa variável foi incluída no modelo, como “Incentivo às mudanças”. Essa simulação, considerou transições entre áreas de utilização agrícola, áreas urbanas e áreas de cobertura vegetal natural. Conforme os resultados apontados por essa simulação, a implantação do “Rodoanel Mário Covas Trecho Norte” causaria diminuição da cobertura vegetal natural, diminuição de áreas de utilização agrícola, aumento de áreas urbanas e não haveria mudanças para a categoria lago/represa. Observou-se que, para o ano de 2035, a implantação da obra, segundo as variáveis que compõem o modelo e as transições escolhidas entre as classes, não causaria grandes transformações nas mudanças do Uso e Cobertura da terra na área de estudo no futuro. Concordando com Luiz (2014),

“os resultados de simulações devem ser considerados com parcimônia pois as relações físicas, bióticas e socioeconômicas são complexas e dinâmicas”.

Para Christofolletti, A. (1999) os modelos “são uma representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real” ou como apontam Haggett e Chorley (1967, 1975) “são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas [...]” Apesar de suas limitações, os cenários gerados pelas simulações obtidas com a modelagem, possuem uma ampla gama de aplicações.

Desta forma, as simulações previstas por esse trabalho constituem-se em importante instrumento de planejamento para:

- ✓ A gestão de áreas protegidas, na medida em que podem ser estabelecidos programas de manejo (educação ambiental, fiscalização, extensão, dentre outros) para a população do entorno, face às mudanças do uso e cobertura da terra;
- ✓ A revisão do plano de manejo de áreas protegidas e seus respectivos, zoneamentos em especial o da Zona de Amortecimento;
- ✓ As administrações municipais, na elaboração e revisão dos seus planos diretores, por meio do fornecimento de dados e informações úteis para a manutenção ou indicação de seus zoneamentos;
- ✓ A elaboração de estudos de impactos ambientais, na medida em que podem ser usados para avaliar as repercussões das mudanças do uso e cobertura da terra, face às possíveis alternativas de implantação de projetos;
- ✓ A questão da manutenção e preservação de mananciais. Após a “crise hídrica” vivida pela população paulista no ano de 2015, tornou-se conhecida a intrínseca relação existente entre a conservação da cobertura vegetal natural e a manutenção dos recursos hídricos. Nesse sentido, as simulações podem por exemplo, apontar áreas ou regiões que tendem a sofrer supressão da cobertura vegetal natural no futuro. Desta forma, planejadores podem indicar soluções para minimizar ou solucionar esses problemas, como por exemplo, estabelecer zonas de preservação ambiental ou indicar de áreas que necessitem ser restauradas.

A experiência adquirida com a realização do trabalho mostra que trabalhar com modelagem não é tarefa fácil, desde a construção do modelo até a análise e interpretação dos resultados que, conforme a utilização das variáveis escolhidas, resultarão em simulações e cenários diversos. A implementação e processamento do modelo necessita de inúmeros testes, até que se obtenha um padrão de calibragem confiável, que servirá de base para as simulações.

As simulações também não devem ser encaradas como uma profecia, mas como uma tendência, uma vez que existem limitações intrínsecas ao processo que não permitem levar em consideração todas as complexas relações que moldam o uso e cobertura da terra.

Como recomendações para estudos futuros, pretende-se trabalhar com as implicações das mudanças do uso e cobertura da terra sobre a biodiversidade, por meio de ferramentas disponíveis no próprio LCM, mas que ainda não foram utilizadas, tais como: avaliação de *habitats*, mudanças em *habitats*, padrões da paisagem e análise dos processos de mudança, modelagem de distribuição de espécies, adequabilidade de *habitats*, modelagem de distribuição de espécies e análise da biodiversidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, S. **Autômatos Celulares e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Modelagem da Dinâmica Especial da Cana-de-Açúcar na Região de Araçatuba – São Paulo**. 2011. 172f. Tese (Doutorado em Análise Ambiental e Dinâmica Territorial) – Universidade de Campinas. São Paulo.

AUGUSTIJN-BECKERS, E-W.; FLACKE, J. e RETSIOS, B. Simulation informal settlement growth in Dar es Salaam, Tanzania: An agent based housing model. **Computers, Environment and Urban Systems**. v. 35: p. 93–103, 2011. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0198971511000044/1-s2.0-S0198971511000044-main.pdf?_tid=6a64f5b4-6642-11e6-b65e-00000aab0f02&acdnat=1471634792_887bb3b805a8073ecd73aa6236f8a9d1> Acesso em 15 de out. 2014.

ALI, M. J. e VARSHNEY, D. Spatial Modelling of urban growth and urban influence: approach of regional development in developing economy (India). **Journal of Urban and Regional Analysis**, v. IV 2: p. 129-148, 2012. Disponível em: <http://eua.sagepub.com/content/3/2/255.full.pdf+html>>. Acesso em: 15 out. 2014.

BAKR, N. et al. Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal Landsat data. **Applied Geography**. v.30: p. 592-605, 2010. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0143622809000897/1-s2.0-S0143622809000897-main.pdf?_tid=2d4b02b2-6639-11e6-b8f4-00000aab0f27&acdnat=1471630824_97ae11880e88af4fd2a19875a11f1d5c>. Acesso em: 7 de out. 2014.

BENCKE, G. A. et al. **Áreas importantes para a conservação das aves no Brasil: parte 1 - estados do domínio da Mata Atlântica**. São Paulo: SAVE Brasil, 2006.

BERGSTEN A. et al. Protected areas in a landscape dominated by logging. **Biological Conservation**. v. 160, 279–288, 2013. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0006320713000372/1-s2.0-S0006320713000372-main.pdf?_tid=4b15b40e-6652-11e6-9e38-00000aab0f6c&acdnat=1471641611_c1b12abd0dcd8bd2fb4894d658bc3215>. Acesso em: 19 mar. 2013.

BESER de DEUS, L. A. **Espaço e Tempo como Subsídios à Construção de Cenários de Uso e Cobertura da Terra para o Planejamento Ambiental da Amazônia: O caso da Bacia do Rio Acre**. 2013. Tese (Doutorado em Planejamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

BHATTA, B.; SARASWATI, S.; BANDYOPADHYAY, D. Quantifying the degree of freedom degree of sprawl and degree of goodness of urban growth from remote sensing data. **Applied Geography**. v. 30: p.96-111, 2010. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0143622809000484/1-s2.0-S0143622809000484-main.pdf?_tid=7e719f18-6641-11e6-8095-00000aab0f26&acdnat=1471634396_6c34915b0e65013a1ce8da3aea8be88d>. Acesso em: 15 out. 2014.

BRASIL 2000. **Lei Federal Nº 9.985 de 18/07/2000**. Regulamenta o artigo 225 da Constituição Federal e institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação e da outras providências.

BROWN, D. G. et al. Rural land-use trends in the conterminous United States, 1950-2000. **Ecological Applications**. v. 15(6): p. 1851-1863, 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/03-5220/epdf>> Acesso em: 7 out. 2014.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Modelagem de dados em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Org.) **Sistemas de Informações Geográficas – Aplicações na Agricultura**. Embrapa, 2ª Ed., 1998, 434 p.

CARVALHO, M. R. R. de. **Nos caminhos da Serra: Arqueologia, História, Patrimônio e Memória. A ocupação humana na serra da Cantareira entre os séculos XVII e XX**. 2012. 355 f. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia. Universidade de São Paulo. São Paulo.

CENTRO BRASILEIRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO – CEBRAP, SERVIÇO SOCIAL DO COMÉRCIO – SESC E SECRETARIA MUNICIPAL DE ASSISTÊNCIA SOCIAL DA POPULAÇÃO DA CIDADE DE SÃO PAULO - SAS – PMSP. **Mapa da Vulnerabilidade Social da População da Cidade de São Paulo**, 2004. Disponível em: <<http://www.fflch.usp.br/centrodametropole/584>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

CENTRO DE ESTUDOS DA METRÓPOLE- CEM. **Lançamentos Imobiliários Residenciais - Período 1985-2013**. Arquivos vetoriais em formato shape, 2013. Disponível em: <<http://www.fflch.usp.br/centrodametropole/716>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.

CLARK LABS. **Land Change Modeler for ArcGIS Software Extension (2.0)**. Worcester, 2013. Disponível em: <<https://clarklabs.org/land-change-modeler-for-arcgis/>>. Acesso em: set. 2013.

CLARK LABS. **Land Change Modeler Tutorial - A series of exercises to provide a structure approach to learning the Land Change Modeler**. Clark University, Worcester, MA, USA., 2006-2007.

DE FRIES, R. et al. Land use change around protected areas management to balance human needs and ecological function, **Ecological Applications**, v. 17(4): p. 1031–1038, 2007. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/05-1111/epdf>>. Acesso em: 16 abr. 2013.

DELANEZE, M. **Modelagem Dinâmica Espacial Aplicada na Avaliação nas Mudanças da Cobertura da Terra no Entorno de Dutos utilizando Autômatos Celulares – Estudo de Caso Duto Orbel**. 2011. 116f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Rio Claro. Rio Claro.

EMPLASA - Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano. **Ortofotos digitais do Projeto de Atualização Cartográfica do Estado de São Paulo – Mapeia São Paulo.** Resolução 1m, 2010/2011.

ERASO, N.R.; ARMENTERAS-PASCUALB, D.; ALUMBREROSA, J. R. Land use and land cover change in the Colombian Andes dynamics and future scenarios. **Journal of Land Use Science.** v. 8: p. 154–174, 2013. Disponível em: <http://www.ciencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_26/Rodriguezet%20al%20LUCC_2011.pdf> Acesso em: 29 ago. 2014.

FABBRI, A. G. e CHUNG, C. F. Predictive spatial data analysis in the Geosciences. In: UNWIN, D. et al. **Spatial Analytical Perspectives on GIS**, Taylor & Francis, London, 1996, 256 p.

FALCIDIENO, B.; PIENOVI, C.; SPAGNUOLO, M. Descriptive modelling and declarative modelling for spatial data. In: **Spatial Analytical Perspectives on GIS**, Talyor & Francis, London, 1996, 256 p.

FISCHER, M. M. Geographic information systems, spatial data analysis and spatial modeling: an introduction. In: **Spatial Analytical Perspectives on GIS**, Talyor & Francis, London, 1996, 256 p.

FUNDAÇÃO SEADE (2016) **Projeções Populacionais. Projeção da população da RMSP para o ano de 2020 e 2030.** Disponível em: <<http://produtos.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php>> Acesso em: 10 mai. 2016.

FURLAN, M. C. **Modelagem Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra da Bacia do Arroio Grande – RS** 2012. 129f. Dissertação em Tecnologia da Geoinformação). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

GASPARETO, T. C. ; SILVA, D. A. da.; PAVÃO, M. **A pressão urbana sobre os parques estaduais da Cantareira e Alberto Löfgren situados na Região Metropolitana de São Paulo.** IF Sér. Reg. V. 36: p. 73-80, 2008.

GASPARETO, T. C. ; **Pressão Urbana e Conectividade da Paisagem no Entorno dos Parques Estaduais Itapetinga, Itaberaba, Cantareira, Juquery e Jaraguá na Região Metropolitana de São Paulo.** 2014. 179f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física). Universidade de São Paulo. São Paulo.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Modelos, paradigmas e a Nova Geografia. In: CHORLEY, R. J. & HAGGETT, P., (Eds). **Modelos Físicos de Informação em Geografia.** Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1-19, 1975. (1967, 1975).

HANSEN, A.J. et al. Global change in forests: Responses of species, communities, and biomes. **BioScience**, v.51: p. 765-779, 2001. Disponível em: <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/51/9/765.full.pdf+html>>. Acesso em 19 mar. 2013.

HERLING, T. B. R. **A floresta em São Paulo, a cidade na Cantareira: fronteiras em transformação**. 2002. 222 p. Tese. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

HULL, V. et al. Evaluation the efficacy of zoning designations for protected area management. **Biological Conservation**. v.144: p. 3028–3037. 2011 Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0006320711003521/1-s2.0-S0006320711003521-main.pdf?_tid=156e4f90-6653-11e6-b6fb-00000aabb0f27&acdnat=1471641951_c9e4bd0b61a947fbbdffc0eb6405df45>. Acesso em: 19 mar. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Setores censitários 2010**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios_divisoes_intramunicipais/censo_2010/>. Acesso em: 30 abr. 2013.

JONES, D. A. et al. Monitoring land use and cover around parks a conceptual approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 113: p. 1346–1356, 2009. Disponível em: <http://users.clas.ufl.edu/mbinford/pub/RemSensEnv_spec_issue_Monitoring_protected_areas/Jones_et_al_2009.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2013.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**, São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424 p.

LEH, M.; BAJWA, S.; CHAUBEY, I. Impact of land use change on erosion risk an integrated remote sensing geographic information system and modelling methodology. **Land Degradation & Development**. v. 24: p. 409-421, 2013. Disponível em: <<http://onlinelibrary-wiley-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/ldr.1137/epdf>> Acesso em: 7 out. 2014.

LUIZ, C.H.P. **Modelagem da Cobertura da Terra e Análise da Influência do Reflorestamento na Transformação da Paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço**. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais.

MAANTAY, J.; ZIEGLER, J. **GIS for the Urban Environment**. ESRI Press, Redlands, California, 2006, 596 p.

MALLINIS, G. et al. Mapping and interpretation historical land cover/land use changes in a Natura 2000 site using earth observational data: The case of Nestos delta, Greece. **Applied Geography**. v. 31: p. 312-320, 2011. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0143622810000767/1-s2.0-S0143622810000767-main.pdf?_tid=dd898a28-665b-11e6-a02a-00000aabb0f02&acdnat=1471645722_a798d58a087ef7cf4f770b33d83b5bef>. Acesso em: 07 out. 2014.

MARQUES, E. **A Metrópole de São Paulo no Século XXI: Espaços e heterogeneidades e desigualdes**. São Paulo, Editora Unesp. 2015.

MAZZOTTI, F. J.; MORGENSTERN, C. S. A scientific framework for managing urban natural áreas. **Landscape and Urban Planning**. v. 38: p. 171-181,1997. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0169204697000327/1-s2.0-S0169204697000327-main.pdf?_tid=c2799316-6653-11e6-94ad-00000aab0f26&acdnat=1471642241_aea759d4551eb1b85708b35d6f05f6f5. Acesso em: 04 nov. 2014.

MCDONALD R. I. et al. Urban effects, distance and protected areas in a urbanizing world. **Landscape and Urban Planning**. v. 93: p. 63–75, 2009. Disponível em: <http://data2.xjlas.ac.cn:81/UploadFiles/sdz/cnki/%E5%A4%96%E6%96%87/ELSEVIER/environmental%20risk%20assessment/208.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2013.

MEYER, W. B. e TURNER , B. L. **Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective**. Cambridge University Press,1994.

MOGHADAM. H. S.; HELBICH, M. Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: a Markov chains-cellular automata urban growth model. **Applied Geography**, v. 40: p. 140-149, 2013. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0143622813000362/1-s2.0-S0143622813000362-main.pdf?_tid=12053108-665c-11e6-8948-00000aacb360&acdnat=1471645810_042cfda0a531ce0aecc23a009d7683bd. Acesso em: 31 ago. 2014.

MOHAMMADI, J.; ZARABI, A.; MOBARAKI, O. Urban Sprawl pattern and effective factors on them: the case of Urmia City, Iran. **Journal of Urban and Regional Analysis**. v. IV 1: p. 77-89, 2012. Disponível em: <http://epb.sagepub.com/content/43/3/580.full.pdf+html>. Acesso em: 16 jan. 2013.

MUNSI, M.; AREENDRAN, G.; Joshi, P. K. Modeling. Spatio-temporal change patterns of forest cover: a case study from the Himalayan foothills India. **Reg Environ Change**. v. 12: p. 619–632, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10113-011-0272-3> Acesso em: 31 ago. 2014.

PATTERSON M.W. ; HOALST-PULLEN, N. ; Dynamic equifinality the case of south central Chile s evolving forest landscape. **Applied Geography** . v. 31: p. 641-649, 2011. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0143622810001736/1-s2.0-S0143622810001736-main.pdf?_tid=a2a293a6-663c-11e6-8e33-00000aab0f01&acdnat=1471632309_b18e5a8a7a5ff488ae3865ef4ca1fb63 Acesso em: 6 out. 2014.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO - PMSP. **Mapa 5 - Rede Hídrica e Áreas Verdes** (Arquivos vetoriais em formato shape), 2014. Disponível em: <http://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/marco-regulatorio/plano-diretor/arquivos/>. Acesso em: 01 mar. 2016.

PUERTAS, O. L. et al. Assessing spatial dynamics of urban growth using an integrated land use model. Application in Santiago Metropolitan Area, 2010-2045. **Land Use Policy**. v. 38: p. 415-425, 2014. Disponível em:

<http://ac.els-cdn.com/S0264837713002603/1-s2.0-S0264837713002603-main.pdf?_tid=46fa353e-665c-11e6-83c1-00000aacb35d&acdnat=1471645899_9e5c5cdc65ac34b9a172f5203e103a7f>.

Acesso em: 06 out. 2014.

RODRIGUEZ-GALIANO. V.; CHICA-OLMO, M. Land cover change analysis of a Mediterranean area in Spain using different sources of data: Multi-seasonal Landsat images, land surface temperature, digital terrain models and texture. **Applied Geography**. v. 35: p. 208-218, 2012. Disponível em:

<http://ac.els-cdn.com/S0143622812000707/1-s2.0-S0143622812000707-main.pdf?_tid=ae5710c6-665c-11e6-90d7-00000aacb362&acdnat=1471646073_0042e29826fb59c54cb9aaea7ec21109>.

Acesso em: 31 ago. 2014.

ROSSETTI, L. A. F. G. **Modelagem Dinâmica Espacial de Mudanças no Uso do Solo Urbano: Contribuição Metodológica**. 2011. 132f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Rio Claro.

SANDERS, L. Dynamic modeling of urban systems. In: **Spatial Analytical Perspectives on GIS**, Taylor & Francis, London, 1996, 256 p.

SANTOS, M. **A Urbanização Brasileira**. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 176 p.

SÃO PAULO, Governo do Estado. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Instituto Florestal e Fundação Florestal. **Plano de Manejo do Parque Estadual da Cantareira**, 2009. Disponível em:

<<http://fflorestal.sp.gov.br/files/2012/01/PECantareira/Plano%20de%20Manejo/Plano%20de%20Manejo%20Completo.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2013.

SÃO PAULO (Governo do Estado). **Estudos Ambientais. Rodoanel Mário Covas Trecho Norte**, 2010.

SCHULZ, J. J. et al. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). **Applied Geography**. v. 30: 436-447, 2010. Disponível em:

<http://ac.els-cdn.com/S0143622809000885/1-s2.0-S0143622809000885-main.pdf?_tid=2f2b94ca-663e-11e6-8e34-00000aab0f01&acdnat=1471632974_49cca8ee44a00173c8b9b604e7a8f693>

Acesso em: 06 out. 2014.

SILVA, D. A. da. **Zoneamento Ambiental de um Setor do Parque Estadual da Cantareira e entorno seccionado pela Rodovia Fernão Dias (BR 381)**. 2005. 254 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo.

_____. **Evolução do Uso e Ocupação da Terra no entorno dos Parques Estaduais da Cantareira e Alberto Löfgren e impactos ambientais decorrentes**

do crescimento metropolitano. 2000. 186 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo, Vols 1 e 2.

SILVA, L. S. e **Proteção Ambiental e Expansão Urbana: A ocupação ao sul do Parque Estadual da Cantareira.** 2004. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental. Universidade de São Paulo. São Paulo.

SMITH, C. STEPHEN. A Representational Framework for Geographic Modeling. In: **Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems.** Oxford University Press, New York, 1998, 276 p.

TEIXEIRA, A. L. de A. e CHRISTOFOLETTI, A. **Sistemas de Informação Geográfica (Dicionário Ilustrado),** Editora Hucitec, São Paulo, 1997.

TERZI, F.; BÖLEN, F. The potencial effects of spatial strategies on urban sprawl in Istanbul. **Urban Studies.** v. 49(6): p. 1229-1250, 2012. Disponível em: <http://usj.sagepub.com/content/49/6/1229.full.pdf>> Acesso em: 15 out. 2014.

THAPA, R. B.; MURAYAMA, Y. Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal. Computers, **Environment and Urban Systems.** v. 35: p. 25-34, 2011. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S0198971510000785/1-s2.0-S0198971510000785-main.pdf?_tid=9d97bca4-6643-11e6-a5ee-00000aab0f02&acdnat=1471635307_e71ad0235d797803368f379cccd2794b> Acesso em: 14 out. 2014.

THEOBALD, D. M.; CROOKS, R. K.; NORMAN, J. B. Assessing effects of land use on landscape connectivity loss and fragmentation of western U S forests. **Ecological Applications.** v. 21(7): p. 2445-2458, 2011. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/10-1701.1/pdf>> Acesso em: 06 out. 2014.

TIAN, G.; JIANG, J.; YANG, Z. , ZHANG, Y. ok-Tian, G. et al - 2011 - The urban growth size distribution and spatio-temporal dynamic pattern of the Yangtze River Delta megalopolitan region, China. **Ecological Modelling.** v. 222: p. 865-878, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223284367_The_urban_growth_size_distribution_and_spatio-temporal_dynamic_pattern_of_the_Yangtze_River_Delta_megalopolitan_region_China>. Acesso em: 06 out. 2014.

TOWNSEND, P. A. et al. Spatial pattern analysis for monitoring protected areas. **Remote Sensing of Environment,** v.113: p.1410–1420, 2009. Disponível em: http://users.clas.ufl.edu/mbinford/pub/RemSensEnv_spec_issue_Monitoring_protected_areas/Townsend_et_al_2009.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2013.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME - (UN-HABITAT). **Urbanization and Development Emerging Futures. World Cities Report 2016.** United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Nairobi, Kenya, 2016.

Disponível em: <<http://wcr.unhabitat.org/wp-content/uploads/sites/16/2016/05/WCR-%20Full-Report-2016.pdf>>pdf Acesso em: 02 jun. 2016.

VÁCLAVIK, T.; ROGAN, J. Identifying Trends in Land Use Land Cover Changes in the Context of Post Socialist. **GIScience & Remote Sensing**. v. 46, N. 1: p. 54-76, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237207780_Identifying_Trends_in_Land_UseLand_Cover_Changes_in_the_Context_of_Post-Socialist_Transformation_in_Central_Europe_A_Case_Study_of_the_Greater_Olomouc_Region_Czech_Republic>. Acesso em: 29 de ago. 2014.

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&acdnat=1471642808_d4e0fe54158ff69e4dbc01fbcbb26cb9>. Acesso em: 02 abr. 2013.

VIEIRA, M. G. **Relações de Trabalho no Cinturão Verde da Cidade de São Paulo – Área de Cachoeira – na pré-serra da Cantareira**. São Paulo, FFLCH-USP (Dissertação de Mestrado), 1988.

WARING, H. R., & RUNNING, S. W. **Forest ecosystems. Analysis at multiples scales**. (2nd ed.) (p. 55). San Diego: Academic Press, 1998.

WILSON, C. O., e WENG, Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois, **Science of the Total Environment** 409, 4387–4405, 2011 Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0048969711007170/1-s2.0-S0048969711007170-main.pdf?_tid=b659cdd0-664e-11e6-aff7-00000aab0f6b&acdnat=1471640073_12d0d48f336f8ce1ae6c8e83e8f44ed0>. Acesso em: 29 ago. 2014.

XIN, Y.; XIN-QI, Z.; LI-NA, L. A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization Markov chain and cellular automata. **Ecological Modelling**. v. 233: p. 11-19, 2012. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0304380012001184/1-s2.0-S0304380012001184-main.pdf?_tid=bbf82f9e-6648-11e6-8c26-00000aab0f6b&acdnat=1471637505_ea9478d08c10f4f32b360cb1b315e13a> Acesso em: 14 out. 2014.