RENATA SAYURI KAWASHIMA

**Modelagem da dinâmica espacial das mudanças na cobertura
da terra na região portuária da Baixada Santista**

São Paulo

2015

RENATA SAYURI KAWASHIMA

**Modelagem da dinâmica espacial das mudanças na cobertura
da terra na região portuária da Baixada Santista**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

São Paulo

2015

RENATA SAYURI KAWASHIMA

**Modelagem da dinâmica espacial das mudanças na cobertura
da terra na região portuária da Baixada Santista**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes – Informações
Espaciais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mariana Abrantes
Giannotti

São Paulo

2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de janeiro de 2015.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Kawashima, Renata Sayuri

Modelagem da dinâmica espacial das mudanças na cobertura da terra na região portuária da Baixada Santista / R.S. Kawashima. -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

190 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

**1.Autônomos celulares 2.Portos - Baixada Santista (SP)
3.Sensoriamento remoto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.**

À minha família, meu companheiro e meus amigos.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Dr.^a Mariana Abrantes Giannotti, pela orientação, confiança e pelos conhecimentos transmitidos durante todo o trabalho.

Ao Prof.^o Dr. José Alberto Quintanilha, pela orientação inicial, estímulo à pesquisa e desenvolvimento acadêmico.

Aos amigos do Laboratório de Geoprocessamento (Labgeo) do Departamento de Engenharia de Transportes, Janaína Bezerra da Silva, Eliane Hirata, Luís Augusto Manfré, Jun Shinohara, Daniele Barros e Osvaldo Coutinho, pelo apoio e troca de conhecimentos. À Juliana Kolling e Thiago, pela ajuda no trabalho de campo pela Baixada Santista e pelas orientações dadas pelo Chacal. À Juliana Tristão, da Procam, pela oportunidade de acompanhar o reconhecimento do estuário em seu trabalho de campo. Às pesquisadoras Silvia Sartor e Claudia Lamparelli (CETESB), pelas contribuições sobre o estudo dos manguezais da Baixada Santista. Ao Rodolfo Montanha, Engenharia Naval, pelo auxílio nos dados históricos dos portos.

Ao Marco Nalon, do Instituto Florestal, à Prof.^a Dr.^a Paulina Setti Riedel, do Instituto de Geociências da Unesp e ao Prof.^o Dr. Luis Americo Conti, EACH-USP, pelas imagens de satélite fornecidas. À Dr.^a Ana Lucia Gomes dos Santos, pelas fotografias aéreas fornecidas.

Ao Prof.^o Dr. Claudio Barbieri pelas contribuições fornecidas no processo de qualificação. À pesquisadora e Prof.^a Dr.^a Cláudia Maria de Almeida, pelas contribuições e auxílio no programa de modelagem ambiental.

Aos amigos da CPLA/DIA, à diretora do DIA, Arlete Ohata, pelo apoio à pesquisa e estudo sobre o mapeamento dos manguezais do Estado de São Paulo, Aline Salim, Juliana Amorim, Ana Maria Neves, Cynthia Yassumoto, Kenzo Matsuzake, Igor Redivo, Edgard Kiriya, Aline Bernardes, Tatiana Camolez e Priscila Capuano, pela companhia durante toda essa jornada. Ao M.Sc. Marco Antônio, pelo auxílio no estudo dos portos brasileiros.

À Dr.^a Nádia Gilma, pelo estímulo à pesquisa, revisão e apoio durante todo o trabalho. À Simone Yukie e Polyanna Bispo, pela revisão e considerações no texto. Ao meu companheiro Claudinei, pelo apoio em todas as etapas desta pesquisa, auxílio no trabalho de campo, paciência e compreensão em todos os momentos.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

Quando se está na órbita da Terra, ao olhar para baixo, veem-se lagos, rios, penínsulas.... Voa-se rapidamente sobre mudanças na topografia, como montanhas cobertas de neve, desertos, ou cinturões tropicais, tudo muito visível. Passa-se por um nascer e um pôr do sol a cada 90 minutos. Ao sair da órbita terrestre, ... enxerga-se de um polo ao outro e de um oceano a outro sem sequer virar a cabeça. ... Literalmente vê-se a América do Norte e a América do Sul dobrando a esquina, enquanto a Terra gira em torno de um eixo invisível, e então, milagrosamente, vê-se a Austrália, depois a Ásia e, a seguir, as Américas vêm substituí-las... Começa-se a perceber como é pequena a nossa compreensão do tempo. ... Perguntamos a nós mesmos: onde estou, no espaço e no tempo? Vemos o sol se pôr na América e tornar a nascer na Austrália. Olhamos “para casa” ... e não vemos as barreiras de cor, religião e política que dividem este mundo”.

(Eugene Andrew Cernan)

RESUMO

Os padrões espaciais das alterações da cobertura da terra podem ser analisados a partir de modelagens da sua dinâmica espacial. Essas modelagens são capazes de descrever possíveis fatores responsáveis pelas mudanças territoriais, bem como viabilizar a estimativa de impactos futuros sobre o ambiente simulado. Considerando as pressões do setor de infraestrutura portuária sobre as configurações da forma de uso e planejamento do espaço na região portuária da Baixada Santista, tais como o aporte por áreas de retroporto, o armazenamento e o transporte de cargas, este estudo buscou desenvolver modelos dinâmicos da paisagem e investigar a relação entre as alterações na cobertura da terra e a infraestrutura de transportes na região portuária da Baixada Santista. A partir de produtos de sensoriamento remoto e da metodologia de modelagem dinâmica espacial baseada em autômatos celulares, foram gerados mapas simulados e cenários de prognósticos, com e sem projetos de expansão portuária para o ano de 2024. Os mapas simulados do ano de 1995 e 2005 foram semelhantes aos mapeamentos temáticos de cobertura da terra reais e apresentaram boa avaliação. Importante ressaltar que, apenas o mapa simulado de 2013 não previu as novas instalações portuárias, mesmo com a simulação rodando com a variável de novos empreendimentos operacionais em curto intervalo de tempo. O modelo estacionário em 2024 mostrou a expansão de áreas construídas em substituição, sobretudo, às áreas de campo. Não houve expansão de novas manchas de áreas construídas e isso condiz com a tendência de expansão de áreas urbanas seguindo as áreas já consolidadas e com infraestrutura implantada. Com relação à geração de modelos com os projetos de expansão portuária, tem-se a implantação de diversos empreendimentos ocupando parte da margem esquerda do estuário e áreas de retroporto próximas do arco viário da Baixada Santista.

Palavras-chave: Cobertura da terra. Modelagem dinâmica espacial. Autômatos celulares. Infraestrutura de transportes. Região portuária da Baixada Santista.

ABSTRACT

Spatial patterns of change in land cover can be analyzed with spatial dynamic models. This modeling can indicate the driving factors of territorial changes as well as assess future impacts over the simulated environment. Considering the pressures of the port infrastructure sector over the land use and physical planning in the region of Baixada Santista, such as the demand for backport areas as well as for loads storage and transport, this study aims to develop dynamic models of the landscape and investigate the relationship between land cover change and the transport infrastructure in the port area of Santos. With the aid of remote sensing products and cellular automata based models, simulated maps of past landscapes and maps of future landscape scenarios were generated, both considering and disregarding port expansion projects for the year 2024. The simulated landscape maps of 1995 and 2005 were similar to the real ones, and hence, presented high fitness indices. It is important to mention that only the simulated map of 2013, could not foresee the new port facilities, even when the runs took into account the variables associated with the new operational ventures in a short period of time. The stationary model showed an expansion of built-up areas, mainly replacing former field areas. There was no occurrence of new patches of built-up areas and this trend is consistent with the expansion of urban areas nearby the already consolidated and established areas disposing of infrastructure facilities. Regarding the generation of future simulated scenarios taking into account the port expansion projects, they could well reproduce the implementation of several projects along part of the left bank of the estuary and nearby areas of the road ring of Baixada Santista.

Keywords: Land cover. Spatial dynamic modeling. Cellular automata. Transport infrastructure. Port region of Baixada Santista.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Algoritmos de classificação supervisionada: a) valores de <i>pixels</i> distribuídos em seis classes, b) mínima distância, c) paralelepípedo e d) máxima verossimilhança.	32
Figura 2 - Esquema ilustrativo do método de Hagen com decaimento exponencial.	47
Figura 3 - Representações das células vizinhas (cinza) para duas dimensões.	50
Figura 4 - Aplicação de um autômato celular na geração de células urbanas.	51
Figura 5 - Desenvolvimento urbano simulado com a incorporação de uma regra de transição considerando a altitude.	52
Figura 6 - Simulação do desenvolvimento urbano em função do sistema viário.	53
Figura 7 - Generalizações comuns dos autômatos celulares (CA).....	54
Figura 8 - Esquema descritivo do funcionamento do <i>software</i> Dinamica EGO.	56
Figura 9 - Localização da área de estudo na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS).....	58
Figura 10 - Caracterização geral da região de estudo, localizada na Região Metropolitana da Baixada Santista, SP.	59
Figura 11 - Linha cronológica da legislação ambiental de portos e histórico do Porto de Santos.	61
Figura 12 - Plano de 1897, ampliação das instalações portuárias na região de Outeirinhos.	62
Figura 13 - Plano de 1929, início da construção do primeiro terminal de grânéis líquidos na Ilha Barnabé.....	62
Figura 14 - Plano de 1951, expansão das instalações portuárias em direção ao Saboó.	64
Figura 15 - Em 1968, início da construção do cais do Macuco na Ponta da Praia....	64
Figura 16 - Plano de 1976, implantação do terminal de contêineres em Conceiçãozinha.	65
Figura 17 - Fluxograma metodológico.....	71
Figura 18 - Cenas do satélite LANDSAT disponíveis para o litoral do estado de São Paulo.	73
Figura 19 - Fluxograma dos processos de classificação de imagem.	75
Figura 20 - Comparação entre o resultado da classificação da imagem de 1995, em a) ISODATA e b) MaxVer.	76
Figura 21 - Exemplo de edição manual. a) Resultado da classificação, e b) Resultado da classificação com edição manual.	78
Figura 22 - Cubo de variáveis utilizadas para o período entre 1985 e 1995.	81
Figura 23 - Cubo de variáveis utilizadas para o período entre 1995 e 2005.	82
Figura 24 - Cubo de variáveis utilizadas para o período entre 2005 e 2013.	84
Figura 25 - Esquema metodológico da construção da modelagem da dinâmica espacial.	86
Figura 26 - Parâmetros definidos no Dinamica EGO.	88

Figura 27 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 1985 para a região da Baixada Santista, SP.	93
Figura 28 - Resultado da classificação não-supervisionada ISODATA realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.	94
Figura 29 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.	96
Figura 30 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 2005 para a região da Baixada Santista, SP.	98
Figura 31 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 2013 para a região da Baixada Santista, SP.	99
Figura 32 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 1985.	100
Figura 33 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 1995.	101
Figura 34 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 2005.	102
Figura 35 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 2013.	102
Figura 36 - Detalhes da região de Praia Grande para visualização das áreas de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2013.	103
Figura 37 - Detalhes da região de Santos e Cubatão para visualização das áreas de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2013.	104
Figura 38-Detalhes da região de Santos e Guarujá para visualização das áreas de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2013.	105
Figura 39 - Transições entre classes em área e percentuais no período entre 1985 e 1995.	109
Figura 40 - Transições entre classes em área e percentuais no período entre 1995 e 2005.	111
Figura 41 - Transições entre classes em área e percentuais no período entre 2005 e 2013.	113
Figura 42 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Floresta para Urbano.	115
Figura 43 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à hidrografia na transição da classe Floresta para Urbano.	115
Figura 44 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Floresta para Urbano.	116
Figura 45 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Floresta para Urbano.	116
Figura 46 - Valores dos pesos de evidência em função da variável categórica das Unidades de Conservação na transição da classe Floresta para Urbano.	117
Figura 47 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Urbano no período entre 1985 e 1995.	118
Figura 48 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Urbano no período entre 1995 e 2005.	118
Figura 49 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Urbano no período entre 2005 e 2013.	119

Figura 50 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às rodovias na transição da classe Manguezal para Urbano.	120
Figura 51 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Manguezal para Urbano.	120
Figura 52 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Manguezal para Urbano.....	121
Figura 53 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Manguezal para Urbano.....	121
Figura 54 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Urbano no período entre 1985 e 1995.	122
Figura 55 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Urbano no período entre 1995 e 2005.	122
Figura 56 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Urbano no período entre 2005 e 2013.	123
Figura 57 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Campo para Urbano	123
Figura 58 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Campo para Urbano.	124
Figura 59-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Floresta na transição da classe Campo para Urbano.	124
Figura 60 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Urbano no período entre 1985 e 1995.....	125
Figura 61 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Urbano no período entre 1995 e 2005.....	125
Figura 62 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Urbano no período entre 2005 e 2013.....	126
Figura 63 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Solo para Urbano.....	127
Figura 64 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Solo para Urbano.....	127
Figura 65 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Manguezal na transição da classe Solo para Urbano.	128
Figura 66 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Solo para Urbano no período entre 1985 e 1995.	128
Figura 67 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Solo para Urbano no período entre 1995 e 2005.	129
Figura 68 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Solo para Urbano no período entre 2005 e 2013.	129
Figura 69 - Valores de pesos de evidência em função das variáveis explicativas da transição Água para Urbano.....	130
Figura 70 - Mapa de probabilidade referente à transição Água para Urbano no período entre 2005 e 2013.	132
Figura 71 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Floresta para Campo.	132

Figura 72 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à hidrografia na transição da classe Floresta para Campo.	133
Figura 73 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Floresta para Campo.	133
Figura 74 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Floresta para Campo.	134
Figura 75 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Campo no período entre 1985 e 1995.	135
Figura 76 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Campo no período entre 1995 e 2005.	135
Figura 77 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Campo no período entre 2005 e 2013.	136
Figura 78 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Manguezal para Campo.	137
Figura 79 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Manguezal para Campo.	137
Figura 80 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Manguezal para Campo.	138
Figura 81 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Campo no período entre 1985 e 1995.	138
Figura 82 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Campo no período entre 1995 e 2005.	139
Figura 83 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Campo no período entre 2005 e 2013.	139
Figura 84 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Floresta para Solo.	140
Figura 85 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Floresta para Solo.	141
Figura 86 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Floresta para Solo.	141
Figura 87 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Solo no período entre 1985 e 1995.	142
Figura 88 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Solo no período entre 1995 e 2005.	142
Figura 89 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Solo no período entre 2005 e 2013.	143
Figura 90 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Manguezal para Solo.	144
Figura 91 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Manguezal para Solo.	144
Figura 92 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Solo no período entre 1985 e 1995.	145
Figura 93 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Solo no período entre 1995 e 2005.	145

Figura 94 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Solo no período entre 2005 e 2013.....	146
Figura 95 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Campo para Solo.	147
Figura 96 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Floresta na transição da classe Campo para Solo.	147
Figura 97 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Solo no período entre 1985 e 1995.	148
Figura 98 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Solo no período entre 1995 e 2005.	148
Figura 99 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Solo no período entre 2005 e 2013.	149
Figura 100 - Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 1995 (a), mapa simulado para o ano de 1995 (b).	152
Figura 101 - Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2005 (a), mapa simulado para o ano de 2005 (b).	153
Figura 102 - Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2013 (a), mapa simulado para o ano de 2013(b).	154
Figura 103 - Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2013 (a), e resultado do modelo estacionário simulado para o ano de 2024(b).	157
Figura 104 - Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2013 (a), e resultado do modelo simulado considerando novos empreendimentos projetados para o ano de 2024(b).	160
Figura 105 - Valores dos pesos de evidência considerando os empreendimentos operacionais.	181
Figura 106 - Valores dos pesos de evidência gerados considerando a distância aos empreendimentos operacionais.....	183
Figura 107 - Valores de pesos de evidência referente ao ZEE terrestre.	184
Figura 108 - Valores dos pesos de evidência gerados para os novos empreendimentos projetados.	188
Figura 109 - Valores dos pesos de evidência gerados em relação à distância aos novos empreendimentos projetados.....	190

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1 - Principais características do sensor TM.....	28
Tabela 2 - Principais características do sensor OLI.	29
Tabela 3 - Exemplo da matriz de erros.	35
Tabela 4 - Sistema de classificação CORINE.	39
Tabela 5 - Base de dados originais utilizados na pesquisa.....	69
Tabela 6 - Imagens auxiliares utilizadas na pesquisa.	69
Tabela 7- Mapeamentos realizados na área de estudo.	70
Tabela 8 - Matriz de erros (em <i>pixel</i>) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 1985 para a região da Baixada Santista, SP.....	92
Tabela 9 - Matriz de erros (em <i>pixel</i>) da classificação não-supervisionada ISODATA realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.....	93
Tabela 10 - Matriz de erros (em <i>pixel</i>) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.....	95
Tabela 11 - Matriz de erros (em <i>pixel</i>) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 2005 para a região da Baixada Santista, SP.....	97
Tabela 12 - Matriz de erros (em <i>pixel</i>) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 2013 para a região da Baixada Santista, SP.....	98
Tabela 13 - Quantificação das classes em área (ha), e a diferença entre os períodos, em percentuais.	106
Tabela 14 - Matriz de transição dada em área (ha) no período entre 1985 e 1995.	108
Tabela 15 - Matriz de transição de passo único (em percentuais) no período entre 1985 e 1995.	108
Tabela 16- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 1985 e 1995.	109
Tabela 17- Matriz de transição dada em área (ha) no período entre 1995 e 2005... ..	110
Tabela 18- Matriz de transição de passo único (em percentuais) no período entre 1995 e 2005.	110
Tabela 19- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 1995 e 2005.	111
Tabela 20- Matriz de transição dada em área (ha) no período entre 2005 e 2013.. ..	112
Tabela 21- Matriz de transição de passo único (em percentuais) no período entre 2005 e 2013.	112
Tabela 22- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 2005 e 2013.	112
Tabela 23- Avaliação do resultado do modelo de simulação para o ano de 1995. ...	150
Tabela 24- Avaliação do resultado do modelo de simulação para o ano de 2005. ...	150

Tabela 25-Avaliação do resultado do modelo de simulação para o ano de 2013. ..	150
Tabela 26-Quantificação das classes em área (ha), e a diferença entre os períodos (em percentuais).....	156
Tabela 27 - Quantificação anual da classe Urbano (área construída) em hectares (ha) para o modelo estacionário.....	158
Tabela 28- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 2013 e 2024.	159
Tabela 29-Quantificação das classes em área (ha), e a diferença entre os períodos em percentuais.	159
Tabela 30-Quantificação anual da classe Urbano (área construída), em hectares (ha), para o modelo simulado considerando novos empreendimentos projetados.....	161
Tabela 31- Período entre 1985 e 1995, e entre 1995 e 2005.....	175
Tabela 32 - Seleção de variáveis explicativas para o período entre 2005 e 2013...	176
Tabela 33 - Seleção de variáveis explicativas utilizadas para geração dos cenários de prognósticos.	177
Tabela 34-Parâmetros internos do DINAMICA EGO para simulação da cobertura da terra no período entre 1985 e 1995.	179
Tabela 35-Parâmetros internos do DINAMICA EGO para simulação da cobertura da terra no período entre 1995 e 2005.	179
Tabela 36-Parâmetros internos do DINAMICA EGO para simulação da cobertura da terra no período entre 2005 e 2013.	180

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i> (Radiômetro Avançado de Altíssima Resolução)
BTP	Brasil Terminal Portuário
CA	<i>Cellular Automata</i> (Autômatos celulares)
CDS	Companhia Docas de Santos
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CLUE	<i>Conversion of Land Use and its Effects</i> (Conversão do Uso da Terra e seus Efeitos)
CODESP	Companhia Docas do Estado de São Paulo
CORINE	<i>Coordination of Information of Environment</i> (Coordenação de Informação do Ambiente)
DGI	Divisão de Geração de Imagens
EEA	<i>European Environment Agency</i> (Agência Ambiental Europeia)
EGO	<i>Environment for Geoprocessing Objects</i> (Ambiente para Objetos Geoprocessáveis)
ERST-1	<i>Earth Resources Technology Satellite – 1</i> (Satélite de Tecnologia dos Recursos Terrestres-1)
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> (Mapeador Temático Melhorado +)
FEPASA	Ferrovia Paulista S.A
FERROBAN	Ferrovia Bandeirantes
GLOVIS	<i>Global Visualization Viewer</i> (Visualizador de Visualização Global)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISODATA	<i>Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique</i> (Técnica de Análise de Dados Iterativa Auto-Organizável)
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i> (Satélite de Sensoriamento Remoto da Terra)
LDCM	<i>Landsat Data Continuity Mission</i> (Missão de Continuidade dos Dados LANDSAT)
LUCC	<i>Land Use and Cover Change</i> (Mudanças no Uso e Cobertura da terra)
LULC	<i>Land Use and Land Cover</i> (Uso e Cobertura da terra)

MAXVER	Máxima Verossimilhança
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MSS	<i>Multispectral Scanner Subsystem</i> (Subsistema Imageador Multiespectral)
NASA	<i>National Aeronautics & Space Administration</i> (Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica)
OBIA	<i>Object-based Image Analysis</i> (Análise de Imagem Baseada em Objeto)
OLI	<i>Operational Land Imager</i> (Imageador Operacional da Terra)
PDEPS	Plano de Desenvolvimento e Expansão do Porto de Santos
PDI	Processamento Digital de Imagens
PDZ	Plano de Desenvolvimento e Zoneamento
PORTOBRAS	Empresa de Portos do Brasil S. A.
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
RMBS	Região Metropolitana da Baixada Santista
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPOT	<i>Système Pour l' Observation de la Terre</i> (Sistema de Observação da Terra)
SR	Sensoriamento Remoto
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i> (Sensor de Infravermelho Termal)
TM	<i>Thematic Mapper</i> (Mapeador Temático)
UCs	Unidades de Conservação
USGS	<i>United States Geological Survey</i> (Serviço Geológico dos Estados Unidos)
ZEE-BS	Zoneamento Ecológico-Econômico da Baixada Santista

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 JUSTIFICATIVA	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 SENSORIAMENTO REMOTO E DETECÇÃO DE MUDANÇAS	24
2.1.1 Imagens LANDSAT	27
2.2 CLASSIFICAÇÕES DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS	30
2.2.1 Avaliação da classificação.....	34
2.3 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL DE COBERTURA DA TERRA	39
2.3.1 Autômatos celulares	48
2.3.2 Dinamica EGO	55
3 ÁREA DE ESTUDO	57
3.1 HISTÓRICO E PLANOS DE DESENVOLVIMENTO DO PORTO DE SANTOS ...	60
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	68
4.1 COMPOSIÇÃO DA BASE DE DADOS.....	68
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	70
4.2.1 Classificação das imagens orbitais	71
4.2.2 Ajuste dos mapas temáticos.....	77
4.2.3 Organização da base de dados.....	79
4.2.4 Construção da modelagem dinâmica	85
4.2.4.1 Geração das matrizes de transição	86
4.2.4.2 Cálculo das faixas de discretização	87
4.2.4.3 Cálculo dos pesos de evidência	88
4.2.4.4 Dependência espacial entre pares de variáveis	88
4.2.4.5 Simulações e ajustes.....	89
4.2.4.6 Validação dos modelos	90
4.2.5 Cenários de prognósticos.....	91
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
5.1 CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	92
5.2 ANÁLISES DAS MUDANÇAS TEMPORAIS.....	105
5.2.1 Matriz de transição do período entre 1985 e 1995.....	107

5.2.2 Matriz de transição do período entre 1995 e 2005	110
5.2.3 Matriz de transição do período entre 2005 e 2013	111
5.3 PESOS DE EVIDÊNCIA E MAPAS DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO	114
5.3.1 Transição de Floresta para Urbano	114
5.3.2 Transição de Manguezal para Urbano	119
5.3.3 Transição de Campo para Urbano	123
5.3.4 Transição de Solo para Urbano	126
5.3.5 Transição de Água para Urbano	130
5.3.6 Transição de Floresta para Campo	132
5.3.7 Transição de Manguezal para Campo	136
5.3.8 Transição de Floresta para Solo	140
5.3.9 Transição de Manguezal para Solo	143
5.3.10 Transição de Campo para Solo	146
5.4 MAPAS SIMULADOS DA PAISAGEM PARA 1995, 2005, 2013	149
5.5 MODELOS DE PROGNÓSTICOS	155
5.5.1 Modelo estacionário para 2024	155
5.5.2 Modelo com expansão portuária para 2024	158
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
APÊNDICE A – Seleção de variáveis explicativas por período de simulação	175
APÊNDICE B - Parâmetros utilizados no <i>software</i> Dinamica EGO	179
APÊNDICE C - Valores dos pesos de evidência gerados para os empreendimentos operacionais, utilizados no modelo simulado de 2013 e nos modelos de prognósticos.....	181
APÊNDICE D- Arquivo de pesos de evidência para todas as transições considerando a variável categórica do zoneamento ecológico-econômico (zee) da baixada santista (parte terrestre), incorporado na geração do modelo simulado para 2024.....	184
APÊNDICE E - Valores dos pesos de evidência gerado para os novos empreendimentos projetados, utilizados nos modelos de prognósticos.....	188
APÊNDICE F - Valores dos pesos de evidência gerado em relação à distância aos novos empreendimentos projetados	190

1 INTRODUÇÃO

Cerca de dois terços da população mundial habitam as zonas costeiras, caracterizando um contingente populacional denso e concentrado, e onde se localizam as principais metrópoles contemporâneas (MORAIS, 2007). A posição do espaço litorâneo favorece a circulação de produtos, detendo a primazia na alocação dos pontos de terminais dos fluxos intercontinentais de mercadorias, ainda hoje executados majoritariamente pelo transporte marítimo (MORAIS, 2007).

Dessa forma, os portos localizados em áreas costeiras geralmente desempenham atividades de impacto significativo no desenvolvimento socioeconômico das cidades portuárias. Mais do que estruturas que servem aos propósitos de circulação entre territórios, os portos também participam da produção do espaço, pelo fato de demandarem infraestruturas que possibilitem seu funcionamento nas mais variadas escalas geográficas (MACHADO, 2012).

Na região da Baixada Santista, além das estruturas ligadas ao Porto de Santos, as atividades referentes ao turismo de veraneio e a indústria do polo de Cubatão marcaram, até recentemente, a estrutura econômica e urbanização da paisagem regional. Nos últimos anos, no entanto, a indústria extrativa ligada à extração de minerais não metálicos voltados à atividade da construção civil regional e a exploração de petróleo e gás provenientes da Bacia de Santos têm recebido amplos investimentos (SÃO PAULO, 2011).

Esses fatores promovem mudanças no espaço da cidade portuária e seus acessos, especialmente ligadas à infraestrutura viária e consequente expansão urbana. Assim, o desenvolvimento da zona costeira da Baixada Santista, juntamente com a tendência da expansão portuária, tem promovido mudanças no uso e ocupação da terra. As representações, ou modelos, do processo de alteração da terra são importantes na análise e simulação das dinâmicas de evolução urbana.

Nas áreas costeiras tropicais e subtropicais, observa-se a ocorrência de diversos fenômenos, provenientes tanto de fatores naturais, quanto das atividades humanas, influenciando na qualidade dos ecossistemas naturais (VARJABEDIAN, 1995). Podem ser observados na região da Baixada Santista diversos impactos ambientais negativos, como a instalação de estruturas portuárias construídas sobre os manguezais, bem como a demanda e aterramento de áreas naturais para ocupação. De acordo com Poffo (2007), as obras de ampliação do porto e a construção de

ferrovias, rodovias e instalação de indústrias são as grandes responsáveis pelo aterro de extensas áreas de manguezais. Dentre os inúmeros fenômenos citados por Cintron e Schaeffer-Novelli (1983) e CETESB (1983), encontram-se especificamente na atividade portuária e industrial, interferindo nessas áreas com desmatamentos, aterros para expansão, lavagem e abastecimento dos navios, armazenamento e transporte de cargas tóxicas. A implantação de rodovias e ferrovias também ocasiona movimentação de terra, exposição do solo, aterros com interceptação da drenagem, canalizações e barramentos, risco de acidentes de cargas tóxicas, trânsito de veículos, entre outros impactos.

Em decorrência das intensas transformações no espaço costeiro nos últimos anos, a definição de cenários dinâmicos espaciais para essas áreas permite a visualização das informações sobre processos das mudanças territoriais.

Embora os modelos sejam representações simplificadas do mundo real, as tecnologias combinadas, como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Processamento Digital de Imagens (PDI) de satélite e o uso de simulações de cenários, permitem avaliar de forma quantitativa a estruturação e a dinâmica do espaço, proporcionando melhor visualização dos elementos responsáveis por suas transformações espaço-temporais (ROSSETTI; ALMEIDA; PINTO, 2013).

Ao fornecer a descrição de causas e consequências das alterações do uso da terra, a modelagem dinâmica espacial atua no sentido de viabilizar a interpretação do sistema de uso e gestão da paisagem (INOUE, 2012). Esse tipo de modelagem pode ser utilizado para identificar fatores que influenciam o padrão espacial de alteração do uso e cobertura da terra e prever possíveis impactos (VERBURG et al., 2004).

A modelagem dinâmica espacial permite simular as mudanças em uma cidade portuária e elaborar diferentes cenários baseados nas expectativas entre as mudanças no uso e cobertura da terra e o desenvolvimento portuário. Segundo a CODESP (2009), a projeção estimada para o Porto de Santos deve alcançar uma movimentação de cargas em torno de 230 milhões de toneladas para 2024, e investimentos na ordem de 7 bilhões de reais para os próximos anos, visando aumentar a capacidade de movimentação, bem como modernizar as instalações e a infraestrutura do Porto de Santos.

As mudanças territoriais tornaram-se significativas devido à expansão e modernização das zonas costeiras; contudo, as pesquisas com abordagem aos

padrões espaciais urbanos regionais em relação ao desenvolvimento portuário não têm sido sistematicamente analisadas (CHEN; NUO, 2013).

Esta pesquisa baseia-se na construção de modelos dinâmicos espaciais da paisagem na região portuária da Baixada Santista abordando diferentes anos de simulação e considerando, além das variáveis relativa à infraestrutura de transportes, as propostas de desenvolvimento e expansão portuária previstas em um horizonte para o ano de 2024.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é gerar modelos dinâmicos espaciais da paisagem na região portuária da Baixada Santista e investigar a relação entre as mudanças apresentadas na cobertura da terra e a infraestrutura de transportes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Averiguar a adequação do uso de imagens de média resolução espacial para a geração de mapas de cobertura da terra a serem utilizados no processo de modelagem espacial.
- Investigar as propostas de expansão portuária e as possíveis mudanças na paisagem decorrentes dessa expansão.
- Propor cenários de prognósticos a partir da modelagem dinâmica espacial baseada na metodologia de autômatos celulares.

1.3 JUSTIFICATIVA

A nova lei dos portos, Lei Federal nº 12.815/2013 (BRASIL, 2013), pode ser considerada um novo marco regulatório no setor portuário, pois visa promover investimentos privados e regulamentar a forma de contratação de trabalhadores portuários. Pode-se observar a região da Baixada Santista recebendo investimentos para o desenvolvimento do setor portuário, com a instalação de áreas de retroporto,

armazenagem e transporte de múltiplas cargas, dentre as derivadas do petróleo e gás provenientes da Bacia de Santos, as quais têm demandado novas configurações na ocupação do território.

Apesar de estudos já realizados no sentido de avaliar a dinâmica espaço-temporal da região da Baixada Santista, os processos atuantes do desenvolvimento regional, especificamente os projetos de expansão portuária, serão discutidos com a proposta de modelagem espacial para investigar a relação dessas variáveis com as mudanças na cobertura da terra, especialmente as consequências dessa expansão, em cenários futuros, para as áreas florestais.

Dessa forma, na tentativa de responder se a dimensão e as conversões da cobertura da terra que ocorreram no passado estarão atuantes também na mesma proporção no futuro, Soares-Filho; Cerqueira e Pennachin (2002) afirmam que é possível a utilização dos modelos dinâmicos para tentar reproduzir, em ambiente computacional, os padrões dinâmicos espaciais da paisagem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordará os temas relativos ao uso dos sensores remotos nas análises de detecção de mudanças no território, definição sobre classificação de imagens orbitais, um breve histórico do satélite LANDSAT utilizado neste estudo e a modelagem dinâmica espacial.

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO E DETECÇÃO DE MUDANÇAS

O termo Sensoriamento Remoto (SR) pode ser definido como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados acomodados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2008).

Os sensores remotos orbitais, tais como os satélites artificiais, captam a energia eletromagnética refletida pelos elementos da superfície terrestre e, dependendo do tipo, o sensor pode captar uma ou mais regiões do espectro (sensor multiespectral) e abranger uma frequência de imageamento sobre uma mesma área (FLORENZANO, 2011), à qual é dado o nome de resolução temporal.

Outras características dos sistemas sensores, além da resolução temporal ou frequência de imageamento sobre a mesma área, referem-se sobre a resolução espacial, ou a capacidade em discriminar objetos da imagem em função de seu tamanho sem perder a informação; a resolução espectral, ou a capacidade que um sensor possui para discriminar objetos em função da sua faixa espectral; a resolução radiométrica, que se refere à capacidade do sensor em discriminar a intensidade da energia refletida ou emitida pelos objetos quanto aos valores associados ao nível de cinza utilizados para representar uma imagem (FORENZANO, 2011).

Os sensores remotos têm se tornado importantes ferramentas para o monitoramento e análise da extensão dos ecossistemas (SATAPATHY et al., 2007). Adequadas imagens de satélite, ao recobrirem sucessivas vezes a superfície terrestre, possibilitam o estudo e monitoramento de fenômenos naturais dinâmicos do meio ambiente, como inundação e erosão do solo, além de contribuírem na

identificação dos diferentes usos no espaço terrestre, desde o acompanhamento de obras, construções de estradas, portos, aeroportos, represas, implantação de indústrias e monitoramento em áreas urbanas (FLORENZANO, 2011).

Assim, as técnicas de SR contribuem com a análise e elaboração de um diagnóstico que subsidie o planejamento do uso da terra nas áreas urbanas, com a visualização da expansão da mancha urbana, bem como a identificação da direção do crescimento de uma cidade (FLORENZANO, 2011). Uma de suas principais aplicações está na detecção das mudanças na cobertura da terra. Essa documentação é especialmente importante para áreas com grandes alterações, onde a diversidade ecológica e induções antropogênicas coexistem, como o caso de diversas áreas estuarinas (HILBERT, 2006).

É necessária a distinção entre os termos uso da terra e cobertura da terra. O uso da terra refere-se ao modo como a terra é ocupada pelos seres humanos, bem como as atividades ali realizadas, e a cobertura da terra refere-se aos materiais biofísicos encontrados sobre a superfície terrestre (JENSEN, 2009). O autor exemplifica que um Parque Estadual pode ser usado para recreação, mas apresentar uma cobertura florestal de coníferas. O termo uso e cobertura da terra é geralmente referido como *Land Use and Land Cover* (LULC). Adicionalmente, o estudo das mudanças no uso e cobertura da terra é tratado como *Land Use and Cover Change* (LUCC).

Geralmente, as atividades humanas estão diretamente relacionadas com o tipo de revestimento da terra, seja ele florestal, agrícola, residencial ou industrial (IBGE, 2006). Inúmeras categorias ou classes podem ser utilizadas para descrever os diferentes usos e coberturas da terra, mas o emprego delas sempre dependerá dos objetivos do trabalho, que por sua vez definem a escala apropriada e a maior importância que será dada aos usos ou à cobertura da terra (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004).

A detecção de mudanças envolve a aquisição de conjuntos de dados multitemporais para analisar as relações e interações entre as atividades humanas e as características naturais em um território ao longo do tempo (LU et al., 2004). As vantagens da aquisição de dados repetitivos, a visão sinóptica e o formato digital adequado ao processamento computadorizado dos dados de SR, como o sensor Mapeador Temático (*Thematic Mapper* - TM) do Satélite de Sensoriamento Remoto da Terra (*Land Remote Sensing Satellite* - LANDSAT), o Sistema de Observação da

Terra (*Système Pour l' Observation de la Terre* - SPOT) e até imagens de radar, como o Radiômetro Avançado de Altíssima Resolução (*Advanced Very High Resolution Radiometer* - AVHRR), têm se tornado importantes fontes de dados em diversas aplicações e técnicas envolvidas na detecção de mudanças temporais nas últimas décadas (LU et al., 2004).

Os estudos sobre detecção de mudanças possuem diversos enfoques, desde o monitoramento das alterações na cobertura da terra, avaliação de mudanças em áreas florestais e urbanas, mudanças geológicas e climáticas. O estudo das alterações na cobertura da terra é amplamente investigado e fornece informações sobre as conversões das classes discriminadas no território ao longo do tempo (LUNETTA et al., 2004; TENG et al., 2008; BERBEROGLU; AKIN, 2009; AFIFY, 2011; MUNTHALI; MURAYAMA, 2011; BAJOCCO et al., 2012; ERENER; DUZGUN; YALCINER, 2012).

Jin et al. (2013) mencionam duas principais abordagens utilizadas para a detecção de mudanças envolvendo dados de SR. Uma delas é baseada na diferença espectral entre as imagens, em que análises simultâneas de dados multitemporais e multiespectrais são conduzidas. Algumas técnicas, como a diferenciação entre imagens, consideram o valor espectral das imagens e fornecem a informação sobre a localização espacial das mudanças. Essa abordagem quantifica as transformações ocorrentes no estado de cada um dos *pixels*, ou células em uma imagem digital, em termos de “mudança ou não mudança” delimitando essas regiões (KIEL, 2008).

A segunda é embasada na pós-classificação das imagens, quando classificações independentes são realizadas e comparadas posteriormente (JIN et al., 2013). Nesse aspecto, segundo Kiel (2008), ela é quantitativa e qualitativa se a informação da mudança, para além da localização e quantificação, avança em discriminação das classes, habilitando o estudo das trajetórias dos *pixels* entre elas. O autor também aponta que a correta interpretação depende da informação da classe inicial e final de cobertura da terra, com a necessidade de estabelecer limiares entre mudança e a não-mudança entre as classes, bem como distinguir as possibilidades intermediárias dentro dessas classes. Outra vantagem dessa técnica, além de prover de uma matriz completa sobre a direção dessas mudanças, é a capacidade de minimizar os impactos dos efeitos da atmosfera e das diferenças ambientais entre imagens multitemporais (LU et al., 2004).

No estudo de Afify (2011), a precisão da técnica de pós classificação apresentou dependência com a precisão das imagens classificadas. Estudos relacionados à aplicação da pós-classificação entre imagens multitemporais foram empregados nos trabalhos de Biro et al. (2013), Kumar et al. (2012), Erener; Duzgun; Yalciner (2012).

2.1.1 Imagens LANDSAT

O programa LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*) é um sistema de satélite de observação da Terra gerenciado pela Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (*National Aeronautics e Space Administration* - NASA) e do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS), com aquisição de dados desde 1972 (JENSEN, 2009). O primeiro satélite da série foi o Satélite de Tecnologia dos Recursos Terrestres (*Earth Resources Technology Satellite – 1* - ERST-1) passando a ser denominado LANDSAT em 1975 (NOVO, 2008).

Os satélites LANDSAT 4 e 5 apresentam o sensor TM, além do sensor Subsistema Imageador Multiespectral (*Multispectral Scanner Subsystem* - MSS) já incorporado nos antecessores LANDSAT 1, 2 e 3. O sensor MMS do satélite LANDSAT 5 deixou de enviar dados em 1995, e o sensor TM manteve-se ativo até novembro de 2011. Esse sensor apresentou melhor resolução espacial e discriminação espectral entre objetos da superfície terrestre, maior fidedignidade geométrica e precisão radiométrica em relação ao sensor MSS (NOVO, 2008).

O sensor TM subsidia mapeamentos temáticos, principalmente na área de recursos naturais (EMBRAPA, 2013). A Tabela 1 resume suas principais características.

Tabela 1 - Principais características do sensor TM.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Res. Radiométrica
TM (Thematic Mapper)	(B1) AZUL	0.45 - 0.52 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits
	(B2) VERDE	0.52 - 0.60 μm				
	(B3) VERMELHO	0.63 - 0.69 μm				
	(B4) INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0.76 - 0.90 μm				
	(B5) INFRAVERMELHO MÉDIO	1.55 - 1.75 μm	120 m			
	(B6) INFRAVERMELHO TERMAL	10.4 - 12.5 μm				
	(B7) INFRAVERMELHO MÉDIO	2.08 - 2.35 μm	30 m			
s.d. = sem dados/informações						

Fonte: EMBRAPA (2013).

A continuidade da série LANDSAT ocorreu com o lançamento em 11 de fevereiro de 2013, do satélite LANDSAT 8 ou Missão de Continuidade dos Dados LANDSAT (*LANDSAT Data Continuity Mission - LDCM*), que opera com os instrumentos Imageador Operacional da Terra (*Operational Land Imager - OLI*) e o Sensor de Infravermelho Termal (*Thermal Infrared Sensor - TIRS*). O sensor OLI dará continuidade aos produtos gerados a partir dos sensores TM e o Mapeador Temático Melhorado + (*Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+*), além de incluir duas novas bandas espectrais, uma projetada para estudos de áreas costeiras e outra para detecção de nuvens (EMBRAPA, 2013). Recentemente, as imagens do satélite LANDSAT-8 tornaram-se disponíveis por pesquisa via websites do Visualizador de Visualização Global (*Global Visualization Viewer - GLOVIS*) (<http://glovis.usgs.gov/>) e Explorador da Terra (*Earth Explorer*) em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

O sensor OLI possui bandas espectrais para coleta de dados na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, além de uma banda pancromática (Tabela 2). Avanços tecnológicos demonstrados por outros sensores experimentais da NASA foram introduzidos no sensor OLI, que passou a ter quantização de 12 bits (EMBRAPA, 2013).

Tabela 2 - Principais características do sensor OLI.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Res. Radiométrica
OLI (Operational Land Imager)	(B1) COSTAL	0.433 - 0.453 μm	30 m	16 dias	185 km	12 bits
	(B2) AZUL	0.450 - 0.515 μm				
	(B3) VERDE	0.525 - 0.600 μm				
	(B4) VERMELHO	0.630 - 0.680 μm				
	(B5) INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0.845 - 0.885 μm				
	(B6) INFRAVERMELHO MÉDIO	1.560 - 1.660 μm				
	(B7) INFRAVERMELHO MÉDIO	2.100 - 2.300 μm				
	(B8) PANCROMÁTICO	0.500 - 0.680 μm	15 m			
	(B9) NUVENS	1.360 - 1.390 μm	30 m			
s.d. = sem dados/informações						

Fonte: EMBRAPA (2013).

O sensor TIRS possui bandas espectrais na faixa do infravermelho termal, seus dados possuem 100m de resolução espacial e resolução radiométrica de 12 bits e também foram registrados com os dados oriundos do sensor OLI (EMBRAPA, 2013).

Os dados LANDSAT possuem um completo registro da superfície continental da Terra e são considerados de grande importância nos estudos sobre mudanças globais e temporais. Os dados desse satélite são amplamente utilizados devido à facilidade de aquisição, ampla visão do território e da característica multiespectral e multitemporal do sensor, o qual tem possibilitado a sua aplicação em estudos de avaliação e detecção de mudanças territoriais (LU et al., 2004).

A extração dos tipos de cobertura da terra com imagens do satélite LANDSAT é amplamente utilizada (WANG; YIN, 2011), bem como sua aplicação em estudos sobre modelagem da paisagem (YU; HE; PAN, 2010; AHMED; AHMED, 2012; MOGHADAM; HELBICH, 2013).

Moghadam e Helbich (2013) examinaram mudanças na cobertura da terra com base em dados de sensoriamento remoto coletados entre 1973 e 2010, captados pelo satélite LANDSAT. Este satélite proporcionou o cobrimento de imagens para

um amplo território na análise da expansão urbana em megacidades como Mumbai, Índia. A média resolução desse satélite foi adequada para a extração dos mapas temporais da cobertura da terra utilizados na construção de modelos dinâmicos do crescimento urbano.

Quartaroli et al. (2006) realizaram o levantamento da cobertura da terra na região nordeste do estado de São Paulo nos períodos entre 1988 e 2003, com imagens do satélite LANDSAT, para analisar de forma quali e quantitativamente a dinâmica da cobertura da terra e desdobramentos para a gestão territorial do agronegócio.

Os satélites da série LANDSAT têm possibilitado o desenvolvimento de pesquisas na caracterização do uso e cobertura da terra em todo o mundo e na área de monitoramento territorial devido à aquisição periódica dos seus dados e sua continuidade com a nova série LANDSAT 8.

2.2 CLASSIFICAÇÕES DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS

Os dados de sensoriamento remoto são analisados a partir de uma variedade de técnicas de processamento de imagens, incluindo duas principais abordagens:

- processamento analógico (visual) de imagens, e;
- processamento digital de imagens.

Segundo Novo (2008), a análise visual pode ser definida como o ato de examinar uma imagem com o propósito de identificar objetos e estabelecer julgamentos sobre suas propriedades, tais como cores, padrões, formas, texturas, localização, associação e arranjo espacial, que permitam a identificação das classes de interesse. Assim, a interpretação visual é mais eficiente no reconhecimento dos padrões de objetos caracterizados por distintos arranjos espaciais. Ao mesmo tempo, tem havido um ressurgimento na ciência da interpretação visual de imagens à medida que os sistemas digitais de sensoriamento remoto fornecem imagens com maior resolução espacial e nível de detalhe (JENSEN, 2009).

Por outro lado, a utilização de computadores com o emprego das técnicas de análise digital permite avaliar automaticamente a natureza multispectral de uma imagem. Segundo Novo (2008), o PDI pode ser utilizado no sentido de: 1) melhorar a qualidade geométrica, radiométrica dos dados brutos, 2) melhorar a aparência visual das imagens para facilitar a interpretação visual, realçando as feições de

interesse, 3) automatizar certos procedimentos de extração de informações para permitir o rápido tratamento de grandes volumes de dados, 4) permitir a integração de dados de diferentes fontes, 5) facilitar o desenvolvimento de modelos e a geração de produtos que representem a grandeza geofísica ou biofísica.

A classificação do uso e cobertura da terra baseada em padrões estatísticos e técnicas de reconhecimento aplicadas a dados de sensoriamento remoto é um dos mais frequentes métodos de extração de informações (JENSEN, 2005). Dessa forma, a classificação da imagem é tratada como o processo de atribuir a cada *pixel*, ou conjunto de *pixels*, um rótulo em função das propriedades espectrais e/ou espaciais (NOVO, 2008).

A classificação de imagens em Sensoriamento Remoto é especialmente útil no monitoramento da cobertura da terra, pois permite identificar padrões de ocupação e de degradação ambiental, bem como realizar o mapeamento temático em amplas regiões devido ao alcance das imagens de satélite.

Em função do grau de intervenção que o analista possui no processo de classificação digital, a classificação pode ser supervisionada ou não-supervisionada.

O processo de classificação supervisionada implica no conhecimento prévio do analista sobre a localização espacial de algumas amostras das classes de interesse, para assim fornecer informações específicas e treinar o algoritmo de classificação (NOVO, 2008). Segundo a autora, a classificação pode ser determinística, ou seja, os limites das classes são definidos com base em um critério de corte estabelecido em função do desvio padrão em relação à média de cada classe; ou probabilística, método no qual as amostras de cada classe são descritas por uma função de probabilidade no espaço multi ou hiperespectral. Tal função descreve a probabilidade de um dado *pixel*, ou conjunto desses *pixels*, pertencer à determinada classe em função de sua localização nesse espaço n-dimensional, formada por bandas espectrais utilizadas na classificação (NOVO, 2008).

Os algoritmos comumente utilizados na classificação supervisionada são o algoritmo de mínima distância, paralelepípedo e máxima verossimilhança (MaxVer) (Figura 1) (ARONOFF, 2005).

Figura 1 - Algoritmos de classificação supervisionada: a) valores de *pixels* distribuídos em seis classes, b) mínima distância, c) paralelepípedo e d) máxima verossimilhança.

Fonte: Aronoff (2005).

O algoritmo de classificação por MaxVer é um dos algoritmos de classificação supervisionada mais utilizado e requer que as classes de treinamento sejam distribuídas normalmente em n bandas para computar a variância da classe e as matrizes de covariância (JENSEN, 2009). Especificamente no mapeamento da vegetação de manguezal, os resultados de Herz (1991) permitiram a identificação das superfícies com diferentes padrões para os tipos de estrutura de mangue denso alto, mangue denso baixo, mangue disperso baixo, a partir da seleção das amostras de treinamento e o emprego do algoritmo MaxVer.

Na classificação não-supervisionada, por sua vez, os *pixels* de uma imagem são alocados em classes sem que o usuário tenha um conhecimento prévio da

existência ou nome das classes. Este procedimento permite que o analista conheça a distribuição de *pixels* por classes espectrais, e posteriormente, pode-se proceder a um reagrupamento dessas classes (NOVO, 2008). Normalmente, as classes são definidas com base em um agrupamento de *pixels* que apresentam similaridade espectral. Por exemplo, no algoritmo ISODATA (Técnica de Análise de Dados Iterativa Auto-Organizável - *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), as classes são determinadas pela união de agrupamentos, ou “*clusters*”, em que se incluirá a união dos grupos se a distância de separação das classes no espaço multiespectral estiver abaixo do limiar estabelecido pelo usuário (JENSEN, 2005).

Outro método de classificação não-supervisionado, o k-médias (*k-means*), calcula inicialmente a média de classes homogêneas distribuídas no espaço de atributos e, após a determinação dessa média inicial, o algoritmo utiliza um procedimento para cálculo da menor distância entre cada pixel e a média de cada classe. A partir desses valores, aloca cada pixel à classe, cuja média seja a mais próxima de seu valor (NOVO, 2008).

As técnicas usadas para detectar e delinear o manguezal têm envolvido, principalmente, técnicas de classificação não-supervisionada, como o ISODATA, técnicas de classificação supervisionada, como o algoritmo de máxima verossimilhança, o uso conjunto de ambas técnicas, classificação espectral, índices espectrais da vegetação, além da interpretação visual e classificação digital de aerofotogrametria (HEUMANN, 2011). Assim, em imagens de baixa a média resolução espacial, os métodos automáticos, tanto supervisionados, não supervisionados ou aplicação de ambos, têm sido comumente aplicados.

Ao mesmo tempo, novas técnicas de análise têm sido desenvolvidas que não consistem na análise do *pixel* individualmente, mas partem da análise de um grupo de *pixels* contínuos. A classificação por regiões considera a informação contextual presente nas imagens, sendo necessário obter uma imagem dividida em regiões homogêneas segundo algum critério (NOVO, 2008). A Análise de Imagem Baseada em Objeto (*Object-based image analysis* - OBIA), têm sido aplicada, principalmente, em imagens de alta resolução espacial (HEUMANN, 2011) e introduz a possibilidade de definir critérios para os objetos na imagem em diversas escalas pré-definidas, em uma ou mais camadas de segmentação, utilizando as características de reflectância espectral associadas a uma grande variedade de outras medidas, internamente aos objetos ou entre estes, a partir de seus índices de textura e morfologia, forma do

objeto, relações de contexto, relações espaciais, tais como adjacência, continuidade, densidade e outras (WEBER, 2008).

A adoção de diferentes técnicas de PDI auxilia na captação das informações do terreno e geração dos melhores resultados para a detecção de mudanças de cobertura da terra, de acordo com imagens disponíveis e objetivos do estudo.

2.2.1 Avaliação da classificação

A classificação automática de imagens gera resultados que precisam ser avaliados quanto ao grau de eficácia metodológica. A medição da acurácia, ou medição da quantidade de acertos e erros do resultado da classificação, é geralmente fornecida pelo grau de confusão entre as classes em uma matriz de erros e pelo cálculo de índices, que fornecem uma medida geral, como o índice Kappa.

Congalton (1991) ressalta a importância de garantir a utilização de um conjunto de dados independentes para avaliação e treinamento do algoritmo para evitar a superestimativa da precisão da classificação. Para avaliação da classificação, a forma mais comum de representar a precisão da classificação dos dados de sensoriamento remoto encontra-se na forma de uma matriz de erros.

Uma matriz de erros (ou matriz de confusão) é um arranjo de números estabelecidos em linhas e colunas que expressam o número de unidades de amostra (ou seja, *pixels*, aglomerados de *pixels* ou polígonos atribuído a uma determinada categoria em relação à categoria real, esta representada pela verdade verificada em terreno ou uma imagem de referência. Geralmente, as colunas representam os dados de referência, enquanto as linhas indicam a classificação gerada a partir dos dados de sensoriamento remoto (Tabela 3). Uma matriz de erros é uma maneira eficaz para representar a precisão como cada categoria é descrita, fornecendo a exatidão global (ou acurácia geral), os erros de omissão e de comissão presentes na classificação (CONGALTON, 1991).

A exatidão global pode ser calculada dividindo-se a soma do total de *pixels* corretamente classificados, ou seja, a soma dos números da diagonal principal, pelo número total de *pixels* na matriz de erros (CONGALTON, 1991). Além disso, a precisão das categorias individuais pode ser calculada de forma semelhante, resultando na medida de precisão dos erros de omissão e comissão, os quais se

referem, respectivamente, aos *pixels* erradamente excluídos da verdadeira classe a que pertencem e aos *pixels* incluídos erroneamente em uma classe particular (IWAI; QUINTANILHA, 2005).

Tomando o total de *pixels* corretamente classificados em uma categoria e dividindo-o pelo total de *pixels* da categoria em questão derivado dos dados de referência (medida da coluna), tem-se a medida da probabilidade dos *pixels* estarem corretamente classificados, chamada de “acurácia do produtor”, pelo fato de o produto da classificação relatar quão boa certa área pode ser classificada, sendo também uma medida do erro de omissão (CONGALTON, 1991). Por outro lado, o número total de *pixels* corretamente classificados em uma categoria dividida pelo número total de *pixels* classificados (linha) fornece o resultado da “acurácia do usuário” ou confiabilidade, sendo um indicativo da probabilidade de um pixel classificado no mapa representar aquela classe, sendo também uma medida do valor do erro de comissão (CONGALTON, 1991).

A Tabela 3 exemplifica uma matriz de erros e o cálculo para determinar a acurácia do produtor representada na eq. (1), do usuário na eq. (2) e a exatidão global na eq. (3), respectivamente, segundo Congalton (1991).

Tabela 3 - Exemplo da matriz de erros.

Classificação	Dados de Referência					
	Classes	1	2	3	k	Total linha
	1	X _{1,1}	X _{1,2}	X _{1,3}	X _{1,k}	X ₁₊
	2	X _{2,1}	X _{2,2}	X _{2,3}	X _{2,k}	X ₂₊
	3	X _{3,1}	X _{3,2}	X _{3,3}	X _{3,k}	X ₃₊
	k	X _{k,1}	X _{k,2}	X _{k,3}	X _{k,k}	X _{k+}
	Total coluna	X ₊₁	X ₊₂	X ₊₃	X _{+k}	N

Fonte: Adaptada de Iwai e Quintanilha (2005) e Congalton (1991).

Acurácia do produtor:

$$\text{Classe } k = \frac{x_{k,k}}{x_{+k}} \quad (1)$$

Acurácia do usuário: $\text{Classe } k = \frac{x_{k,k}}{x_{k+}} \quad (2)$

Exatidão global: $\frac{(x_{1,1} + x_{2,2} + x_{3,3} + x_{k,k})}{N} \quad (3)$

O índice Kappa (k) é uma técnica de medida de exatidão que pode ser utilizada para avaliar a concordância entre o mapeamento temático e a imagem de referência através de valores que variam de 0 a 1 (IWAJ; QUINTANILHA, 2005). Esta medida é baseada na diferença entre a exatidão global e a exatidão de risco do produtor e do usuário, indicada pela soma das linhas e colunas da matriz de confusão (COHEN, 1960). Sua fórmula é dada conforme eq.(4):

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (4)$$

Em que N é o número total de observações, r representa o número de linhas na matriz, x_{ii} é o número de observações da linha (i) e coluna (i) e x_{i+} e x_{+i} representam os totais marginais das linhas e colunas da matriz. O K varia entre 0 e 1.

Na década de 1970, Landis e Koch (1977) estabeleceram valores de referência para o índice Kappa de acordo com a tecnologia disponível na época. Até hoje, no entanto, esses valores são utilizados por facilitarem a avaliação dos resultados. Segundo os autores, a interpretação do índice Kappa segue um grau de concordância, sendo que o valor do índice menor que 0 é considerado fraco, entre 0 e 0,2 é mínimo, entre 0,2 e 0,4 é considerado razoável, entre 0,4 e 0,6 é moderado, entre 0,6 e 0,8 há uma substancial concordância, e entre 0,8 e 1,0 é alto.

Utilizou-se nesta pesquisa o índice Kappa para avaliação das classificações das imagens, mas há o índice Kappa condicional, o qual estima a acurácia de cada classe, sendo calculado com o mesmo princípio do índice Kappa usado para a avaliação global das classificações. O índice Kappa condicional do usuário avalia os erros de comissão, conforme eq. (5), e o do produtor, os erros de omissão, conforme eq. (6) (ROSSITER, 2004).

$$K_u = \frac{nn_{ii} - n_{i+} n_{+i}}{nn_{i+} - n_{i+} n_{+i}} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{nn_{ii} - n_{i+} n_{+i}}{nn_{+i} - n_{i+} n_{+i}} \quad (6)$$

Onde,

nn_{ii} é número total de amostras corretamente classificadas da classe k ;

n_{i+} é número total de amostras classificadas da classe k ;

n_{+j} é número total de amostras coletadas da classe k ; e

n é número total de amostras.

O tamanho da amostra é outra importante consideração quando se avalia a precisão dos dados do sensoriamento remoto, devendo manter um nível mínimo e suficiente para que a análise realizada seja estatisticamente válida. Em relação ao número de amostras, Congalton (1991) recomenda um mínimo de 50 amostras para cada categoria ou classe de cobertura da terra na matriz de erros, ressaltando ainda que esse número deve ser ajustado com base na importância relativa de cada categoria ou por sua inerente variabilidade.

Ao planejar um projeto envolvendo dados de sensoriamento remoto, é muito importante que o esforço seja dado também ao sistema de classificação a ser utilizado. Em muitos casos, este esquema já existe, como o sistema de classificação proposto por Anderson (Anderson et al., 1979). Em outros casos, o esquema da classificação é ditado pelos objetivos do projeto, como o sistema de classificação do Projeto Coordenação de Informação do Ambiente (*Coordination of Information of Environment* - CORINE) para monitoramento das mudanças ambientais da Europa.

Qualquer sistema de classificação adotado deve ser mutuamente exclusivo, ou seja, qualquer área a ser classificada deve pertencer a uma classe apenas, sendo também útil seguir uma organização hierarquizada das classes, no qual certas categorias podem ser reconhecidas em grupos generalizados (CONGALTON, 1991).

Dois principais esquemas de classificação do uso e cobertura da terra que procuram seguir uma organização hierarquizada de suas classes, encontram-se o sistema desenvolvido por Anderson et al. (1979) e o sistema de classificação do projeto CORINE.

O sistema desenvolvido por Anderson et al. (1979), utilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* – USGS), foi concebido para identificação da cobertura da terra, sendo composto pelos níveis mais abrangentes de âmbito nacional, interestadual ou estadual (níveis I e II) e desenvolvimento posterior de classificação mais detalhada nos níveis III e IV (JENSEN, 2009). Como exemplo, esse sistema possui em seu nível I as terras construídas, terras agrícolas, pastagem, terras florestais, água, terra úmida, terra árida, tundra e neve (ou gelo perene).

Com relação ao sistema de classificação do Projeto CORINE, este foi implantado pela Agência Ambiental Europeia (*European Environment Agency* – EEA) e contém informações ambientais padronizadas da Europa, com dados de cobertura da terra baseados nas informações do satélite LANDSAT. A classificação dos dados sobre a cobertura da terra possui escala cartográfica de representação em 1:100.000, abrangendo os níveis I e II, além de dados auxiliares para identificação de níveis mais detalhados (nível III com 44 classes) (LANG; BLASCHKE, 2009). O projeto tem realizado atualização periódica dos mapeamentos, permitindo o monitoramento das mudanças temporais no território europeu. Esse sistema fornece exemplos de aplicação e descrição das classes que serviram de base para o mapeamento da região de estudo (Tabela 4).

Para observar a dinâmica florestal em associação com a vegetação campestre, optou-se por seguir o sistema utilizado pelo projeto CORINE, possibilitando a organização das classes no nível II, tais como Florestas, Associações de Vegetação Herbácea e/ou Arbustiva e Espaços Abertos com Pouca ou Nenhuma Vegetação. Já o sistema concebido por Anderson et al. (1979) não foi suficiente para descrever as áreas campestres, ou de transição entre vegetação densa e rasteira.

Em suma, os esquemas de classificação são importantes para a definição das legendas a serem adotadas em mapeamentos realizados a partir da classificação de imagens multiespectrais. Os processos de classificação, cujos resultados são avaliados por índices consolidados a partir de matrizes de erros, constituem uma etapa fundamental em uma metodologia, amplamente utilizada, para a detecção de mudanças de uso e cobertura da terra.

Dessa maneira, a partir da detecção de mudanças de cobertura da terra é possível a construção de modelos da paisagem e simular cenários futuros, como veremos no item a seguir que trata do tema central desta pesquisa: a modelagem dinâmica espacial de cobertura da terra.

Tabela 4 - Sistema de classificação CORINE.

Nível I	Nível II
1. Superfícies artificiais	1.1 Estruturas urbanas
	1.2 Unidades industriais, comerciais e de transportes
	1.3 Local de mineração, depósito e construção
	1.4 Áreas vegetadas artificiais e não agrícolas
2. Áreas agrícolas	2.1 Terras aráveis
	2.2 Culturas permanentes
	2.3 Pastagem
	2.4 Áreas de agricultura heterogênea
3. Florestas e áreas semi - naturais	3.1 Florestas
	3.2 Associações de vegetação herbácea e/ ou arbustiva
	3.3 Espaços abertos com pouca ou nenhuma vegetação
4. Áreas úmidas	4.1 Áreas úmidas interiores
	4.2 Áreas úmidas litorâneas
5. Corpos d'água	5.1 Águas interiores
	5.2 Águas marinhas

Fonte: Girard; Girard; Venkat (2003).

2.3 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL DE COBERTURA DA TERRA

Os modelos, que são tentativas de representação simplificada da realidade, também são importantes na busca de respostas sobre correlações e comportamentos de variáveis ambientais (MOURA, 2003). Modelos são estruturas

simplificadas da realidade que apresentam, de forma generalizada, características ou relações importantes e podem assumir formulação qualitativa ou quantitativa, expressas em termos lógicos ou matemáticos com significância também para diagnósticos ou previsão, tornando-se básicos aos procedimentos de simulação (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Com relação à linguagem utilizada, as seguintes categorias dos modelos podem ser descritas: a) modelos matemáticos, que eventualmente são apresentados sob a forma de equações, como os de regressão; b) modelos de sistemas, denominados também de esquemas lógicos, que procuram representar a estrutura do sistema e identificar elementos, fluxos e retroalimentações; c) modelos preditivos que, construídos com imagens de sistemas, como matrizes de relações entre os elementos de um sistema espacial, preveem a sua evolução quando se modificam alguns parâmetros, isto é, certas condições de entrada e valores das variáveis de seus elementos e das relações; d) modelos gráficos que compõem estruturas, resultando na existência de tipos recorrentes e, localmente, de arranjos espaciais determinados (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Nos últimos anos, um grande conjunto de modelos de operação pode ser usado para prever ou explorar possíveis trajetórias de mudanças no uso e cobertura da terra (VERBURG et al., 2006). A literatura contém um número considerável desses modelos. Briassoulis (2000) abordou algumas das principais categorias dos modelos de uso e cobertura da terra, considerados expressões medidas sobre a conversão de um dado tipo de uso da terra para outro, ocorrendo em diversos níveis espaciais e períodos de tempo.

Notadamente para Guan et al. (2011), os modelos para as análises das mudanças no uso e cobertura da terra podem ser divididos em três classes: 1) os modelos empíricos e estatísticos, a exemplo os modelos baseados na Cadeia de Markov e os modelos de regressão; 2) os modelos dinâmicos, tais como o modelo dos Autômatos Celulares (CA) e modelos baseados em agente; 3) os modelos integrados, como o modelo Conversão do Uso da Terra e seus efeitos (*Conversion of Land Use and its Effects* - CLUE). Porém, os modelos dinâmicos parecem ser mais sensíveis do que modelos empíricos e estatísticos para prever mudanças futuras no uso da terra.

Os modelos dinâmicos de simulação tentam replicar possíveis padrões da evolução da paisagem e assim possibilitar a avaliação de futuras implicações

ecológicas sobre o meio ambiente (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002).

Sklar e Costanza (1990) definem um modelo de dinâmica espacial como qualquer formulação que descreve mudanças nos padrões espaciais em um tempo t para um novo padrão espacial em um tempo $t+m$, como expresso na eq.(7):

$$X_{t+m} = f(X_t, Y_t) \quad (7)$$

Em que:

X_t é o padrão espacial no tempo t ;

Y_t é um vetor de variáveis que podem afetar a transição.

Esta definição do modelo de dinâmica espacial ressalta que o espaço e tempo são interligados e não podem ser reduzidos em dois componentes independentes, no qual um processo no tempo t controla processos no tempo $t+m$ (SKLAR; COSTANZA, 1990).

De acordo com Soares-Filho et al. (2007), os componentes básicos de qualquer modelo de mudança da paisagem consistem em (1) uma configuração inicial, (2) função de mudança e (3) configuração de saída. Os autores descrevem a configuração inicial como, por exemplo, um mapa da paisagem ou de uso e cobertura da terra, derivados de dados de sensoriamento remoto. A função de mudança pode usar ambas as matemáticas contínuas ou discretas, envolvendo desde uma equação linear diferencial, no caso de o tempo ser considerado como uma variável contínua, ou exemplos mais complexos, como a utilização de sequências de regras de decisão (SOARES-FILHO et al., 2007). A saída consiste em mapas simulados definidos por um número de intervalo de tempo.

Para Soares (1992), os modelos de um sistema podem se comportar como modelos de mudança discreta em que as variáveis dependentes mudam discretamente em pontos específicos do tempo simulado, ou contínuos, no qual as variáveis dependentes mudam continuamente ao longo do tempo simulado. O tempo, na maioria das simulações, é a principal variável independente. As outras variáveis incluídas na simulação são funções do tempo e, portanto, são variáveis dependentes (SOARES, 1992).

O primeiro componente da construção de uma função de mudança envolve sua quantificação, e o segundo irá operar sobre os mapas de probabilidades de transição para alocação espacial dessas mudanças (SOARES-FILHO et al., 2007). Para os autores, a utilização de uma matriz de transição pode representar os elementos de uma paisagem e suas transições, fornecendo o elemento quantitativo dessas mudanças.

Um modelo de transição requer a especificação de um número finito de estados e que sejam conhecidas as probabilidades, ou as taxas de transição de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto (SOARES-FILHO et al., 2007). O modelo Markoviano é um caso específico de modelo de transição, no qual as taxas de transição são estáticas através do tempo, sendo limitado para simular a dinâmica de fenômenos ambientais, a não ser por curto intervalo de tempo (SOARES-FILHO et al., 2007).

Os modelos estocásticos consideram um conjunto de variáveis aleatórias ordenadas (SOARES, 1992). Um processo estocástico é estacionário se a distribuição conjunta das variáveis aleatórias no processo permanece a mesma a despeito do tempo, isto é, se os mecanismos aleatórios que produzem o processo são invariantes no tempo (SOARES, 1992).

Algumas vezes, pretende-se rodar o modelo simulado com maior resolução temporal, por exemplo, em passos anuais. Seguindo a propriedade da matriz ergódica¹, a matriz do período pode ser decomposta em passos anuais, conforme a eq.(8), a qual converte para uma distribuição estacionária (SOARES-FILHO et al., 2007).

$$P = HV^{1/t} H^{-1} \quad (8)$$

Em que:

P é a matriz de transição global, H e V são seus autovetores e autovalores, e t é o número de passos de tempo.

¹ A matriz ergódica pode ser decomposta em autovalores e autovetores para uma matriz de múltiplos passos quando apresenta um número finito de estados (SOARES-FILHO et al., 2007). Além do número finito de estados, sua dinâmica deve ser aperiódica (ou seja, não há ciclos ou recorrência) e não conter estados absorventes (que se transformam em outros estados).

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

A seleção de variáveis explicativas determina as relações de influência com a variável dependente, definindo as células com maior ou menor probabilidade de transição de cobertura da terra. As variáveis explicativas utilizadas na modelagem podem ser discriminadas em variáveis proximais e causais. As variáveis proximais explicam as influências regionais na configuração espacial dos padrões de mudanças, como, por exemplo, distâncias às estradas e às cidades, e consequentemente, a análise de seu efeito resulta no mapa de favorabilidade ou probabilidade de mudança.

No estudo sobre a modelagem urbana em Sidney, Austrália, Liu (2009) investigou como a rede de transportes evoluiu no período entre 1976 e 1994, permitindo acompanhar o desenvolvimento e crescimento urbano com mudanças na configuração da cidade em consequência da implantação de importantes rodovias. Pinto (2008) ressalta que diversos estudos, com abordagem sobre modelagem espacial, utilizam parâmetros como distância aos sistemas viários, às ferrovias e aos centros urbanos. Da mesma maneira, Soares-Filho et al. (2004) abordaram, no modelo de simulação da Amazônia, a elaboração de cenários futuros com foco no processo de desmatamento, considerando, por exemplo, a distância às áreas protegidas, às estradas pavimentadas e aos projetos de pavimentação na região. Os autores encontraram em seus modelos que a proximidade às estradas pavimentadas é um componente direcionador do aumento das taxas de desmatamento na Amazônia.

Teixeira et al. (2009) verificaram a influência de variáveis proximais, tais como distância à rede hidrográfica, às estradas principais e secundárias, aos núcleos urbanos e aos diferentes tipos de uso e cobertura da terra, nos processos de regeneração florestal e desmatamento no Planalto Caucaia do Alto, município de Ibiúna, SP. A influência dessas variáveis na dinâmica do desmatamento e regeneração florestal apresentaram padrões consistentes, como taxas mais elevada de regeneração próximo aos rios, das encostas íngremes e distante das estradas de terra.

Já as variáveis causais explicam as forças subjacentes ou motivadoras das mudanças, sendo muitas vezes consideradas como variáveis de contorno ou

exógenas ao modelo espacial, a exemplo de modelos climáticos, demográficos, econômicos e político-econômicos e seus efeitos na dinâmica do sistema estudado (SOARES-FILHO et al., 2007).

Pesos de evidência é um método bayesiano baseado na teoria da probabilidade condicional e utilizado para cálculo da probabilidade de mudança (GOODACRE et al., 1993; BONHAM-CARTER, 1994), representando a influência de cada categoria (ou faixa de valores) de certa variável espacial na probabilidade espacial de uma dada transição $i \rightarrow j$ para cada célula (SOARES-FILHO et al., 2007).

Para esse fim, é utilizada uma equação que converte a formula de *logit*² para uma fórmula de probabilidade condicional comum, conforme eq.(9) e eq. (10) (NOVAES, 2010):

$$P(T_i^\alpha / V_i^1, \dots, V_i^{m_\alpha}) = O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} W_{i,v}^+} / 1 + O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} W_{i,v}^+} \quad (9)$$

$$W^+ = \log_e \frac{P\{V_i/T\}}{P\{V_i/\bar{T}\}} \quad (10)$$

Em que:

P corresponde à probabilidade de transição T de uso ou cobertura da terra; i corresponde a uma notação de posicionamento das células da área de estudo, definido em termos de coordenadas x,y ; α representa um tipo de transição de uso ou cobertura da terra, p. ex., de uma classe c para uma classe k ; V_i^1 corresponde à primeira variável observada na célula i , utilizada para explicar a transição α ; $V_i^{m_\alpha}$ corresponde à m -ésima variável observada na célula i , utilizada para explicar a transição α ; $O(T_i^\alpha)$ representa o *odds* da transição T^α na i -ésima célula, expresso pela razão entre a probabilidade de ocorrência de T_i^α e a probabilidade complementar, isto é, $P(T_i^\alpha) / P(\bar{T}_i^\alpha)$; e, $W_{i,v}^+$ corresponde ao peso positivo de evidência para a i -ésima célula referente à v -ésima variável.

² O *logit* corresponde ao logaritmo natural da chance ou *odds*, que consiste na razão entre a probabilidade de transição da cobertura ou uso ocorrer e a probabilidade complementar de não ocorrer (Novaes, 2010).

O método de pesos de evidência opera apenas com dados categóricos, sendo necessário categorizar os mapas de variáveis contínuas (como dados quantitativos, mapas de distância, altitude, declividade) estabelecendo faixas ou intervalos de acordo com a estrutura dos dados. Soares-Filho; Rodrigues e Costa (2009) descrevem essa metodologia de categorização dos dados, definido pelo usuário para gerar faixas relativamente constantes de valores. Como resultado, os intervalos são utilizados para o cálculo dos pesos de evidência.

O efeito de cada variável pode ser calculado independentemente de uma solução conjunta, tendo como premissa apenas que as variáveis de entrada sejam espacialmente independentes, o que pode ser testado por diversos métodos, como coeficiente de Cramer (V) (BONHAM-CARTER, 1994) ou teste da “Incerteza de Informação Conjunta” (*Joint Information Uncertainty* – JIU) (BONHAM-CARTER, 1994; ALMEIDA et al., 2005a). Segundo Almeida (2007), o JIU trabalha com valores relativos de áreas de sobreposição, tende a ser mais robusto que o Índice de Cramer, evitando a tendenciosidade representada por valores absolutos de áreas.

O segundo componente da função de mudança irá operar sobre os mapas de probabilidade de transição, buscando alocar as quantidades das mudanças, através do ordenamento e sorteio das células mais prováveis (SOARES-FILHO et al., 2007). A função de alocação dessas mudanças envolve algoritmos de interação celular entre ela e suas células vizinhas, baseado no conceito dos autômatos celulares. Duas funções responsáveis pela alocação de mudanças de cobertura da terra foram implementadas por Soares Filho et al. (2002) na plataforma de modelagem do *software* Dinamica EGO (Ambiente de Objetos Geoprocessáveis - *Environment for Geoprocessing Objects*), a função expansora (*expander*) e a função formadora de manchas (*patcher*).

A função *expander* dedica-se unicamente à expansão ou contração de manchas de uma determinada classe, já a função *patcher* é responsável por formar novas manchas. Ambas utilizam um mecanismo que opera sobre o mapa de probabilidade de transição e tem como parâmetros de entrada a isometria, a variância e o tamanho médio das manchas. Existe um módulo de difusão que leva o processo de transição $i \rightarrow j$ a migrar para novas áreas, em função de uma saturação assintótica de células j dentro de uma vizinhança especificada (SOARES-FILHO et al., 2007).

Por fim, para a avaliação de um modelo espacial, é necessário comparar o mapa simulado com o mapa referência por meio de técnicas que permitam verificar e quantificar os padrões de semelhança entre ambos. Uma maneira é considerar o contexto de vizinhança da célula, pois os mapas que não apresentam semelhança exata célula a célula podem possuir padrões similares e, ao mesmo tempo, concordância espacial em suas proximidades (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009). Métodos de comparação baseado em proximidade têm sido desenvolvidos, a exemplo de Costanza (1989), que introduziu o procedimento de ajuste de resoluções múltiplas para comparar o ajuste de um mapa em tamanhos crescentes de janelas (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009).

Por sua vez, Hagen (2003) desenvolveu o método de similaridade *fuzzy*, ou *fuzziness of location* (dubiedade de localização), o qual leva em consideração a incerteza da localização de uma categoria ou classe com a vizinhança de uma célula. Esse método está implementado na plataforma de modelagem do *software* Dinamica EGO, utilizado nesta pesquisa, operando com os mapas diferença, resultantes, por um lado, da subtração entre o mapa real final e o mapa inicial, e por outro lado, da subtração entre o mapa simulado final e o mapa inicial. Nesse método, a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor escala, pelas células de sua vizinhança, em janelas de tamanhos que variam de 1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11 *pixels*. De acordo com o deslocamento da janela é realizada a comparação entre o mapa simulado e os mapas da paisagem inicial e final. Esse método emprega uma função de decaimento com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema ilustrativo do método de Hagen com decaimento exponencial.

Fonte: Soares-Filho; Rodrigues; Costa (2009).

Em uma função do decaimento constante, se o número alusivo a uma mudança for encontrado dentro da janela, o ajuste terá valor 1, sendo um modo de avaliar o ajuste do modelo através de uma resolução espacial decrescente (HAGEN, (2003; SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009).

Hagen (2003) descreve a metodologia, em que o vetor de vizinhança “fuzzy neighborhood” representa a dubiedade de localização e, através deste método, um

vetor exato é associado a cada célula no mapa assumindo o valor 1 para a categoria $= i$, e 0 para categorias diferentes de i , no caso de decaimento constante. Todavia, pode-se utilizar o método com decaimento exponencial, no qual categorias $= i$ que estejam em posições distantes do centro da janela, porém dentro dela, recebem valores correspondentes a $2^{-d/2}$. A distância d é dada em unidade de célula, o que representa a distância de centróide a centróide, $d = 1$, e, na diagonal, $d = \sqrt{2}$. O vetor *fuzzy neighborhood* para cada célula é dado na eq. (11) e eq. (12).

(11)

$$V = nbhood = \begin{bmatrix} \mu nbhood 1 \\ \mu nbhood 2 \\ \vdots \\ \mu nbhood c \end{bmatrix}$$

$$\mu nbhood = |\mu crisp(i, 1) * m_1, \mu crisp(i, 2) * m_2, \dots, \mu crisp(i, n) * m_n| \quad (12)$$

Em que: $\mu nbhood i$ representa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de N células (normalmente $N=2$); $\mu crisp ij$ é a pertinência da categoria i para a célula vizinha j , assumindo-se no vetor *crisp* 1 para i , e 0 para categorias diferentes de i ($i \in C$); m_j é a pertinência baseada em distância da célula vizinha j , em que m refere-se a uma função de decaimento da distância, que pode ser constante ou exponencial.

2.3.1 Autômatos celulares

Os modelos dinâmicos consistem em analisar e reproduzir, em ambiente computacional, os padrões espaciais resultantes das alterações da paisagem. Nessa classe, os modelos de simulação espacialmente explícitos podem estar baseados no modelo dos autômatos celulares (*cellular automata* - CA) (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002).

Essa abordagem compreende um arranjo de células regulares com n -dimensão, no qual o estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com um arranjo específico de certa vizinhança, sendo todas as células atualizadas simultaneamente a passos de tempo discretos (SOARES-FILHO et al., 2007).

Há duas obras que se destacam na história do CA: a discussão sobre a teoria do Jogo da Vida de John Conway, em 1970, e os ensaios de Stephen Wolfram na década de 1980.

Conway aplicou a simulação da “vida” de uma célula em um arranjo regular em duas dimensões e oito células vizinhas. O Jogo da Vida consiste na célula sobreviver, morrer ou nascer de acordo com a aplicação de regras que consideram o estado de suas células vizinhas. Usando essas regras simples, o modelo é capaz de gerar uma complexa estrutura considerando sucessivas gerações (LIU, 2009).

O matemático Stephen Wolfram fez uma extensa pesquisa sobre CA para explorar como suas diferentes configurações podem evoluir a partir de simples conjuntos de parâmetros e regras. Segundo o autor (1983 p.5):

“autômatos celulares (CA) são abstrações matemáticas de sistemas físicos em que o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem valores também discretos. Um autômato celular é baseado em uma grade regular de células uniforme, geralmente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada localidade (célula). O estado de um autômato celular está completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula. Um autômato celular evolui em intervalos de tempo discretos, com o valor da variável em uma célula sendo afetado pelos valores das variáveis nas células vizinhas encontrados no passo de tempo anterior. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências imediatas. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente (‘sincronicamente’), baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto pré-definido de ‘regras locais’”.

Segundo Singh (2003), um modelo de autômato celular convencional é composto por cinco elementos:

1. Um espaço celular composto por células individuais, que, quando em formato quadrangular pode representar um espaço similar a um *raster*.

2. Um conjunto discreto de estados: o estado de cada célula pode representar qualquer variável espacial, como, por exemplo, diversos tipos de cobertura da terra.
3. Intervalos constantes e regulares de tempo, isto é, não fracionado, sendo que, em cada passo, o estado das células é atualizado simultaneamente baseado nas regras de transição.
4. Regras de transição universais, isto é, aplicáveis em todo o sistema de CA, e de ação local, fundamentais na evolução dinâmica do CA. Estas regras de transição normalmente especificam o estado da célula antes e depois da atualização baseada na condição das células vizinhas.
5. Uma vizinhança de células estacionária de tamanho e forma definida, sendo inalterável ao longo de toda a execução do CA. Um CA com apenas uma dimensão, cada célula possui dois vizinhos. Quando passa a ter duas dimensões, existem duas maneiras de definir sua vizinhança, como a vizinhança de Von Neumann com quatro células vizinhas (a), e a vizinhança de Moore, representada com oito células (b), como exemplificado na Figura 3.

Figura 3 - Representações das células vizinhas (cinza) para duas dimensões.

Fonte: Singh (2003).

As regras de transição são o corpo central do funcionamento dos autômatos celulares. Para exemplificar sua aplicação nos estudos de modelagem do desenvolvimento urbano, Liu (2009) considera uma cidade hipotética construída em um espaço celular de grade regular em duas dimensões. Cada célula pode assumir apenas dois estados: urbano ou não-urbano.

Dessa maneira, as regras de transição determinam como as células transitam de um estado para outro, expressas em: “SE - ENTÃO”. Nessa hipótese, assumem-se condições ambientais, sociais e econômicas uniformes em toda região. A partir de poucas células urbanizadas em um tempo inicial (exemplo $t=0$), as forças que

direcionarão o desenvolvimento das células urbanas serão o número de células urbanas na vizinhança da célula em questão. Usando a vizinhança de Moore, a transição do estado da célula é governada pela seguinte regra (1): “SE” há três ou mais células desenvolvidas urbanas na vizinhança de Moore de uma célula não-urbana em questão, “ENTÃO” a célula não-urbana irá desenvolver-se em urbana, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Aplicação de um autômato celular na geração de células urbanas.

Fonte: Liu (2009).

Com essa regra de transição, o modelo gera uma série de cenários de desenvolvimento urbano em períodos de tempo t .

Entretanto, em uma situação real, as condições geográficas em uma área podem não ser uniformes. Por exemplo, diferenças na altitude podem reduzir os custos na construção e operação de uma estação de tratamento de água, e o desenvolvimento urbano pode restringir-se em áreas abaixo de 300 m de altitude. Nessa situação, novas regras necessitam ser implementadas no modelo para refletir essa situação.

Assim, uma segunda regra (2) pode ser aplicada: “SE” a altitude do planalto estiver acima de 300 m, “ENTÃO” a célula irá permanecer como não-urbana. Com a aplicação de ambas as regras 1 e 2, os cenários de desenvolvimento urbano nessa área seguirão os intervalos de tempo t , como na Figura 5.

Figura 5 - Desenvolvimento urbano simulado com a incorporação de uma regra de transição considerando a altitude.

Fonte: Liu (2009).

Além disso, o desenvolvimento urbano pode sofrer variações com relação à influência da rede de transportes na região, por exemplo, ao longo de uma rodovia.

Liu (2009) exemplifica a seguinte situação com a aplicação de uma nova regra de transição (3) para refletir a influência da rede viária no desenvolvimento urbano: “SE” há uma ou mais células urbanas na vizinhança de Moore de uma célula não-urbana e o desenvolvimento urbano restringir-se em áreas com altitude abaixo de 300 m “E” há uma rodovia sobre esta célula, “ENTÃO” a célula não-urbana irá transicionar para o estado urbano, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Simulação do desenvolvimento urbano em função do sistema viário.

Fonte: Liu (2009).

A habilidade dos CA em representar sistemas complexos com comportamentos espaço-temporais a partir de um conjunto de regras tem se mostrado uma interessante técnica para geógrafos e profissionais de outras áreas do conhecimento, e o CA tem sido utilizado para modelar uma vasta gama de fenômenos, de incêndios florestais a epidemias, simulações de tráfego regional e urbanização, integração de modelos socioeconômicos e de sistemas naturais (PINTO; ANTUNES, 2007).

Para modelar os processos dinâmicos com alguma realidade, as suposições rígidas dos modelos CA podem apresentar flexibilidade em um ou mais de seus componente. Albin (1975) propôs flexibilizações conceituais para aplicação do CA em cenários urbanos, denominando-os em modelos de espaço celular. Essas flexibilizações foram sistematizadas por Couclelis (1997), como exemplificado na Figura 7. Dessa forma:

1. O espaço não mais necessita ser homogêneo em termos de suas propriedades e estrutura. O espaço pode ser distribuído em partes iguais, ou irregularmente de forma diferenciada, tais como os polígonos censitários. Além disso, o espaço pode assumir estados contínuos e

não somente discretos, isto é, mais de um estado por célula, de característica fracionária.

2. A vizinhança como relações não estacionárias. As vizinhanças, geralmente concebidas como tendo a mesma configuração para todo o ponto no espaço, podem ser representadas com diferentes configurações em diferentes pontos no espaço.
3. As regras ou funções de transição não necessitam ser universais e permitir que mais de uma função de transição possa ser aplicada.
4. O tempo possa ser representado em intervalos variáveis (meses, anos); e as condições do sistema pode suportar a inclusão de variáveis exógenas, que são aquelas extrínsecas ao sistema e que podem provocar mudanças bruscas e/ou imprevisíveis no mesmo.

Figura 7 - Generalizações comuns dos autômatos celulares (CA).

Espaço	Estrutura	regularidade	irregularidade
	Propriedades	uniformidade	não-uniformidade
Vizinhança		estacionariedade	não-estacionariedade
Função de transição		universalidade	não-universalidade
Tempo		regularidade	não-regularidade
Condições do sistema		fechado	aberto

Fonte: Almeida (2004), adaptado de Couclelis (1997).

Assim, os efeitos de decaimento com a distância poderiam integrar as vizinhanças de CA, regras de transição poderiam ser probabilísticas ao invés de determinísticas, e as variáveis do tempo podem ser usadas em ajuste a certos calendários (Almeida, 2004).

2.3.2 Dinamica EGO

O *software* Dinamica EGO, utilizado nesta pesquisa, é uma ferramenta livre desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais. Consiste em uma plataforma computacional escrita em linguagem C++ orientada a objeto e compatível com o sistema Windows 32 bits e 64 bits, permitindo a construção de modelos de simulação baseados em autômatos celulares com o emprego de funções de transição concebidas para reproduzir as dimensões e as formas das alterações da paisagem (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002). Esse *software* tem sido usado para modelar fenômenos como desmatamentos, dinâmicas intraurbanas, avaliação de propostas de zoneamento ecológico-econômico e de regeneração florestal (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002; ALMEIDA et al., 2003; ALMEIDA, 2004; ALMEIDA, et al., 2005b; TEIXEIRA et al., 2009; INOUE, 2012).

O Dinamica EGO é concebido por uma sequência de algoritmos designados, como demonstra a Figura 8.

Seus dados de entrada são compostos por mapas da paisagem, como os mapas de cobertura da terra, além de empregar variáveis espaciais estáticas e dinâmicas.

As variáveis estáticas são aquelas que não se alteram durante a iteração do modelo, por exemplo, nos mapas das áreas protegidas, mapas pedológicos, mapas de declividade etc. Esse conjunto estático pode ser combinado, através da definição de seus pesos de evidência, para gerar mapas de probabilidades de transição. (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009).

Além dos dados estáticos, o Dinamica EGO pode incorporar camadas dinâmicas na simulação, denominadas variáveis dinâmicas, por serem recalculadas em cada iteração do modelo e são continuamente atualizadas de modo a influenciar o cálculo das probabilidades de transição (SOARES-FILHO, RODRIGUES; COSTA, 2009).

Figura 8 - Esquema descritivo do funcionamento do *software* Dinamica EGO.

Fonte: SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN (2002). Adaptado por Renata Sayuri Kawashima, 2014.

Assim, de acordo com SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN (2002), O Dinamica EGO opera em fases e incluem os seguintes parâmetros:

- 1- Número determinado de passos de tempo;
- 2- A matriz de transição ou a quantificação de transição das células em um intervalo de tempo;
- 3- Probabilidade de transição das células através dos valores de pesos de evidência;
- 4- O tamanho e a variância de manchas para cada transição;
- 5- Proporção dos algoritmos de alocação das mudanças, função "expander" e função "patcher" para cada transição;

Cada fase apresenta parâmetros fixos e consequentemente, o modelo pode rodar em múltiplas fases, cada qual consistindo em vários passos de tempo.

3 ÁREA DE ESTUDO

A Baixada Santista está localizada na região central do litoral do estado de São Paulo, e a área de estudo enfoca os municípios de Santos, São Vicente, Praia Grande, Cubatão e Guarujá (Figura 9). Esses municípios pertencem à Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), juntamente com outros quatro: Bertioga, Peruíbe, Mongaguá e Itanhaém.

A RMBS foi criada pela Lei Complementar nº 815/ 1996 (SÃO PAULO, 1996) e, apesar de contar com arcabouço institucional e legal implementado, carecem de soluções de caráter metropolitano em diversas questões sobre planejamento, infraestrutura geral, transportes, meio ambiente, entre outros, que, por necessitar da intervenção do poder público em suas várias esferas, acabam por se caracterizar como funções de interesse comum da administração pública (ZÜNDT, 2006).

Trata-se de uma região com uma complexa relação ambiental, populacional e de atividades econômicas, que reúne vocações aparentemente díspares, como o complexo portuário e industrial de grande porte e a vocação turística, que se mesclam às reservas ambientais e áreas de proteção legal (ZÜNDT, 2006).

Com relação aos fatores climáticos, a temperatura e a pluviosidade variam em função do microclima, relacionado à densidade da urbanização e ao relevo. Nas áreas baixas, mais urbanizadas, as temperaturas são maiores (em média, de 22°C) e os índices pluviométricos menores (aproximadamente 1.500mm anuais) (SILVA, 2010). Nas áreas serranas o inverso ocorre com menores temperaturas (em média, 18°C no topo da serra) e maior pluviometria (4.000 mm anuais) (SILVA, 2010).

Figura 9 - Localização da área de estudo na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS).

Fonte: Elaboração do autor (2014).

Em referência à área territorial do Porto de Santos, este ocupa parte dos municípios de Cubatão, Santos e Guarujá, estendendo-se ao longo do estuário e limitado pelas Ilhas de São Vicente e Santo Amaro. O sistema de infraestrutura de transportes é multimodal e permite a interligação do maior porto da América Latina com o interior do país, pois sua área de influência compreende, além da Baixada Santista, o estado de São Paulo, grande parte do estado do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Paraná, além dos países do Mercosul, interligados pelas rodovias e ferrovias (SÃO PAULO, 2011).

Quanto ao sistema rodoviário, a RMBS é servida pelo complexo Anchieta-Imigrante (SP-150 e SP-160, respectivamente), ligando-se com a capital paulista, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e o interior do estado. Também faz conexão com as rodovias Manoel Hypólito do Rego ou Prestes Maia (Rio-Santos/BR-101), ligação com o litoral norte e o litoral sul pelas rodovias Cônego Domênico Rangoni e Padre Manoel da Nóbrega (SP-055). No modo ferroviário, sua infraestrutura envolve a utilização direta das malhas da antiga Rede Ferroviária Federal S.A.(RFFSA), atualmente concessionada à empresa MRS Logística S.A., e da antiga Ferrovia Paulista S.A.(FEPASA), concessionada à empresa Ferrovia Bandeirantes (FERROBAN) (SÃO PAULO, 2011).

A descoberta de petróleo no pré-sal da Bacia de Santos tem estimulado a expansão e desenvolvimento da região, além do crescimento da produção industrial ligada ao ramo da petroquímica e siderúrgica em Cubatão. Ademais, vem ocorrendo o incremento das vias de acesso, tais como a conclusão da segunda pista da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), possibilitando maior atração populacional, em função da facilidade de deslocamento e desenvolvimento socioeconômico (SÃO PAULO, 2011).

Para compreender a influência do Porto de Santos na dinâmica territorial da Baixada Santista, será apresentado um breve histórico e seus principais planos de desenvolvimento e zoneamento.

3.1 HISTÓRICO E PLANOS DE DESENVOLVIMENTO DO PORTO DE SANTOS

De acordo com Scazufca (2012), o histórico do Porto de Santos pode ser definido em três períodos sucessivos: o primeiro período entre 1867 e 1945; o segundo, entre 1945 e 1993; e o terceiro de 1993 até a atualidade (Figura 11).

Figura 11 - Linha cronológica da legislação ambiental de portos e histórico do Porto de Santos.

O primeiro período, denominado de Porto do Café, coincide com as três últimas décadas do século XIX e primeiras décadas do século XX, marcado pela inauguração da estrada de ferro São Paulo Railway em 1867, a qual posteriormente foi integrada com outras companhias ferroviárias que se expandiram para o interior paulista e estados vizinhos, apresentando nessa época, o principal meio de transporte do café brasileiro (1901) (SCAZUFCA, 2012).

Durante essa época, foi instituída a Companhia Docas de Santos (CDS), em 1892, dando início ao primeiro plano de expansão do porto, o Plano de 1897, com a ampliação das instalações portuárias até a região de Outeirinhos (Figura 12) (CODESP, 2006).

Em 1926 inaugurou-se a primeira estrada de concreto da América do Sul, ou seja, os oito quilômetros na Serra do Mar, anteriormente demarcada sobre pedregulhos (LUNA; COSTA, 1979).

Figura 12 - Plano de 1897, ampliação das instalações portuárias na região de Outeirinhos.

Fonte: CODESP (2006). Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/pdzps>. Acesso em: 02/11/2013.

Finalizado o aterramento e as obras em Outeirinhos, o Plano de 1929 deu início à construção do primeiro terminal de granéis líquidos do país, na Ilha Barnabé, localizado na margem esquerda do estuário (Figura 13).

Figura 13 - Plano de 1929, início da construção do primeiro terminal de granéis líquidos na Ilha Barnabé.

Fonte: CODESP (2006). Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/pdzps>. Acesso em: 02/11/2013.

A partir dos anos trinta, o desenvolvimento industrial de São Paulo passou a condicionar várias e sucessivas remodelações da rota São Paulo-Santos, para ajustá-la ao seu relevante papel de canal para o relacionamento da economia paulista, em rápido crescimento, com o exterior (LUNA; COSTA, 1979).

Assim, o segundo período, denominado Porto Industrial (entre 1945 e 1993), foi impulsionado pela construção da primeira pista da Rodovia Anchieta (1939-1947), complementada em 1953, pela segunda pista da serra (LUNA; COSTA, 1979).

Esse estágio possui características de um porto mais complexo, ainda como exportador de café, mas com movimentação de múltiplas mercadorias, com destaque para granéis líquidos de importação derivados do petróleo e de matérias primas para a indústria base e manufatureira. A região apresentou uma urbanização ligada ao desenvolvimento da cidade de São Paulo e do interior, com o incremento de atividades portuárias e comerciais ligadas à cultura cafeeira. Posteriormente, o parque industrial paulista foi complementado com o complexo petroquímico e siderúrgico de Cubatão (AFONSO, 2005).

A partir da década de 1950, um intenso processo de parcelamento do solo, associado à expansão da rede rodoviária estadual, a planície litorânea urbanizou-se, transformando restingas em um contínuo urbano linear que se estendeu interrompido por obstáculos geográficos como morros e manguezais (AFONSO, 2005).

O Plano de 1951 objetivou expandir as instalações portuárias em direção ao Saboó, para armazenamento de cargas próximas da linha férrea e interligando-o com a Ilha Barnabé, através de oleodutos submersos com a implantação do terminal da Alemoa, alavancando a fase do petróleo (Figura 14) (CODESP, 2006).

Figura 14 - Plano de 1951, expansão das instalações portuárias em direção ao Saboó.

Fonte: CODESP (2006). Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/pdzps>. Acesso em: 02/11/2013.

O Plano de 1969 seguiu marcado pela construção das refinarias Presidente Bernardes, em Cubatão, e União, em Capuava, responsáveis por grande quantidade de granéis líquidos, e determinou a duplicação das movimentações de carga pelo porto, cerca de 16,5 milhões de toneladas em 1968 (CODESP, 2006). Nessa época, teve início a construção do cais do Macuco à Ponta da Praia, com o esgotamento das áreas para implantação de novos cais na margem direita do estuário (CODESP, 2006) (Figura 15).

Figura 15 - Em 1968, início da construção do cais do Macuco na Ponta da Praia.

Fonte: CODESP (2006). Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/pdzps>. Acesso em: 02/11/2013.

A consolidação do modelo portuário e os planos de expansão pela CDS propuseram uma linha de acostagem ao longo de quase todo o interior do estuário em sua margem direita, emoldurando a cidade e partes desabitadas da Ilha de São Vicente (SCAZUFCA, 2012). Diante da proximidade de escassez de áreas para expansão portuária, seguiram-se ocupações para a margem esquerda, incluindo a Ilha de Santo Amaro e a região de Guarujá, parte continental de Santos, incluindo áreas ocupadas por manguezais. Esta proposta de ocupação da margem esquerda veio a se concretizar, principalmente com a containerização e a abertura de acessos terrestres (SCAZUFCA, 2012).

O Plano de 1976 ressalta a ocupação sendo realizada na margem esquerda, com a implantação do terminal de contêineres em Conceiçãozinha (Figura 16), apresentando grande movimentação de produtos variados ao longo do cais e as chamadas descargas diretas para caminhão e vagão (CODESP, 2006).

Figura 16 - Plano de 1976, implantação do terminal de contêineres em Conceiçãozinha.

Fonte: CODESP (2006). Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/pdzps>. Acesso em: 02/11/2013.

Nesse mesmo período, ocorreu a estatização da FEPASA (1971), construção da Rodovia Rio-Santos (1974) e da Rodovia dos Imigrantes (1976). A rede viária altera a composição modal ao acesso terrestre ao porto, especialmente da carga geral, com maior eficiência no transporte realizado pelos veículos, constituindo-se

assim, a rede viária em um importante viabilizador do porto de contêineres contemporâneo (SCAZUFCA, 2012).

Em referência ao Plano de 1983, houve o encerramento da concessão à CDS e criada a Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP), sob administração do governo federal (CODESP, 2006). A oportunidade constituía em envolver as atividades portuárias com as industriais e, dessa forma, criou-se o Sistema Portuário Industrial de Cubatão, com expansão do porto nessa direção, possibilitando a integração porto-indústria (CODESP, 2006). Essa integração foi mantida ainda no Plano de 1988, o qual continha a previsão de um terminal rodoviário para regularização dos fluxos de caminhões (CODESP, 2009).

A nova gestão foi primeiramente realizada sob tutela da Empresa de Portos do Brasil S. A. (PORTOBRAS), criada em 1975 e extinta em 1990, enquanto a CODESP se consolidava (SCAZUFCA, 2012). Esse período de transição foi marcado por estagnação na manutenção e planejamento do desenvolvimento portuário de difícil execução, pois realizava a operação da maioria das cargas diretamente e administrava operadoras concessionadas simultaneamente (SCAZUFCA, 2012).

A terceira fase coincide com a lei de modernização dos portos, Lei nº 8.630/1993 (BRASIL, 1993), que somada com a crescente containerização do transporte e a nova logística portuária, caracterizam o Porto Flexível, ou Contemporâneo, presente até a atualidade (SCAZUFCA, 2012). De acordo com Scazufca (2012), neste período de flexibilização da produção, encontra-se a busca por novos projetos de terminais portuários, principalmente para abrigar a crescente containerização do porto, sendo que as áreas necessárias para este tipo de transporte tendem a dobrar no médio e longo prazo, gerando pressões sobre o território local.

Segundo o mesmo autor, além do polo industrial de Cubatão, verifica-se a existência de instalações isoladas de áreas retroportuárias em todos os municípios que margeiam as vias de circulação rodoferroviário, os quais estruturam os transportes da Baixada Santista. Além disso, constata-se a presença do novo vetor econômico de exploração de petróleo e gás da Bacia de Santos que já demanda o planejamento de novas instalações portuárias, especialmente estaleiros, bases de apoio logístico e instalações retroportuárias próprias (logística e produção industrial).

Em 1997, a CODESP elaborou o Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ) de caráter provisório para embasar o programa de arrendamentos de áreas iniciado (CODESP, 2009). Em 2006, foi elaborado o PDZ e alguns projetos de expansão, novamente retomados na revisão deste, com o Plano de Desenvolvimento e Expansão do Porto de Santos (PDEPS) de 2009, retratando o horizonte de investimentos para o cenário de 2024.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COMPOSIÇÃO DA BASE DE DADOS

A composição da base de dados consistiu em mapas temáticos de cobertura da terra e os dados referentes às variáveis explicativas para compor a modelagem, tais como as bases vetoriais utilizadas para gerar as variáveis de distância e as variáveis categóricas, bem como as variáveis matriciais da altitude e declividade (Tabela 5).

Com relação aos mapas temáticos, estes foram gerados pela classificação supervisionada das imagens orbitais do satélite LANDSAT TM. Estes dados são do tipo matricial e com a mesma resolução espacial de seu satélite de origem (30m x 30 m).

A base de dados foi construída no *software* SPRING 5.2.3, e os projetos foram definidos no sistema de projeção UTM, Fuso 23, Zona K e *datum* SAD 69. Todos os dados utilizados na pesquisa estão apresentados na Tabela 5, com seus respectivos sistema de projeção, *datum*, fonte de origem e representação.

Para realizar a conversão de *datum*, foram utilizados os *softwares* ArcGis 10.1 (ESRI) e Global Mapper 11. Este último também foi usado para conversão das imagens em geotiff para leitura no *software* IDRISI 3.2 (EASTMAN et al., 1997). Foram utilizados em sequência os *softwares* ENVI 4.2 para aplicar o algoritmo ISODATA na classificação não-supervisionada, SPRING 5.2.3 (CÂMARA et al., 1996) para classificação supervisionada das imagens, registro e construção das distâncias das variáveis explicativas, IDRISI 3.2 e ERMapper 7.1 para conversão dos dados, e o *software* Dinamica EGO versão 2.4 (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009) para construção da modelagem, e versão 2.2 para visualização dos gráficos dos pesos de evidência.

Tabela 5 - Base de dados originais utilizados na pesquisa.

Base de Dados	Sistema de Projeção	Datum	Fonte	Representação
Altitude	Lat/Long	WGS 84	VALERIANO (2004)	Matricial
Unidades de conservação	Lat/Long	SAD 69	MMA (2012) e SÃO PAULO (2006)	Vetorial
Declividade	Lat/Long	WGS 84	VALERIANO (2004)	Matricial
Ferrovias	Lat/Long	SAD 69	DER (2001)	Vetorial
Hidrografia	Lat/Long	SAD 69	DER (2001)	Vetorial
Vias secundárias	UTM – Fuso 23 Zona K	SAD 69	IBGE (1985)	Vetorial
Poligonal	UTM - Fuso 23 Zona K	SAD 69	Vetorização em imagem (BRASIL, 2002)	Vetorial
Novos empreendimentos	UTM - Fuso 23 Zona K	SAD 69	Vetorização a partir de CODESP (2006, 2009)	
ZEE marinho	UTM - Fuso 23 Zona K	SAD 69	SÃO PAULO (2013)	Vetorial
ZEE terrestre	UTM - Fuso 23 Zona K	SAD 69	SÃO PAULO (2013)	Vetorial
Rodovias	Lat/Long	SAD 69	DER (2001)	Vetorial
Área industrial	UTM – Fuso 23 Zona K	SAD 69	Delimitação a partir da fotografia aérea de 1994, imagens de satélite 2010 e 2005, mapeamento CETESB (1991)	Vetorial
Área urbana	UTM – Fuso 23 Zona K	SAD 69	Delimitação a partir da fotografia aérea de 1994, imagens de satélite 2010 e 2005, mapeamento CETESB (1991)	Vetorial
Mapas classificados	UTM – Fuso 23 Zona K	SAD 69	Classificação automática a partir das imagens de satélite LANDSAT	Matricial

O levantamento de outras imagens da área de estudo foi utilizado para auxiliar o treinamento das amostras e avaliação da classificação das imagens. A Tabela 6 a seguir resume as imagens auxiliares utilizadas na pesquisa.

Tabela 6 - Imagens auxiliares utilizadas na pesquisa.

Imagens auxiliares	Fonte	Data de imageamento
Imagens do satélite SPOT	UNESP	28/05/2005
Fotografias aéreas	USP	1962, 1994
Imagens do satélite ALOS	Fundação Florestal	01/04/2008
Imagens do satélite QuickBird	USP	2010

Alguns estudos realizados na região fornecem informações sobre a configuração histórica dos manguezais. Esses estudos foram resumidos na Tabela 7, utilizados como fonte adicional de informações e suporte na avaliação das classificações das imagens.

Tabela 7- Mapeamentos realizados na área de estudo.

Estudos e Dados obtidos	Fonte	Ano da publicação	Imagem de referência
Folha Santos SF 23-Y-D-IV-3	IBGE	1985	1972
Ocupação atual e degradação dos ecossistemas da Baixada Santista	CETESB	1991	Fotografia aérea (1987) Fotografia aérea (1985 e 1989) Imagem de satélite LANDSAT TM (1989)
Carta do Meio Ambiente	CETESB	1985	1980
Manguezais do Brasil	HERZ	1991	1980
Manguezais da Baixada Santista - SP: alterações e permanências (1962-2009)	SANTOS	2009	Fotografia aérea (1962,1994, 2001)

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A seção a seguir descreve as etapas metodológicas para obtenção das imagens classificadas, preparação da base de dados e o processo da modelagem dinâmica espacial.

A seguir, é apresentado o fluxograma metodológico (Figura 17).

Figura 17 - Fluxograma metodológico.

4.2.1 Classificação das imagens orbitais

A seleção de imagens de satélite abrangeu um período de 25 anos, intercalado a cada 10 anos, para analisar as alterações tanto de possíveis novas vias de acesso ao Porto de Santos quanto de ocupações e transformações no espaço. Almeida (2004) ressalta a importância da definição dos períodos de simulação (tempo inicial e final) na construção da modelagem dinâmica, devendo ser suficiente para detectar os fenômenos de interesse, sem ser passível de decomposição em uma série de modelos estáticos para cada período de tempo. Isto justamente porque se o intervalo do período de tempo para simulação for excessivamente pequeno, aí sim o modelo, ao invés de ser genuinamente dinâmico, isto é, ter uma dimensão temporal explícita, apresentar entradas e saídas que variam ao longo do tempo e estados que dependem de estados anteriores, ele pode ser decomposto em uma série de modelos estáticos, que são aqueles que representam a estrutura de um sistema em um instante de tempo sem se preocupar

em explicar as mudanças na estrutura ao longo do tempo, que constituem o próprio comportamento do sistema. E por outro lado, não deve constituir em um período longo em que mudanças podem ocorrer sem serem notadas.

Esses períodos são muitas vezes determinados em função da existência de mapas de uso oficiais, mas poderiam ser definidos de acordo com circunstâncias homogêneas, tais como mandatos de governo com semelhantes plataformas, cenários macroeconômicos estáveis, etc (ALMEIDA, 2004).

Este procedimento de delimitação é funcional devido ao fato de que as variáveis forçantes determinando as mudanças de uso tendem a se alterar de tempos em tempos, como resultado de forças exógenas, a exemplo de contextos político-econômicos (ALMEIDA, 2004).

Para a definição dos períodos de simulação, buscaram-se marcos importantes do histórico do Porto de Santos e, para tentar garantir que cada período contemplasse anos com certa homogeneidade de circunstâncias, adotaram-se como critério as mudanças na legislação que configuraram grande impacto na operação desse Porto. De grande importância foi a promulgação da Lei nº 8.630/1993 (BRASIL, 1993), que dispõe sobre a concessão da operação e da administração portuária, sendo conhecida como Lei de Modernização dos Portos em função de algumas diretrizes nela dispostas. Levando-se em consideração que os efeitos de sua promulgação não são imediatos, foram definidos, basicamente, três períodos: um anterior à lei (entre 1985 e 1995), outro posterior, entre 1995 e 2005, e um período mais recente compreendendo os anos entre 2005 e 2013, coincidente com a promulgação da nova lei dos portos (BRASIL, 2013).

As imagens de satélite LANDSAT 5 TM foram obtidas por transferência de arquivos (FTP), via internet, através do catálogo de imagens da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para a análise temporal, foram consideradas as imagens de satélite disponíveis para a região, sem nuvens e entre os períodos de março a agosto.

As cenas do satélite LANDSAT disponíveis para o litoral do estado de São Paulo estão apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Cenas do satélite LANDSAT disponíveis para o litoral do estado de São Paulo.

Fonte: INPE (2014).

As cenas do satélite LANDSAT 8 TM foram adquiridas no site <http://earthexplorer.usgs.gov/> (Acessado em 10 Ago. 2013).

As cenas selecionadas para a área de estudo pertencem à órbita 219 e ponto 77, abrangendo a região estuarina de Santos e Cubatão. As datas das imagens são: 12/03/1985, 28/06/1995, 06/05/2005, do satélite LANDSAT 5 TM, e 12/05/2013 do satélite LANDSAT 8 TM. As bandas espectrais de ambos os satélites compreenderam o azul, verde, vermelho, e infravermelho próximo e médio.

A classificação das imagens de satélite visou à obtenção dos mapas temáticos dos tipos de cobertura da terra da região portuária da Baixada Santista. As descrições de suas classes basearam-se nas proposições do projeto CORINE, assim nomeadas:

1. Urbano: referente às superfícies artificiais, onde se localizam as áreas ocupadas por construções, incluindo indústrias e residências, áreas comerciais e estruturas viárias, como rodovias e ferrovias, instalações portuárias, áreas ocupadas por atividades de mineração e áreas construídas para recreação, como parques urbanos, entre outras áreas artificiais.

2. Floresta: compostas pelo conjunto de formações florestais de porte arbóreo, basicamente por espécies pertencentes da Floresta Ombrófila Densa e Restinga. Caracterizam-se por cobertura vegetal natural de áreas montanhosas e encostas da Serra do Mar.

3. Manguezal: ecossistema costeiro, de transição entre ambientes terrestres e marinhos, característicos de regiões tropicais e subtropicais, sujeito ao regime de marés (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995). Constituído principalmente por vegetação adaptada às oscilações de maré, tais como os gêneros *Rhizophora*, *Avicennia* e *Laguncularia*, ocupando terrenos lodosos, característico de regiões com baixa elevação, proximidade com a costa e formação ao redor dos canais (SPALDING; KAINUMA; COLLINS, 2010).

4. Campo: são associações de vegetação herbácea e/ ou arbustiva, compostas por vegetação rasteira, associadas com recolonização ou estágio de degradação das formações florestais. Também inseridas nessa classe estão as áreas ocupadas por culturas permanentes ou abandonadas.

5. Solo: são os espaços abertos com pouca ou nenhuma vegetação, característicos de praias, areias, afloramentos rochosos, áreas com a retirada da vegetação, áreas queimadas, incluindo os solos expostos e solos expostos úmidos.

6. Água: representada pelos rios, lagos ou lagoas, reservatórios, baías, estuários e canais.

A seguir, apresenta-se o fluxograma metodológico da classificação das imagens de satélite (Figura 19).

A correção atmosférica nas imagens originais não foi aplicada. De acordo com Jensen (2005) e Biro et al. (2013), comparações entre imagens pós-classificadas compensam as variações das condições atmosféricas e da fenologia da vegetação nas análises multitemporais.

Realizou-se a classificação não-supervisionada e supervisionada, aplicadas, inicialmente, na imagem do ano de 1995.

Figura 19 - Fluxograma dos processos de classificação de imagem.

Posteriormente, realizou-se a avaliação e comparação do resultado de ambos métodos, como demonstrado na Figura 20 abaixo.

A Figura 20, à esquerda em (a), ilustra a classificação não-supervisionada ISODATA com a confusão apresentada entre *pixels* de Manguezal e Campo em Floresta e a presença da classe Água em Floresta. Na Figura 20, à direita (b), verifica-se que na classificação supervisionada MaxVer, a discriminação entre as classes foi comparativamente melhor. Dessa forma, esse último método foi utilizado para realizar a classificação das imagens em outras datas.

Figura 20 - Comparação entre o resultado da classificação da imagem de 1995, em a) ISODATA e b) MaxVer.

Assim, o método supervisionado foi utilizado para aplicação em imagens de 1985, 2005 e 2013. Optou-se pela utilização inicial da imagem de 1995 pela disponibilidade da fotografia aérea georreferenciada do ano de 1994, a qual permitiu a avaliação do referido método.

Na classificação não-supervisionada, com a utilização do algoritmo ISODATA, foram definidos parâmetros, como o número de classes, iterações e limiar de mudança, permitindo o agrupamento dos *pixels* dentro do ambiente do *software* Envi 4.2. De acordo com Ohata e Quintanilha (2005), a classificação utilizando 50 classes apresentou melhor discriminação e detalhamento dos alvos na Região Metropolitana de São Paulo, permitindo que o *software* separasse melhor os diferentes alvos existentes na imagem.

Foram testados diferentes números de classes (10, 20, 30, 40 e 50), bem como de iterações (5, 8, 15). Por fim, a seleção compreendeu 40 classes e 5 iterações. O limiar de mudança foi estabelecido em 5%, percentual que limita a mudança dos *pixels* entre as classes durante as iterações. Posteriormente, realizou-se o reagrupamento dessas classes totais em apenas seis grupos, as classes utilizadas nesta pesquisa.

A classificação com o algoritmo supervisionado de máxima verossimilhança (MaxVer) abrangeu uma etapa de treinamento (coleta) das amostras representativas para cada classe. Definiu-se o limiar de aceitação, o qual indica a percentagem de *pixels* da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente a esta classe. Assim, um limite de aceitação de 99%, por exemplo, engloba 99% dos "*pixels*", sendo que 1% será ignorado (com menor probabilidade). A pós-classificação utilizou como peso o valor dois e limiar cinco, com o objetivo de

eliminar *pixels* isolados, classificados diferentemente de sua vizinhança, em uma janela de 3,0 x 3,0. De acordo com os valores de peso e limiar, definidos pelo usuário, seu ponto central terá ou não sua classe substituída pela classe de maior frequência na vizinhança.

O processo de georreferenciamento foi realizado com a importação das imagens LANDSAT e a base topográfica do IBGE (1985), escala 1:50.000, no *software* SPRING. O georreferenciamento foi realizado após o processo de classificação não-supervisionada da imagem. Contudo, na classificação supervisionada, essa etapa foi realizada anteriormente ao processo de coleta das amostras para que a obtenção dessas amostras contivesse localidade espacial para avaliação em imagens auxiliares.

O georreferenciamento foi alcançado com aproximadamente 19 pontos de controle distribuídos sobre as vias de fácil identificação, como cruzamentos entre vias. Utilizou-se o polinômio de primeiro grau e o erro posicional dos pontos de controle não ultrapassou o limiar de 0,7.

A reamostragem é etapa final do processo do georreferenciamento, utilizando a informação sobre níveis de cinza da imagem original para realizar a interpolação e definir os valores de nível de cinza que comporão a imagem corrigida. Um dos problemas da reamostragem está em compatibilizar a radiometria da imagem original para uma nova distribuição de *pixels*. Contudo, o interpolador do vizinho mais próximo atribui o valor do nível de cinza de determinado *pixel* da imagem reamostrada ao *pixel* da imagem original que estiver mais próximo. Trata-se então apenas de um arredondamento e, segundo Novo (2008), a reamostragem pelo vizinho mais próximo não altera os valores radiométricos da imagem original.

A avaliação das classificações seguiu a metodologia de Congalton (1991) com geração de 50 amostras de teste, ou de avaliação, para cada classe. Na classificação supervisionada, as amostras de treinamento foram exportadas em formato *shapefile* e sobrepostas com as de teste. Para não superestimar a precisão da avaliação, as amostras coincidentes foram desconsideradas na avaliação da classificação. Essa exclusão permitiu garantir que as amostras de teste fossem independentes das amostras de treinamento.

4.2.2 Ajuste dos mapas temáticos

Essa etapa consistiu no refinamento do resultado dos mapeamentos temáticos utilizados na modelagem da paisagem. Caetano; Santos e Gonçalves (2002) verificaram que diversos trabalhos com classificação digital de imagens do satélite LANDSAT baseiam-se em análise visual e seus resultados finais contam, muitas vezes, com uma fase de edição manual.

Foi utilizado o *software* ArcGis 10.1 para eliminar polígonos menores que o tamanho de uma célula, substituindo-os pelo valor da célula predominante ao seu redor. O procedimento de edição da imagem pós-classificação procura minimizar os erros de omissão e comissão (SHIMABUKURO et al., 2008). Para não quantificar classes erroneamente, no exemplo da Figura 21, as áreas de Manguezal com células errôneas de espaços urbanos foram corrigidas com a edição manual para minimizar os erros na quantificação da classe.

Figura 21 - Exemplo de edição manual. a) Resultado da classificação, e b) Resultado da classificação com edição manual.

a) Resultado da classificação.

b) Resultado da classificação com edição manual.

Assim, na Figura 21 a) é apresentado o resultado da classificação da imagem classificada, e em b) o resultado do mapeamento temático pós edição manual, com a remoção, principalmente, de *pixels* isolados, da classe Urbano presente na classe Manguezal e na classe Água.

Realizou-se um corte na área de estudo para remover as faixas de areia e do costão rochoso, seguindo a delimitação dos limites municipais e, ao norte, o limite da imagem de satélite. Além disso, os mapas temáticos finais passaram por um novo registro com o mapa temático de cobertura a terra de 1995 para garantir o acerto geográfico entre eles. Optou-se por utilizar esse mapa temático do ano de 1995

como referência para acerto geográfico de outras imagens devido a obtenção da fotografia aérea de 1994 para conferência do posicionamento entre imagens.

Outra forma de reduzir o erro nas análises multitemporais foi proceder com a tabulação cruzada entre os mapeamentos temáticos gerados e verificar as possíveis transições. A tabulação cruzada permite analisar as mudanças e transições verificadas em imagens classificadas independentes, utilizada também como técnica de detecção de mudanças em imagens pós-classificadas (KARA; ESBAH; DENIZ, 2013).

Para isso, utilizou-se o *software* Idrisi 3.2. e o algoritmo de tabulação cruzada. Assim, o mapa do período subsequente foi acertado considerando apenas as permanências e transições possíveis. As transições consideradas para a construção da modelagem da paisagem foram:

Floresta→Urbano; Floresta→Campo; Floresta→ Solo; Manguezal→Urbano; Manguezal→Campo; Manguezal→Solo; Campo→Urbano; Campo→Solo; Solo→Urbano. Para o período entre 2005 e 2013 foi incluída a transição Água→Urbano, devido à existência de aterros na área de estudo.

Como resultado, obtiveram-se mapas temáticos de cobertura da terra considerando apenas as transições pretendidas para cada período.

4.2.3 Organização da base de dados

O banco de dados geográfico foi montado na plataforma SPRING 5.2.3, com a definição dos parâmetros do projeto e coordenadas igualmente coincidentes com a área dos mapas temáticos e com cada uma das variáveis utilizadas.

Um conjunto de variáveis de distância foi selecionado para analisar as mudanças ocorridas por período observado. Assim, foram construídos mapas de distância às bases vetoriais de: a) áreas urbanas; b) áreas industriais; c) poligonal da área portuária de Santos; d) base viária, atualizada por período, das rodovias e vias secundárias; e) ferrovias; f) hidrografia simples; g) hidrografia dupla; h) hidrografia completa; i) áreas protegidas; j) empreendimentos operacionais; l) empreendimentos projetados.

A base das rodovias foi obtida pelo DER (2001), e foi atualizada para cada período de simulação, de acordo com a identificação nas imagens auxiliares e mapeamentos realizados na área de estudo (Tabelas 6 e 7). Também as vias

secundárias foram inicialmente obtidas da base cartográfica do IBGE (1985), e atualizadas com base nas imagens auxiliares e mapeamentos anteriores. As áreas industriais e urbana foram delimitadas com a fotografia aérea de 1994, atualizadas por período, de acordo com as imagens de satélite de 2005, 2010 e mapeamentos CETESB na área de estudo (1985 e 1991).

Além das variáveis de distância, foram geradas as variáveis categóricas, tais como: a) Unidades de Conservação; b) Zoneamento Ecológico-Econômico da Baixada Santista (ZEE-BS) Marinho; c) Zoneamento Ecológico-Econômico da Baixada Santista (ZEE-BS) Terrestre; d) empreendimentos operacionais; e) empreendimentos projetados.

Os mapas de variáveis possuem o mesmo tamanho, ou seja, o mesmo número de linhas e colunas dos mapas temáticos classificados, além de possuírem a mesma posição geográfica e todas em formato matricial.

Em relação às variáveis matriciais de declividade e altitude, estas foram inicialmente mosaicados e reprojetados em ambiente computacional Global Mapper, exportados como imagem e, em seguida, importados como grade numérica no SPRING para serem exportados como grades regulares numéricas (formato ASCII).

As variáveis vetoriais foram importadas como modelo temático no *software* SPRING e, depois de gerado o mapa de distância para cada variável, foram também exportadas como grade regular numérica.

Os mapas temáticos de cobertura da terra apresentaram o formato de saída em Geotiff, e as variáveis numéricas em ASCII. Foi necessária uma série de procedimentos de conversão entre formatos para entrada desses dados na plataforma de modelagem do Dinamica EGO. Para as variáveis categóricas, como, por exemplo, os mapas de cobertura da terra, foi realizado um reordenamento das classes em números sequenciais, e posteriormente, os mapas foram exportados em formato .rst no ambiente do *software* IDRISI. Em seguida, os mapas em formato .rst foram convertidos na extensão .ers (*software* ER MAPPER) com o formato "Unsigned8BbitInteger" e valor nulo igual a 0 (zero).

Os arquivos em grade regular numérica foram importados em seu formato ASCII para o ambiente IDRISI, definição de coordenadas espaciais, número de linhas e colunas e exportadas no formato matricial .rst. Esse arquivo deu entrada no *software* ER MAPPER para compor o cubo de variáveis estáticas, as quais foram

exportadas com a extensão .ers em formato “Signed32BitInteger”, com valor nulo igual a – 2127283648.

Dessa forma, foram gerados 12 (doze) mapas de variáveis estáticas para o período considerado entre 1985 e 1995, unidas em um cubo de dados em formato .ers, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Cubo de variáveis utilizadas para o período entre 1985 e 1995.

Para o período entre 1995 e 2005, foram utilizadas as mesmas variáveis do período anterior, com 12 mapas de variáveis e atualização das áreas urbanas, industriais e do sistema viário com a fotografia aérea de 1994. A Figura 23 abaixo ilustra as variáveis atualizadas utilizadas na modelagem.

Figura 23 - Cubo de variáveis utilizadas para o período entre 1995 e 2005.

Para o período entre 2005 e 2013, foram produzidos 19 mapas de variáveis (Figura 24), com bases atualizadas com a imagem de 2005 e acréscimo de variáveis, como distância do limite legal da poligonal da área portuária de Santos (decreto nº 4.333, de 12 de Agosto de 2002, sendo esta variável considerada apenas na análise dos períodos entre 2005 e 2013 em diante), novos empreendimentos operacionais e suas distâncias, empreendimentos projetados e suas distâncias e os vetores do ZEE-BS³ (Marinho e Terrestre). Esse cubo de dados

³ De acordo com decreto nº 58.996 (SÃO PAULO, 2013), em seu Artigo 7º, as unidades territoriais estão enquadradas na seguinte tipologia de zonas: I - Z-1 - zona que mantém os ecossistemas primitivos em pleno equilíbrio ambiental, ocorrendo uma diversificada composição de espécies e uma organização funcional capazes de manter, de forma sustentada, uma comunidade de organismos balanceada, integrada e adaptada, podendo ocorrer atividades humanas de baixos efeitos impactantes; II - Z-2 - zona que apresenta alterações na organização funcional dos ecossistemas primitivos, mas é capacitada para manter em equilíbrio uma comunidade de organismos em graus variados de diversidade, mesmo com a ocorrência de atividades humanas intermitentes ou de baixos impactos, podendo apresentar, em áreas terrestres, assentamentos humanos dispersos e pouco populosos, com pouca integração entre si; III - Z-3 - zona que apresenta os ecossistemas primitivos parcialmente modificados, com dificuldades de regeneração natural, pela exploração, supressão ou substituição de algum de seus componentes, em razão da ocorrência de áreas de assentamentos humanos com maior integração entre si; IV - Z-4 - zona que apresenta os ecossistemas primitivos

foi incluído no processo de modelagem do período entre 2005 e 2013, mas o ZEE-BS foi considerado no cenário futuro para 2024, haja vista a implantação do respectivo decreto em 2013. Também os novos empreendimentos projetados constaram na modelagem do cenário futuro para 2024, como constaram nos estudos sobre expansão portuária.

significativamente modificados pela supressão de componentes, descaracterização dos substratos terrestres e marinhos, alteração das drenagens ou da hidrodinâmica, bem como pela ocorrência, em áreas terrestres, de assentamentos rurais ou periurbanos descontínuos interligados, necessitando de intervenções para sua regeneração parcial; V - Z-5 - zona que apresenta a maior parte dos componentes dos ecossistemas primitivos degradada ou suprimida, com organização funcional eliminada. O Artigo 9º descreve a subdivisão em 7 (sete) subzonas, assim definidas: I - Z1AEP - Áreas Especialmente Protegidas - terrestre e marinha: áreas sob regime de estrita proteção e administração autônoma definida em lei, consistentes em: a) Unidades de Conservação do grupo de proteção integral a que alude o artigo 2º, inciso VI, da Lei federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000; b) terras indígenas homologadas ou com processo demarcatório autorizado pelo órgão competente; c) reservas particulares do Patrimônio Natural; II - Z2ME e Z3ME - Zonas Marinhas Especiais: zonas marinhas sujeitas a restrições maiores do que aquelas incidentes sobre a zona da qual derivam, embora não o suficiente para enquadramento em outra tipologia de zona; III - Z4TE e Z5TE - Zonas Terrestres Especiais: zonas terrestres sujeitas a restrições maiores do que a zona da qual derivam, embora não o suficiente para enquadramento em outra tipologia de zona; IV - Z5TEP - Expansão Portuária: zona terrestre sujeita a restrição maior do que a zona da qual deriva, embora não o suficiente para enquadramento em outra tipologia de zona; V - Z5MEP - Terrestre Marinha Expansão Portuária: zona marinha sujeita a restrição maior do que a zona da qual deriva, embora não o suficiente para enquadramento em outra tipologia de zona.

Figura 24 - Cubo de variáveis utilizadas para o período entre 2005 e 2013.

4.2.4 Construção da modelagem dinâmica

O primeiro passo para a construção do modelo da dinâmica da paisagem é o mapeamento dos padrões mutáveis da cobertura da terra na região de análise, obtidos com o levantamento de dados, como mapas previamente existentes, fotografias aéreas, dados do sensoriamento remoto orbital, entre outros.

A subsequente análise dos mapas classificados visou à detecção e quantificação dessas mudanças. Desse processo, foi gerada a matriz de transição para os períodos analisados. Assim, foram considerados os mapas classificados a partir das imagens de satélite dos anos de 1985, 1995, 2005 e 2013.

No *software* Dinamica EGO, as simulações foram realizadas baseando-se nas taxas de transição calculadas pelas matrizes de transição, bem como nas probabilidades de transição das células, determinadas pelo método de pesos de evidência.

As saídas das simulações foram continuamente calibradas até se atingirem resultados satisfatórios, que foram por fim validados. O resultado do melhor modelo gerado no último período foi considerado para realizar os cenários de prognósticos para 2024.

Dessa forma, as principais etapas seguidas para construção da modelagem no Dinamica EGO foram:

- 1) cálculo do percentual de mudanças das classes através das matrizes de transição;
- 2) cálculo das faixas de discretização das variáveis de distância;
- 3) cálculo dos pesos de evidência ($W+$);
- 4) análise da correlação dos pesos entre as variáveis de entrada para todas as transições;
- 5) simulação e calibração;
- 6) validação do mapa final observado e simulado.

As etapas foram realizadas na plataforma do DINAMICA EGO versão 2.4.

Na Figura 25, é apresentado o esquema metodológico que sintetiza os procedimentos utilizados na construção da modelagem da dinâmica espacial.

Figura 25 - Esquema metodológico da construção da modelagem da dinâmica espacial.

4.2.4.1 Geração das matrizes de transição

Primeiramente, é necessário calcular as matrizes de transição históricas para cada período simulado: 1985-1995, 1995-2005, 2005-2013. Para gerar o cenário de prognóstico para o ano de 2024, considerando as alterações nas áreas construídas com a instalação de empreendimentos portuários projetados para a região, foi calculada uma matriz de transição hipotética para o período entre 2013 e 2024.

Dessa forma, para cada período, foi calculada a taxa de transição de passo único, ou seja, considerando os percentuais de mudanças globais entre as classes nos diversos períodos analisados. Além disso, também foram calculadas as matrizes de transição anuais.

Foi gerado um total de quatro matrizes de transição, globais e anuais, com áreas (ha) e percentuais de mudanças entre as classes. Com a entrada de um mapa

inicial e outro final da cobertura da terra, o modelo calculou as matrizes de transição históricas.

4.2.4.2 Cálculo das faixas de discretização

Foi necessário categorizar os mapas das variáveis de distância, definindo intervalos expressos em valores discretos para a derivação dos pesos de evidência. O cálculo das faixas foi definido com base nos parâmetros incorporados no Dinamica EGO, explícito em Soares-Filho; Rodrigues e Costa (2009).

As variáveis categóricas, tais como as Unidades de Conservação utilizadas no modelo, não necessitam de parâmetros para seu cálculo. As variáveis contínuas, como as utilizadas nos mapas de distância, requerem a definição desses parâmetros. Assim, os parâmetros utilizados foram: a) nº mínimo de células para o fatiamento no eixo x, $mindx = 1$; b) nº máximo de células para o fatiamento no eixo x, $maxdx = 1440000$; c) ângulo de tolerância $ft = 5^\circ$; d) incremento igual a 30 m, valor do mapa de entrada para definição de intervalos. O incremento é um valor arbitrário, definido pelo usuário, para a criação de faixas relativamente constantes de valores no eixo x. É um artifício para se organizar o gráfico, que plota An por $An * \exp(W+)$, em que An equivale ao número de células de um *buffer*. Normalmente, adota-se a própria resolução espacial no caso de grades de distância, e valores quaisquer para as outras grades, fornecidos na mesma unidade da correspondente variável contínua, desde que façam sentido do ponto de vista do fenômeno representado. Por exemplo, em uma grade de altimetria, o incremento pode ser 5 metros para uma região mais plana, e 10 metros para uma região de relevo mais acidentado; em uma grade de declividade, o incremento pode variar de 1° a 6° , e assim por diante.

Também foram definidas as distâncias às classes “Urbano”, “Floresta”, “Manguezal” e “Campo”, com os mesmos parâmetros das variáveis contínuas. A distância às classes é considerada uma distância dinâmica porque, ao passo que as suas células mudam ao longo da simulação, o modelo se encarrega de atualizar as novas faixas e pesos para a ocorrência de cada transição. Como resultado, a saída é um arquivo de texto formato .dcf, que serve como entrada para o cálculo dos pesos de evidência.

A Figura 26 mostra os parâmetros definidos no Dinamica EGO.

Figura 26 - Parâmetros definidos no Dinamica EGO.

Functor Editor

Determine Weights Of Evidence Ranges
Weights of Evidence Ranges

Define the best ranges or intervals employed to categorize continuous gray-tone variables.

General Comment

Skeleton

Spatial variables selected and their types - Category or continuous gray-tone -, and the parameters specified for range definitions, such as increment, maximum and minimum deltas, and tolerance angle.

New Transition

From: To:

Transition Variables

6->2

Map Identifier	Layer Name	Categorical	Increment	Maximum Delta	Minimum Delta	Tolerance Angle
distance	distance_to_2	☐	30.0	1440000	1	5.0
distance	distance_to_3	☐	30.0	1440000	1	5.0
distance	distance_to_4	☐	30.0	1440000	1	5.0
distance	distance_to_5	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	altitude	☐	5.0	1000	0	5.0
static_var	areasprot_f	☒				
static_var	decividade	☐	6.0	1000	0	5.0
static_var	dist_areas_prot	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	dist_ferr	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	dist_hidro_d	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	dist_hidro_s	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	dist_ind_1985	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	dist_rod_1985	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	dist_urb_1985	☐	30.0	1440000	1	5.0
static_var	hidro_c	☐	30.0	1440000	1	5.0

Variable

Map Identifier: Layer Name:

☐ Categorical

☒ Non-Categorical

Increment: Maximum Delta:

OK Cancel Help

4.2.4.3 Cálculo dos pesos de evidência

O arquivo de pesos de evidência foi calculado a partir das faixas de discretização das variáveis, conforme eq.(9) e eq. (10) apresentadas na Seção 2.3.

Assim, a partir dos mapas de cobertura da terra (anos de 1985, 1995, 2005 e 2013) e do cubo de dados, foram calculados os pesos de evidência para todas as variáveis e respectivos intervalos categóricos em todas as transições.

4.2.4.4 Dependência espacial entre pares de variáveis

As variáveis utilizadas no processo da modelagem devem ser independentes entre si para explicar a mesma transição. Para isso, todas as possíveis combinações pareadas de variáveis para cada uma das transições foram avaliadas em termos de sua associação ou dependência espacial através do método da Incerteza de

Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty*), implementada no Dinamica EGO.

Valores superiores a 0,5 indicam mais associação entre pares de variáveis do que menos (BONHAM-CARTER, 1994). Caso esse valor ocorra, uma das variáveis deve ser excluída do modelo, ou ambas combinadas em um único plano de informação para evitar viés no modelo.

A seleção das variáveis explicativas visa, não somente remover a variável com alta associação espacial com outra de menor poder explicativo em relação a esta, mas também excluir do modelo àquelas variáveis que, ainda que apresentem alto valor de $W+$, não possuem relação alguma com a transição em questão.

Dessa forma, algumas variáveis foram desconsideradas, como por exemplo, no caso da hidrografia simples e da hidrografia completa, pareadas com dependência espacial acima de 0,5, mantendo-se apenas esta última, como mostra a seleção de variáveis explicativas no Apêndice A.

4.2.4.5 Simulações e ajustes

A etapa seguinte do processo de modelagem é a simulação. Para isso, foram utilizados os seguintes mapas iniciais da paisagem, as matrizes de transição, os pesos de evidência e o cubo de variáveis estáticas do modelo.

Considerou-se a tendência estacionária por período simulado. Assim, para cada período, foi considerado um mapa inicial: para simular a paisagem em 1995, utilizou-se como mapa inicial o mapa temático de 1985; para simular a paisagem em 2005, o mapa temático de 1995 foi considerado como mapa inicial; para simular o mapa em 2013, utilizou-se como mapa inicial o mapa temático de 2005 e, finalmente, para simular o mapa de 2024, utilizou-se o mapa inicial de 2013. Dessa forma, buscou-se analisar as mudanças reais e simuladas para cada período e projetar para 2024 a tendência do último período de 2005-2013.

Para a modelagem do cenário de 2024, considerando os possíveis novos empreendimentos projetados para a região, foi utilizada a matriz de transição alterada com as tendências de crescimento das áreas urbanas. Para simular a paisagem, foi necessário, além dos dados anteriormente especificados, a definição pelo usuário dos percentuais da quantia total de células que sofrerão alterações em função do algoritmo expensor (*expander*). O percentual do algoritmo formador de

manchas (*patcher*) é automaticamente definido, sendo o valor complementar do *expander*.

Os mapas de tabulação cruzada também forneceram o valor de média e variância para cada transição de classes. Esse cálculo foi obtido com a importação do mapa da tabulação gerado no ambiente IDRISI para o *software* ArcGis 10.1. Dessa forma, a imagem foi convertida para polígono, o que permitiu calcular sua área em hectares e sumariar, para cada transição, os valores da média e variância. Os valores de isometria foram definidos empiricamente em cada teste efetuado, valores estes que variam de 0 a 2, sendo que os valores próximos de zero apresentaram manchas muito ramificadas, e os próximos a 2, manchas mais compactas.

De acordo com Almeida et al. (2005a), para a calibração dos modelos gerados, foram necessárias análises visuais comparativas para cada tipo de mudança da cobertura da terra, considerando-se resultados preliminares de simulação, mapas de transição e de probabilidades de transição, bem como a sobreposição de mapas de variáveis ao mapa real de uso e cobertura da terra.

Sendo assim, os ajustes foram feitos empiricamente através da comparação visual entre os mapas observados e simulados.

4.2.4.6 Validação dos modelos

A validação das simulações foi realizada em função da incerteza da localização de uma classe dentro de sua vizinhança de células, conhecido como *fuzziness of location*, gerado por Hagen (2003), considerando janelas de 3x3 a 11x11 *pixels* (seção 2.3) e comparando-se os mapas diferença. As simulações foram selecionadas com base na validação do método e por análises visuais com seus mapas reais. A simulação com o melhor resultado pela validação foi utilizada, mantidos os parâmetros do último período proposto para a geração de cenários futuros.

4.2.5 Cenários de prognósticos

Foram gerados dois cenários em um horizonte para o ano de 2024: um modelo estacionário e um modelo considerando a implantação dos empreendimentos projetados até 2024.

O modelo estacionário para gerar o cenário futuro considerou os mesmos parâmetros do modelo gerado para 2013, tais como o tamanho média das manchas, percentual de *expander e patcher*, índice de isometria, e a matriz de transição.

Para o modelo com os novos projetos investidos, gerou-se uma matriz de transição para o período entre 2013 e 2024, com o objetivo de obter a quantificação de células transitórias para a classe urbana. Seu percentual foi utilizado no cenário futuro considerando as trajetórias da paisagem com a implantação dos empreendimentos portuários projetados para a região. Nessa perspectiva, o modelo considerou mudanças que podem ser possíveis com as novas instalações portuárias em um cenário para 2024.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

O resultado da classificação por MaxVer para a imagem de 1985 obteve exatidão global de 74% (Tabela 8) e índice Kappa calculado de 0,69.

A confusão maior ocorreu entre as classes Solo e Urbano. A acurácia do usuário para a classe Solo foi apenas 38%, com erros elevados de comissão nas classes Urbano (12), Floresta (6), Manguezal (6), Campo (2) e Água (5), ou seja, os *pixels* amostrados foram avaliados como pertencentes a essas classes e foram erroneamente classificados como Solo.

Tabela 8 - Matriz de erros (em *pixel*) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 1985 para a região da Baixada Santista, SP.

	Classe	Dados de Referência						Total	Acurácia do usuário
		Urbano	Floresta	Manguezal	Campo	Solo	Água		
Classificação	Urbano	40	1	0	2	3	4	50	80%
	Floresta	0	42	2	6	0	0	50	84%
	Manguezal	0	6	40	3	0	1	50	80%
	Campo	5	10	2	32	1	0	50	64%
	Solo	12	6	6	2	19	5	50	38%
	Água	0	0	0	0	0	50	50	100%
	Total	57	65	50	45	23	60	300	
Acurácia do produtor		70%	65%	80%	71%	83%	83%		74%
									Exatidão global

A classe Campo apresentou acurácia do usuário de 64% com erros mostrando, principalmente, a presença de *pixels* de Urbano (5) e Floresta (10) nessa classe. Da mesma forma, a classe Floresta contém alguns *pixels* erroneamente classificados como Campo (6).

Em uma análise geral, a exatidão do usuário para as classes, Floresta, Manguezal e Urbano estiveram acima do limiar de 80%.

O resultado da classificação para o ano de 1985 está apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 1985 para a região da Baixada Santista, SP.

Para o ano de 1995, a matriz de erros gerada pelo método ISODATA demonstrou exatidão global equivalente a 69% (Tabela 9) e índice Kappa igual a 0,63.

Tabela 9 - Matriz de erros (em *pixel*) da classificação não-supervisionada ISODATA realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.

Classificação	Dados de Referência							Acurácia do	
	Classe	Urbano	Floresta	Manguezal	Campo	Solo	Água	Total	usuário
	Urbano	42	1	0	2	4	1	50	84%
	Floresta	0	32	9	5	1	3	50	64%
	Manguezal	0	16	33	0	1	0	50	66%
	Campo	3	12	0	34	1	0	50	68%
	Solo	6	8	3	3	20	10	50	40%
	Água	0	3	0	0	0	47	50	94%
	Total	51	72	45	44	27	61	300	
Acurácia do produtor		82%	44%	73%	77%	74%	77%		69%
									Exatidão global

O resultado da classificação gerado pelo algoritmo ISODATA está apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Resultado da classificação não-supervisionada ISODATA realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.

O resultado mostrou confusão entre as classes de vegetação e a acurácia do usuário foi 64% em Floresta e 66% para Manguezal. Houve *pixels* de Manguezal classificados como Floresta (9), e de Floresta em Manguezal (16). De forma semelhante, a avaliação da classificação para Campo resultou acerto de 68%, decorrente principalmente de *pixels* erroneamente classificados como Floresta (5).

O maior erro encontrado foi na classe Solo, onde a confusão deu-se entre quase todas as classes e a acurácia do usuário foi de apenas 40%. Em termos de confusão entre as classes, apresentou 6 (seis) amostras da classe Urbano, 8 (oito) da classe Floresta e 10 (dez) da classe Água, principalmente. O engano entre solo exposto e áreas construídas é comumente apresentado em classificação de imagens de satélite, principalmente no mapeamento de áreas urbanas devido à complexidade espectral dos alvos.

As classes cuja acurácia esteve abaixo de 80% foram Floresta, Manguezal, Campo e Solo. Esses erros evidenciam a confusão em diferenciar as áreas naturais e antrópicas e vice-versa. A imprecisão da classificação resultou na dificuldade de o algoritmo ISODATA discriminar as diferentes respostas espectrais provenientes

dessa paisagem complexa e antropizada. Dessa forma, a aplicação desse método para diferenciação dos tipos de vegetação predominante na região não foi satisfatória.

O segundo passo foi avaliar o resultado da classificação obtida com o algoritmo MaxVer, para a imagem de 1995, em comparação ao método anteriormente utilizado. A matriz de erros apresentou exatidão global de 79% (Tabela 10) e índice Kappa de 0,75.

Tabela 10 - Matriz de erros (em *pixel*) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.

Classificação	Dados de Referência							Acurácia do	
	Classe	Urbano	Floresta	Manguezal	Campo	Solo	Água	Total	usuário
	Urbano	43	3	0	1	1	2	50	86%
	Floresta	1	41	3	4	1	0	50	82%
	Manguezal	0	10	36	1	2	1	50	72%
	Campo	2	1	0	46	1	0	50	92%
	Solo	10	3	1	6	24	6	50	48%
	Água	0	2	0	0	1	47	50	94%
	Total	56	60	40	58	30	56	300	
Acurácia do produtor		77%	68%	90%	79%	80%	84%		79%
									Exatidão global

O pior desempenho esteve na classe Solo, sendo a acurácia do usuário de apenas 48%, confundindo *pixels* com a classe Água (6), Campo (6) e principalmente, Urbano (10).

A classe Manguezal obteve acurácia do usuário de 72%. O erro de comissão dessa classe envolveu a presença de *pixels* de Floresta (10) e consequentemente omissão da classe Floresta em Manguezal.

A Figura 29 apresenta o resultado da classificação supervisionada MaxVer para o ano de 1995.

Figura 29 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 1995 para a região da Baixada Santista, SP.

Mello et al. (2012) encontraram no método MaxVer um coeficiente de concordância Kappa em torno de 0,70 a 0,89, valores superiores ao método não-supervisionado, possibilitando a discriminação da classe florestal. Nas áreas de capoeira, compostas por vegetação secundária em diferentes estágios, a ocorrência da confusão com a classe florestal foi elevada, à medida que a estrutura avança em direção à regeneração da floresta. Dessa forma, os classificadores não-supervisionados, baseados apenas na diferenciação espectral dos alvos, podem tender a atribuir à classe florestal vários *pixels* da classe capoeira, gerando erros de omissão maiores do que no uso de classificadores supervisionados, quando são fornecidas amostras ao classificador.

O resultado da classificação para o ano de 2005 obteve exatidão global de 84% (Tabela 11) e índice Kappa de 0,81.

Tabela 11 - Matriz de erros (em *pixel*) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 2005 para a região da Baixada Santista, SP.

Classificação	Dados de Referência							Acurácia do usuário
	Classe	Urbano	Floresta	Manguezal	Campo	Solo	Água	Total
	Urbano	48	1	0	0	0	1	50
	Floresta	0	49	0	1	0	0	50
	Manguezal	0	6	43	1	0	0	50
	Campo	2	5	0	42	1	0	50
	Solo	19	2	0	3	21	5	50
	Água	0	1	0	0	0	49	50
	Total	69	64	43	47	22	55	300
	Acurácia do produtor	70%	77%	100%	89%	95%	89%	84%
		Exatidão global						

A menor acurácia do usuário foi na classe Solo, com 42%, apresentando confusão, principalmente com a classe Urbano (19) e Água (5). Nota-se a omissão de *pixels* da classe Urbano classificados como Solo (19). A classe Campo apresentou acurácia de 84% e contou com 5 (cinco) *pixels* de Floresta erroneamente classificados. Na classificação da imagem de 1985, esse tipo de erro também ocorreu.

A classe Manguezal apresentou confusão com a classe Floresta (6), obtendo acurácia do usuário em 86%. A Figura 30 mostra o resultado da classificação para 2005.

Figura 30 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 2005 para a região da Baixada Santista, SP.

Por fim, o resultado da classificação da imagem do ano de 2013 obteve exatidão global de 80% (Tabela 12) e o índice Kappa calculado foi 0,76.

A acurácia do usuário da classe Solo foi de apenas 38%, principalmente em decorrência de *pixels* de Água (9) e Campo (9), erroneamente classificados na classe Solo. A classe Campo obteve acurácia do usuário de 68%, erro associado com a presença de *pixels* de Urbano (10) nessa classe. De forma análoga, a classe Urbano obteve acurácia do usuário de 84%, com a presença de Água (7).

Tabela 12 - Matriz de erros (em *pixel*) da classificação supervisionada (MaxVer) realizada na imagem LANDSAT de 2013 para a região da Baixada Santista, SP.

Dados de Referência										Acurácia do usuário
Classificação	Classe	Urbano	Floresta	Manguezal	Campo	Solo	Água	Total		
	Urbano	42	0	0	1	0	7	50	84%	
	Floresta	0	49	1	0	0	0	50	98%	
	Manguezal	0	0	47	0	1	2	50	94%	
	Campo	10	3	0	34	0	3	50	68%	
	Solo	4	5	4	9	19	9	50	38%	
	Água	0	0	0	0	0	50	50	100%	
	Total	56	57	52	44	20	71	300		
Acurácia do produtor		75%	86%	90%	77%	95%	70%	80%		
Exatidão global										

O resultado da classificação por MaxVer para a imagem de 2013 está apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Resultado da classificação supervisionada Maxver realizada na imagem LANDSAT de 2013 para a região da Baixada Santista, SP.

Após a edição manual, obteve-se o mapeamento temático de cobertura da terra para 1985, apresentado na Figura 32.

A seguir, foi realizada uma tabulação cruzada entre esse mapeamento obtido para 1985 com o mapeamento gerado pela classificação da imagem de 1995, considerando apenas transições possíveis. Esse processo evitou considerar a transição de Manguezal para Floresta, regenerações entre classes, desconsiderando a transição de Urbano para Floresta, e evitar mudanças da classe Água.

Esse método foi adequado principalmente por considerar que Floresta não transita para Manguezal, logo não há Manguezal em áreas de montanha onde predomina a vegetação de Floresta Ombrófila Densa.

As transições entre Água não foram consideradas, e essa classe permaneceu inalterada. Apenas para o período entre 2005 e 2013, essa transição foi avaliada pois houve a instalação de terminais portuários sobre o estuário.

Figura 32 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 1985.

A modelagem da paisagem buscou verificar as possíveis transições para áreas urbanas e solo exposto, visto que são tendências de ocupação de novas áreas construídas, com possibilidade de desenvolvimento industrial e portuário.

Dessa forma, levando-se em conta apenas as transições admitidas nesse período, obteve-se o mapeamento ajustado para 1995 (Figura 33).

Figura 33 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 1995.

Da mesma maneira, foi realizada a tabulação cruzada para 2005, considerando esse mapeamento de 1995, obtendo o mapeamento de 2005 (Figura 34). O mapeamento ajustado para 2013 considerou a tabulação cruzada com esse mapeamento de 2005, obtendo o mapa classificado de 2013 (Figura 35).

Figura 34 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 2005.

Figura 35 - Mapeamento temático de cobertura da terra de 2013.

Na Figura 36 são apresentados detalhes dos resultados dos mapeamentos temáticos na região da Praia Grande para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2013.

Figura 36 - Detalhes da região de Praia Grande para visualização das áreas de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2013.

Na Figura 36 (a), as áreas representadas como Campo em 1985 foram ocupadas pelo crescimento urbano nos períodos subsequentes, isto é, em 1995 (b), 2005 (c) e 2013 (d). Regiões classificadas como Solo também deram lugar às ocupações urbanas, seguindo a rodovia de ligação, principalmente para o município de Praia Grande. De acordo com Afonso (2005), na região de Praia Grande, onde predominam as atividades de veraneio, a mancha urbana apresenta-se de forma linear, com o loteamento de áreas preferencialmente planas, considerando que a malha viária também se justapõe à ocupação.

Na Praia Grande e na porção continental de São Vicente, por exemplo, os terrenos urbanos loteados ainda ocupam somente a planície sedimentar, mais favorável à urbanização, e os manguezais ainda se encontram conservados

(AFONSO, 2005). O mesmo não acontece na porção insular de São Vicente, onde, após a ocupação das planícies mais secas, alguns manguezais foram invadidos e aterrados para construção de novos loteamentos residenciais ou para expansão das áreas portuárias, restando pequena parte dos mesmos livres para ocupação urbana (AFONSO, 2005).

A Figura 37 apresenta a região de Santos e Cubatão, com a presença de vegetação de manguezal e a ocupação urbana consolidada na porção insular, restando a porção continental para a expansão e ocupação urbana e portuária.

Figura 37 - Detalhes da região de Santos e Cubatão para visualização das áreas de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2013.

A Figura 38 mostra o crescimento urbano de Santos e Guarujá e, de acordo com Afonso (2005), a expansão e a subsequente valorização das terras urbanas ocorreram a partir do núcleo polarizador constituído pelo porto e pelo atual centro de Santos, dirigindo-se, inicialmente, rumo às praias e barra de Santos, em um

processo organizado e, posteriormente, em duas direções opostas, rumo a São Vicente e a Vicente de Carvalho, áreas ocupadas desprovidas de plano geral.

Figura 38-Detalhes da região de Santos e Guarujá para visualização das áreas de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2013.

5.2 ANÁLISES DAS MUDANÇAS TEMPORAIS

A quantificação das áreas, em hectares, ocupadas por cada classe nos anos de 1985, 1995, 2005 e 2013, obtida dos mapeamentos temáticos de cobertura da terra, e a diferença entre os períodos, em percentuais, estão representadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Quantificação das classes em área (ha), e a diferença entre os períodos, em percentuais.

Ano	1985	1995	1985- 1995	2005	1995- 2005	2013	2005- 2013	1985- 2013
Classes	Área (ha)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	(%)
Sem Dado	62193,51	62193,51	0%	62193,51	0%	62193,51	0%	0%
Urbano	10308,24	13566,42	32%	15757,65	16%	17323,74	10%	68%
Floresta	33072,21	30257,46	-9%	28881,45	-5%	28378,89	-2%	-14%
Manguezal	5858,19	5540,13	-5%	5248,62	-5%	5070,96	-3%	-13%
Campo	11298,78	10769,22	-5%	10059,48	-7%	9123,93	-9%	-19%
Solo	2082,42	2486,61	19%	2672,64	7%	2912,4	9%	40%
Água	5095,26	5095,26	0%	5095,26	0%	4905,18	-4%	-4%
Total	129908,6	129908,6	0%	129908,6	0%	129908,6	0%	0%

Em relação ao período global entre 1985 e 2013, notou-se o acréscimo em 68% da classe Urbano, ou áreas construídas, em decorrência da redução, principalmente, das classes de Floresta (14%) e Campo (19%).

Durante esse período, a classe referente ao ecossistema Manguezal contabilizou redução total de suas áreas em 13%, porém a uma taxa relativamente constante, quase 5% de perda a cada 10 anos. No período mais recente, entre 2005 e 2013, a redução foi menor, em 3%.

No estudo de Araújo (2010), o autor utilizou imagens LANDSAT para investigar os manguezais nos estuários da Região da Baixada Santista, constatando relativa estabilidade em suas áreas a partir de 1999, com variações locais de regeneração e degradação.

Outra classe que sofreu acréscimo de área entre 1985 e 2013 foi a classe Solo, este com 2.082,42 hectares em 1985, passando a 2.912,4 hectares em 2013, com aumento de 40%.

As áreas ocupadas pela classe Urbano, com 10.308,24 hectares em 1985, sofreram acréscimo de 32% para a ano de 1995, contabilizando 13.566,42 hectares. Outra classe que sofreu acréscimo foi o Solo, de 2.082,42 hectares em 1985 para 2.486,61 hectares em 1995, aumentando em 19%.

Em contrapartida, a classe Floresta sofreu redução de 9% de sua extensão, de 33.072,21 hectares em 1985 para 30.257,46 hectares em 1995. As classes Manguezal e Campo sofreram redução em 5% do total de suas áreas: o Manguezal com 5.858,19 hectares em 1985 para 5.540,13 hectares em 1995, e a classe Campo de 11.298,78 hectares em 1985 para 10.769,22 hectares em 1995.

Considerando o período seguinte, entre 1995 e 2005, a classe Urbano apresentou aumento de 16% em sua área, ou seja, de 13.566,42 hectares passa a contabilizar 15.757,65 hectares em 2005. A classe Solo apresentou aumento de 7% de sua área, com 2.486,61 hectares em 1995 para 2.672,64 hectares em 2005.

As classes Floresta e Manguezal tiveram redução em 5% de suas áreas: a Floresta com 30.257,46 hectares em 1995 passou a 28.881,45 hectares em 2005, e o Manguezal com 5.540,13 hectares em 1995 reduziu para 5.348,62 hectares em 2005. A classe Campo apresentou maior redução nesse período, com perda em 7% de sua área, declinando de 10.769,22 (ha) em 1995 para 10.059,48 (ha) em 2005.

O último período, entre 2005 e 2013, a classe Campo apresentou redução de 9% em sua área, seguindo a tendência do período anterior e convertendo 10.059,48 hectares para 9.123,93 em 2013. Outras classes com redução de suas áreas foram: Floresta (-2%), Manguezal (-3%) e a classe Água (-4%). Essa última remete à construção de terminais portuários, Embraport e Brasil Terminal Portuário (BTP), construídos sobre o estuário. Essa conversão contribuiu para o aumento da classe Urbana nesse período, com elevação de 10% de sua área, finalizando em 17.323,74 hectares de áreas construídas. Considerou o aumento da classe Solo em 9% de sua área total, passando de 2.672,64 para 2.912,4 hectares em 2013. Esse aumento reflete a transição do solo para outras áreas construídas, além do aumento da sedimentação e aterramento de áreas. Verificou-se o aterramento em áreas próximas da Cosipa, em Cubatão, para expansão das atividades industriais.

5.2.1 Matriz de transição do período entre 1985 e 1995

Utilizou-se o *software* Dinamica EGO para obtenção das matrizes de transição históricas. Essas matrizes são o resultado do cruzamento entre os mapas de cobertura da terra, em tempo inicial e outro final, determinado em cada período. A matriz de transição relata a quantidade de células que mudaram de uma classe para outra, estabelecida com base nas transições consideradas em cada período, sendo tratadas como transformações urbanas e de degradação da cobertura da terra.

A Tabela 14 a seguir mostra a matriz de transição para o período entre 1985 e 1995 em termos de áreas transitáveis (ha) entre as classes de cobertura da terra.

Tabela 14 - Matriz de transição dada em área (ha) no período entre 1985 e 1995.

Período: 1985-1995	Matriz de transição (área em hectares)			
De/Para	Urbano	Campo	Solo	Total
Floresta	295,56	2315,52	203,67	2814,75
Manguezal	28,08	172,53	117,45	318,06
Campo	2311,29	-	706,32	3017,61
Solo	623,25	-	-	623,25
Total	3258,18	2488,05	1027,44	6773,67

Em termos de mudança de área, 2311,29 hectares transitaram da classe Campo para Urbano, correspondendo 20,46% (Tabela 15). A maior contribuição para o acréscimo de áreas construídas nesse período foi a transição de Solo para Urbano, com 623,25 hectares, o que corresponde em torno de 30% da classe.

A Tabela 15 relata a matriz de transição de passo único, ou seja, os percentuais totais obtidos durante esse período.

Tabela 15 - Matriz de transição de passo único (em percentuais) no período entre 1985 e 1995.

Período: 1985-1995	Matriz de transição de passo único (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,89%	7,00%	0,62%
Manguezal	0,48%	2,95%	2,00%
Campo	20,46%	-	6,25%
Solo	29,93%	-	-

As classes Floresta e Manguezal transitaram em 295,56 e 28,08 hectares, respectivamente, para a classe Urbano, o que corresponde em torno de 0,9% e 0,5%. Apesar de relativamente pouco representar em aumento de áreas construídas, a restrição e fragilidade ambiental desses tipos vegetacionais apontam a necessidade de gerenciamento e controle para essas áreas.

De forma semelhante, é possível observar a conversão da classe Floresta para Campo em 7%, e da classe Manguezal para Campo em aproximadamente 3%. As classes Solo e Campo representam a conversão de áreas naturais em áreas degradadas ou em processo de degradação, seja para o corte e eliminação da vegetação natural, aterro ou movimentação de terra para a instalação de áreas construídas. Além disso, ressalta-se que a transição de fisionomias vegetais para a classe Campo já representa uma regeneração que se sucede ao corte raso das mesmas, em vista dos longos períodos de simulação adotados no trabalho.

É possível verificar a conversão em 2 % do Manguezal para Solo, e 6% do Campo também para Solo nesse período (Tabela 15).

A Tabela 16 mostra os percentuais de transição em múltiplos passos, utilizada para quantificação das mudanças entre as classes. Essa matriz corresponde à quantificação de células mutáveis de uma classe para outra (em percentuais), calculadas como taxas anuais, e empregada para a geração dos modelos espaciais.

Tabela 16- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 1985 e 1995.

Período: 1985-1995	Matriz de transição de múltiplo passo (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,01%	0,84%	0,04%
Manguezal	0,05%	0,35%	0,23%
Campo	2,22%	-	0,84%
Solo	3,49%	-	-

De acordo com a Tabela 16, a transição da classe Solo para Urbano corresponde a 3,5% ao ano, a transição da classe Campo para Urbano em 2,2% ao ano, e outras classes apresentaram menores taxas anuais.

A Figura 39 a seguir resume as áreas totais e seus percentuais globais nas transições consideradas no período entre 1985 e 1995.

Figura 39 - Transições entre classes em área e percentuais no período entre 1985 e 1995.

5.2.2 Matriz de transição do período entre 1995 e 2005

As mudanças entre as classes para o período entre 1995 e 2005 estão demonstradas nas Tabelas 17 e 18, representando a matriz de transição em área (ha) e seus percentuais de transição em passo único, respectivamente.

Tabela 17-Matriz de transição dada em área (ha) no período entre 1995 e 2005.

Período: 1995-2005	Matriz de transição (área em hectares)			
De/Para	Urbano	Campo	Solo	Total
Floresta	116,1	1183,32	76,59	1376,01
Manguezal	38,16	83,52	169,83	291,51
Campo	1413,9	-	562,68	1976,58
Solo	623,07	-	-	623,07
Total	2191,23	1266,84	809,1	4267,17

Tabela 18- Matriz de transição de passo único (em percentuais) no período entre 1995 e 2005.

Período: 1995-2005	Matriz de transição de passo único (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,38%	3,91%	0,25%
Manguezal	0,69%	1,51%	3,07%
Campo	13,13%	-	5,22%
Solo	25,06%	-	-

As conversões das classes Campo e Solo continuam como maiores representantes para o aumento da classe Urbano, representado em 13% e 25%, respectivamente (Tabela 18). O Manguezal também transitou em 0,69% para a classe Urbano e a classe Floresta teve uma contribuição relativamente menor, 0,38% para essa transição. Houve diminuição da conversão da Floresta e Manguezal para Campo, em 3,91% e 1,5%, respectivamente. Também nesse período constata-se menor conversão das classes Floresta (0,25%) e Manguezal (3%) para Solo.

A Figura 40 a seguir resume as áreas totais e seus percentuais nas transições.

Figura 40 - Transições entre classes em área e percentuais no período entre 1995 e 2005.

A Tabela 19 mostra os percentuais de transição em múltiplos passos para esse período.

Tabela 19- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 1995 e 2005.

Período: 1995-2005	Matriz de transição de múltiplo passo (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,01%	1,36%	0,02%
Manguezal	0,02%	1,36%	0,35%
Campo	1,36%	-	0,65%
Solo	1,36%	-	-

5.2.3 Matriz de transição do período entre 2005 e 2013

A Tabela 20 a seguir mostra a matriz de transição para o período entre 2005 e 2013 em termos de áreas totais mutáveis entre as classes.

Tabela 20- Matriz de transição dada em área (ha) no período entre 2005 e 2013.

Período: 2005-2013	Matriz de transição (área em hectares)			
De/Para	Urbano	Campo	Solo	Total
Floresta	54,36	346,14	102,06	502,56
Manguezal	20,43	115,47	41,76	177,66
Campo	972,72	-	424,44	1397,16
Solo	328,5	-	-	328,5
Água	190,08	-	-	190,08
Total	1566,09	461,61	568,26	2595,96

A Tabela 21 relata os percentuais de transição de passo único entre 2005 e 2013, considerando o período de oito anos.

Tabela 21-Matriz de transição de passo único (em percentuais) no período entre 2005 e 2013.

Período: 2005-2013	Matriz de transição de passo único (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,19%	1,20%	2,20%
Manguezal	0,39%	2,20%	0,80%
Campo	9,67%	-	4,22%
Solo	12,29%	-	-
Água	3,73%	-	-

A Tabela 22 mostra os percentuais de transição em múltiplos passos no período entre 2005 e 2013.

Tabela 22-Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 2005 e 2013.

Período: 2005-2013	Matriz de transição de múltiplo passo (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,01%	0,16%	0,04%
Manguezal	0,03%	0,30%	0,10%
Campo	1,26%	-	0,60%
Solo	1,63%	-	-
Água	0,47%	-	-

Nota-se que houve uma diminuição na transição das classes Floresta e Manguezal para Urbano. A transição da Floresta para Urbano ficou em 0,19 %, e do Manguezal em 0,39%, com áreas totais de 54,36 e 20,43 hectares, respectivamente. Em comparação ao período anterior, nota-se que as áreas de Floresta para Urbano reduziram em 116,1 para 54,36 hectares.

Também houve redução na transição das classes de vegetação para Campo. As áreas de Floresta para Campo declinaram em 1183,32 hectares no período entre

1995 e 2005, e em 346,14 hectares no período entre 2005 e 2013, redução em torno de 30%. Nesse mesmo período, a conversão das áreas de Manguezal para Campo foi de 115,47 hectares (2,2%) de sua extensão original, representando um aumento em 32 hectares comparadas ao período anterior.

A Figura 41 a seguir resume as áreas totais e seus percentuais nas transições consideradas.

Figura 41 - Transições entre classes em área e percentuais no período entre 2005 e 2013.

Na transição para Solo, a Floresta contribuiu em 2,2% de suas áreas e o Manguezal em 0,8%, redução em 102,06 hectares da classe Floresta para Solo, e 41,76 hectares da classe Manguezal para Solo.

As transições das áreas de vegetação para áreas construídas reduziram em relação aos períodos anteriores, porém continuam perdendo para as áreas de Campo e de Solo.

Pode-se observar que as tendências não estão na contribuição direta das áreas de vegetação para áreas urbanas, mas estão sendo alocadas, principalmente, pela conversão das áreas degradadas, representadas pelas classes de Campo e Solo, para a classe Urbano, embora em menores proporções se comparadas com o

período anterior. O Campo contribuiu em 9,6% de suas áreas para Urbano e Solo em 12,29%.

Ainda se contabilizou a conversão da classe Água para Urbano em 190 hectares (3,73 %), representando as novas instalações portuárias no estuário construídas nesse período.

5.3 PESOS DE EVIDÊNCIA E MAPAS DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO

A análise dos pesos de evidência indica a influência exercida em relação à proximidade ou categoria de cada variável utilizada nas transições por período, representando a influência de cada categoria (ou faixas de valores) de certa variável espacial na determinação da probabilidade de transição espacial de estado de uma célula para outro. Seu resultado permite inferir como cada variável atua na dinâmica da área de estudo.

Os valores de pesos de evidência positivos referem-se a associação positiva, ou seja, favorecem a mudança de estado; já valores negativos indicam a repulsão ao fenômeno, e valores próximos de zero significam que a variável não exerce efeito sobre a transição (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009).

As variáveis explicativas utilizadas para cada transição podem ser verificadas no Apêndice A. A variável categórica referente ao ZEE-BS Marinho em todas as transições foi excluída pois seus valores de JIU foram superiores a 0,5 e mantido o ZEE-BS Terrestre. Essa variável foi utilizada apenas no modelo de simulação para 2024, visto que seu decreto nº 58.996 entrou em vigor em 25 de março de 2013.

A seguir, serão abordados os resultados dos pesos de evidência com influência nas principais transições e os mapas de probabilidade de transição.

Os mapas de probabilidade de transição são o resultado da integração dos pesos de evidência e representam as áreas mais favoráveis para cada tipo de transição.

5.3.1 Transição de Floresta para Urbano

Na transição da classe Floresta para a classe Urbano, as vias secundárias influenciaram em até aproximadamente 300 m de distância no período entre 1985 e 1995, e a partir desse ponto, os valores de pesos de evidência tenderam a diminuir e

exercer influência negativa (Figura 42). Para os períodos posteriores, entre 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013, a influência das vias secundárias passa a ser próximo de 200 m. Para os três períodos analisados a distância das vias secundárias entre 200 e 300 m influenciam na transição de novas áreas construídas. Assim, quanto mais afastada das vias secundárias, a transição para áreas construídas torna-se menor.

Figura 42-Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Floresta para Urbano.

Soares-Filho et al. (2004) verificaram que influência das rodovias e do sistema viário secundário influenciaram no desmatamento da região da Amazônia. Em relação às vias secundárias, a influência ao desmatamento alcançou 2 km de distância e, a partir de seu distanciamento, seus valores foram decrescentes e diminuíram sua influência.

A transição de áreas florestais para urbanas apresentou influência positiva na proximidade com a hidrografia até 1 km de distância entre 1985 e 1995, mas em 300 m entre 2005 e 2013. (Figura 43).

Figura 43-Valores dos pesos de evidência em função da distância à hidrografia na transição da classe Floresta para Urbano.

Teixeira et al. (2009), verificaram que a distância para a hidrografia favoreceu a conversão da vegetação pertencente à Floresta Atlântica em Ibiúna, SP, para áreas ocupadas em locais mais distantes dos rios, provavelmente porque esses rios

não são navegáveis e a mata ciliar é protegida pela legislação ambiental como áreas de proteção permanente.

A região de estudo, por apresentar importante rede hidrográfica associada ao desenvolvimento da Baixada Santista, com a ocupação do Porto de Santos no estuário e propício para navegação de grande embarcações, tem ao redor dos rios um importante fator para o desenvolvimento. Com o desenvolvimento no entorno de todo o estuário, a hidrografia favoreceu a transição de florestas para áreas construídas nos seus arredores, no período mais recente.

A variável dinâmica de distância à classe Urbano (Figura 44) tende a influenciar novas áreas construídas em detrimento das áreas florestais. Em todos os períodos, a faixa de distância com a variável dinâmica da classe Urbano esteve positiva para a mudança, entre 200 e 300 m. A partir dessa distância, passaram a não exercer influência nesse tipo de transição.

Figura 44-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Floresta para Urbano.

A variável dinâmica de distância à classe Campo indica que a transição foi influenciada positivamente com a distância entre 120 e 150 m, e a partir desse distanciamento passou a repelir a mudança para áreas urbanas (Figura 45).

Figura 45-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Floresta para Urbano.

Considerando a variável categórica referente às Unidades de Conservação, o valor dos pesos de evidência esteve negativo, e nesse ponto, as áreas protegidas inibem esse tipo de transição (Figura 46).

Figura 46 - Valores dos pesos de evidência em função da variável categórica das Unidades de Conservação na transição da classe Floresta para Urbano.

As categoriais das Unidades de Conservação foram:

- 1- Sem dado
- 2- Parque Estadual da Serra do Mar e Parque Estadual Xixová-Japuí.
- 3- Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Tijucopava.
- 4- Área Natural Tombada (ANT) Morro do Botelho, ANT Morros do Monduba, do Pinto e do Icanhema, ANT Serra do Guararu.
- 5- Área de Proteção Ambiental (APA) Marinha do Litoral Centro.

Nota-se que a implantação de áreas protegidas auxilia na manutenção das áreas florestais e impede sua conversão em áreas construídas, seja pelas restrições legais, seja pela fiscalização por agentes ambientais. De qualquer forma, a implantação do Parque Estadual da Serra do Mar possui ações legais que inibem a degradação da Mata Atlântica.

Outras variáveis não foram determinantes na influência dessa conversão de classes pois seus valores de pesos de evidência oscilaram em torno de zero.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Floresta para a classe Urbano nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 são apresentados na Figura 47, 48 e 49, respectivamente.

Figura 47 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Urbano no período entre 1985 e 1995.

Figura 48 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Urbano no período entre 1995 e 2005.

Figura 49 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Urbano no período entre 2005 e 2013.

Os mapas de probabilidade de transição demonstram as áreas mais favoráveis para a transição de Floresta para Urbano, encontrada nas regiões do Guarujá, Santos, São Vicente, Praia Grande e no início da serra em Cubatão no primeiro período, entre 1985 e 1995. No decorrer dos períodos, entre 1995 e 2005, as localidades são similares, mas os valores de probabilidade diminuem. Assim, no período entre 2005 e 2013, ocorrem manchas presentes em Guarujá e regiões próximas da Serra do Mar em Cubatão apenas.

5.3.2 Transição de Manguezal para Urbano

As áreas de manguezal sofreram alterações no ecossistema pelas atividades antrópicas, sendo que as rodovias influenciaram nos dois primeiros períodos (entre 1985 e 1995, e 1995 e 2005) (Figura 50), e as vias secundárias nos períodos entre 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 (Figura 51).

Com relação à distância às rodovias, é possível notar que a transição ocorre em até 500 m de distância. As vias secundárias afetam nessa mudança, principalmente nos dois últimos períodos, nas distâncias entre 300 e 400 m.

Figura 50 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às rodovias na transição da classe Manguezal para Urbano.

Figura 51 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Manguezal para Urbano.

Cunha-Lignon et al. (2009) analisaram a dinâmica natural e os impactos antrópicos ocorridos em áreas de manguezal no estado de São Paulo e descobriram que nos manguezais da Baixada Santista, especialmente na Ilha Barnabé, a construção de rodovia e ferrovia, a expansão portuária e a retificação de canal podem ter provocado a perda de extensas áreas de manguezal por aterros, alagamentos, cortes de vegetação e alterações da hidrodinâmica local. O desenvolvimento e a implantação do sistema de infraestrutura viária da região podem afetar os processos de manutenção e desenvolvimento de áreas estuarinas.

A distância com a classe urbano apresentou influência até 200 m nos dois primeiros períodos e até 300 m no último período, entre 2005 e 2013, e após essas distâncias, houve oscilações em torno do valor nulo do peso de evidência (Figura 52).

A proximidade às áreas construídas afeta a manutenção do ecossistema manguezal, sua hidrodinâmica local e, em muitos locais, provocam o aterramento de suas áreas.

Figura 52 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Manguezal para Urbano.

Na Figura 53, os valores de pesos de evidência com relação à distância à classe Campo agiu favorecendo a transição até, aproximadamente, 100 m e foi declinando e exercendo repulsão com o distanciamento da classe. De forma análoga, a classe Campo interfere na manutenção desse ecossistema, por representar a vegetação em degradação ou apresentar clareiras no dossel da vegetação, podendo também afetar seu microclima.

Figura 53 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Manguezal para Urbano.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Manguezal para a classe Urbano nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013, são apresentados nas Figuras 54, 55 e 56, respectivamente.

As áreas com maior probabilidade de transição estão localizadas próximas a Cubatão e São Vicente. Nos dois primeiros períodos, as transições estão associadas a ocupações irregulares sobre palafitas, nos manguezais. Nota-se que no último período, entre 2005 e 2013, a mudança foi na região da Ilha Barnabé, devido à construção do terminal da Embraport com o aterramento de vegetação de manguezal. Essa região chama atenção por apresentar ocupação na porção continental de Santos, onde estão projetados outros empreendimentos portuários.

Figura 54 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Urbano no período entre 1985 e 1995.

Figura 55 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Urbano no período entre 1995 e 2005.

Figura 56 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Urbano no período entre 2005 e 2013.

5.3.3 Transição de Campo para Urbano

A distância às vias secundárias considerou a proximidade até 50 m para influenciar essa transição (Figura 57), e seus valores de pesos de evidência foram decaindo com o afastamento a essas vias. Isso indica que essa transição apresenta alta probabilidade de ocorrência nas laterais das vias de acesso.

Figura 57 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Campo para Urbano

Outro fator, talvez mais decisivo para essa transição, está na distância à classe Urbano, a qual favoreceu essa transição até 100 m, e a partir dessa distância, passou a agir negativamente (Figura 58).

Figura 58 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Campo para Urbano.

A distância à classe Floresta tende a exercer ação negativa até 100 m de distância, sendo que a partir desse distanciamento, tende a favorecer esse tipo de conversão, e quanto mais distante à Floresta, maior é a conversão de campo para áreas construídas (Figura 59).

Figura 59-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Floresta na transição da classe Campo para Urbano.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Campo para a classe Urbano nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013, são apresentados na Figuras 60, 61 e 62, respectivamente.

Figura 60 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Urbano no período entre 1985 e 1995.

Figura 61 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Urbano no período entre 1995 e 2005.

Figura 62 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Urbano no período entre 2005 e 2013.

As regiões com maiores probabilidades de transição estão próximas às áreas urbanas, áreas de expansão das cidades, e o campo pode estar associado com a degradação das florestas, principalmente a conversão da vegetação de Restinga para a construção de residências, sobretudo em Praia Grande e Guarujá.

5.3.4 Transição de Solo para Urbano

As variáveis que influenciaram na transição da classe Solo para a classe Urbano estão representadas nos gráficos abaixo.

As vias secundárias agem positivamente nessa conversão até aproximadamente 100 m de distância no período entre 1985 e 1995, e seus valores passam a agir negativamente a partir dessa distância. Nos dois períodos subsequentes, os valores tornam-se negativos a partir de, aproximadamente, 60 m de distância, e decaem à medida que se distanciam das vias secundárias. Logo, a conversão de solo para urbano tem influência em distância próximas, na faixa entre

60 e 90 m, e a influência passa a ser menor quanto mais afastada das vias (Figura 63).

As vias secundárias dão acesso às outras vias mais importantes, como rodovias, e novas áreas contruídas são facilitadas com a presença das principais vias de acesso.

Figura 63 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Solo para Urbano.

A distância à classe Urbano age positivamente na conversão dessas classes apenas em distâncias próximas, até 100 m no período entre 1985 e 1995, e até 60 m nos últimos dois períodos (Figura 64). A partir dessas distâncias, a classe Urbano passa a agir negativamente na transição. Isso indica que o solo exposto pode ser indutor de novas áreas construídas.

Figura 64-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Solo para Urbano.

De maneira oposta, foi encontrado na distância à classe Manguezal influência negativa na conversão em distâncias até 250 m, e a partir daí, tenderiam a influenciar positivamente quanto mais distante dessa classe (Figura 65).

Figura 65-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Manguezal na transição da classe Solo para Urbano.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Solo para a classe Urbano nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 são apresentados nas Figuras 66, 67 e 68, respectivamente.

Figura 66 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Solo para Urbano no período entre 1985 e 1995.

Figura 67 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Solo para Urbano no período entre 1995 e 2005.

Figura 68 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Solo para Urbano no período entre 2005 e 2013.

No primeiro período, notou-se na região de São Vicente continental, Cubatão e Guarujá maiores probabilidades para essa transição. Nos dois últimos períodos, foi identificada uma pequena região em São Vicente, próxima à rodovia.

5.3.5 Transição de Água para Urbano

As variáveis explicativas para essa transição foram: distância até 200 m das vias secundárias, 150 m da classe Urbano, proximidade com os novos empreendimentos operacionais, principalmente representado pelo terminal da Embraport e da Brasil Terminal Portuário (BTP) (Figura 69).

Figura 69 - Valores de pesos de evidência em função das variáveis explicativas da transição Água para Urbano.

As categorias representadas pela variável dos novos empreendimentos operacionais são: 1 =Sem dado; 2=Empreendimentos para expansão de áreas de retroporto, em funcionamento no Guarujá; 3=Complexo portuário para expansão da Embraport e BTP; 4= Complexo portuário para expansão de petróleo e gás.

Os empreendimentos em expansão foram as principais mudanças constatadas nesse período, como empreendimentos construídos sobre o estuário, o BTP e o Terminal da Embraport. Essa variável apresentou valores positivos de pesos de evidência e foi determinante na transição da classe Água para Urbano, assim como também foi positiva na transição até, aproximadamente, 300 m de distância à variável dos novos empreendimentos operacionais.

Com relação a esses novos empreendimentos, em novembro de 2009, o BTP iniciou o processo de remediação ambiental sobre o antigo lixão na área da Alemoa, com resíduos provenientes principalmente do porto. Seus trabalhos foram concluídos em março de 2012, com investimentos de quase 2 bilhões de reais, e sua operação comercial se iniciou em agosto de 2013 (BTP, 2014).

Com relação ao Terminal da Embraport, a Empresa Brasileira de Terminais Portuários, este foi construído na margem esquerda do estuário com aterro de áreas de manguezais. Sua movimentação está prevista em aproximadamente 1,2 milhão de contêineres e 2 milhões de m³ de álcool por ano (SCAZUFCA, 2012). Em 2007, iniciaram-se as obras com a construção de um aterro-piloto para estudo do solo da região, e em 2010, as obras se intensificaram, finalizando-se em 2013, tendo sido o início das operações em julho do mesmo ano com a chegada do primeiro navio, o Mercosul Manaus (EMBRAPORT, 2014).

O aumento da atividade portuária em Santos, ou mesmo a modernização visando maior produtividade, implica em novos territórios operacionais, localizados primeiramente no canal de navegação do porto, próximos às áreas urbanizadas, ocupadas pelas cidades que abrigam a região portuária, e também áreas que ainda conservam alguma cobertura vegetal, geralmente manguezais (SCAZUFCA, 2012). Esses empreendimentos operacionais recentes, e ainda os projetos de expansão, foram utilizados para analisar o cenário simulado dessa paisagem em um horizonte de projeto no ano de 2024 (Seção 5.5.2).

O mapa de probabilidade de transição, no período entre 2005 e 2013 é apresentado na Figura 70.

Figura 70-Mapa de probabilidade referente à transição Água para Urbano no período entre 2005 e 2013.

5.3.6 Transição de Floresta para Campo

A distância às vias secundárias favoreceu a perda de áreas florestais e acréscimo de áreas de campestres em até, aproximadamente, 400 m de distância no período de 1985 a 1995, e até 200 m nos dois períodos subsequentes (Figura 71). Após essas distâncias, os pesos de evidência tenderam a valores negativos e não favoreceram esse tipo de transição.

Figura 71 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Floresta para Campo.

A distância à hidrografia apresentou influência positiva em até aproximadamente 1 km de distância em todos os períodos analisados (Figura 72). A influência foi semelhante na transição da classe Floresta para Urbano (até 1 km). Da mesma maneira, o estuário exerce pressão e explica a degradação de áreas florestais nessa região de estudo, demonstrando a particularidade do transporte hidroviário como indutor de mudanças.

Figura 72 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à hidrografia na transição da classe Floresta para Campo.

A distância à classe Urbano favoreceu a transição até 500 m de distância, mas passa a não influenciar quando se afasta dessa classe (Figura 73). Observa-se maior propensão para a transição de áreas florestais para campo do que para urbano em relação à distância à variável dinâmica da classe Urbano.

Figura 73 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Floresta para Campo.

A influência positiva em relação à classe Campo abrange a faixa entre 100 a 150 m de distância, e conforme se distancia, passa a não favorecer esse tipo de transição (Figura 74).

Dessa maneira, a classe Campo influencia a conversão de áreas florestais para a classe Campo quando próximas a ela. A classe Campo pode estar relacionada a regeneração da vegetação de corte raso, ou com vegetação rasteira,

representado também clareiras presentes em meio às áreas florestais. Essas últimas podem impedir a manutenção de vegetações florestais.

Figura 74 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Floresta para Campo.

Ressalta-se que a transição da classe Floresta para Campo representou na matriz de transição calculada para esse período uma grande área convertida de 2.315,52 hectares, representando 7% do total de áreas de floresta convertidas em 1985. A maior contribuição dessa mudança pode ser atribuída à presença de vias secundárias na região e às características da hidrografia navegável.

Os mapas de probabilidade de transição da conversão da classe Floresta para Campo nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 são apresentados nas Figuras 75, 76 e 77, respectivamente.

Figura 75 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Campo no período entre 1985 e 1995.

Figura 76 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Campo no período entre 1995 e 2005.

Figura 77 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Campo no período entre 2005 e 2013.

Os mapas de probabilidade de transição demonstram que a transição está ocorrendo em regiões próximas dos rios e rodovias. Verificou-se que até 1 km, a hidrografia favorece a transição, alterando áreas de floresta. A mesma tendência é observada para o período entre 2005 e 2013, porém mais localizadas em Praia Grande e Guarujá.

5.3.7 Transição de Manguezal para Campo

A distância às vias secundárias apresentou influência até 300 m nos dois últimos períodos, entre 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013. Nesses períodos, a transição ocorre em proximidades curtas com essas vias, e depois tende a não favorecer a mudança (Figura 78). Porém no primeiro período, a transição ocorre em distâncias superiores a 1 km e inferiores a 2km, possivelmente pela implantação de vias locais mais distantes ao Manguezal e expansão dessas vias, principalmente, em áreas de vegetação de Restinga.

Figura 78 - Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Manguezal para Campo.

A distância à classe Campo tem força positiva na mudança até 100 m de distância e decai à medida que se afasta dessa classe (Figura 79). A transição para a mesma classe Campo tem influência quanto mais próxima estiver da classe.

Figura 79 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Manguezal para Campo.

A distância à classe Urbano age positivamente para essa transição e decai à medida que se afasta dessa classe, em distâncias até 400 m nos períodos entre 1985 e 1995, e entre 2005 e 2013; no período entre 1995 e 2005 encontra-se influência apenas até 200 m de distância (Figura 80).

Figura 80-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Manguezal para Campo.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Manguezal para a classe Campo nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013, são apresentados nas Figuras 81, 82 e 83, respectivamente.

Figura 81 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Campo no período entre 1985 e 1995.

Figura 82 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Campo no período entre 1995 e 2005.

Figura 83- Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Campo no período entre 2005 e 2013.

As áreas com maior probabilidade de transição localizaram-se em Cubatão e São Vicente nos períodos entre 1985 e 1995, e entre 1995 e 2005, associadas com as instalações das indústrias de Cubatão no primeiro período, e com a expansão urbana em São Vicente no período seguinte. No último período, a localidade concentrou-se em São Vicente e Praia Grande, relacionado com a implantação de uma nova via de acesso local próximo ao Manguezal.

5.3.8 Transição de Floresta para Solo

As vias secundárias favorecem essa transição até aproximadamente 300 m de distância, e a partir dessa distância, a contribuição foi praticamente negativa (Figura 84). As rodovias nesse caso não indicaram nenhuma ação importante nessa conversão, uma vez que seus valores de pesos de evidência oscilaram em torno do valor nulo.

Figura 84- Valores dos pesos de evidência em função da distância às vias secundárias na transição da classe Floresta para Solo.

Nota-se que grande parte dos solos refere-se ao solo exposto úmido abrangendo grande extensão de áreas próximas ao estuário e ao manguezal existente. Por se tratar de uma imagem de 1985, não foi possível saber exatamente a extensão de áreas com solo de fato exposto, pois as informações acerca dos mapeamentos realizados na época tratavam apenas de áreas de manguezal degradado ou alterado, e por esse motivo, a imagem de satélite captou alterações no solo, podendo se referir às clareiras presentes nas vegetações de manguezal. De qualquer maneira, tratou-se essa classe como solo em exposição e não como cobertura arbórea. Em muitas investigações sobre crescimento e expansão urbana, o solo exposto pode indicar possíveis novas áreas urbanas a serem construídas.

Nota-se que a classe Urbano apresenta influência positiva nessa conversão até 300 m nos períodos analisados (Figura 85).

Figura 85-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Floresta para Solo.

A distância à classe Campo foi importante nessa transição até aproximadamente 100 m em todos os períodos (Figura 86). Apenas as conversões próximas da classe Campo apresentaram influência, podendo-se considerar uma tendência de degradação da vegetação herbácea-arbustiva para solo exposto.

Figura 86-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Floresta para Solo.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Floresta para Solo nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 são apresentados nas Figuras 87, 88 e 89, respectivamente.

Figura 87 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Solo no período entre 1985 e 1995.

Figura 88 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Solo no período entre 1995 e 2005.

Figura 89 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Floresta para Solo no período entre 2005 e 2013.

Os mapas de probabilidade de transição mostram que as localidades de mudança estão associadas com o arco das rodovias, dado pelos valores de pesos de evidência positivo na relação às vias secundárias, próximas a Cubatão e provável conversão de vegetação de Restinga em áreas de São Vicente.

5.3.9 Transição de Manguezal para Solo

A distância à classe Campo mostra que até 100 m de distância a influência é positiva para a transição (Figura 90). A classe Campo está associada com vegetação herbácea-arbustiva ou vegetação degradada e alterada, e isso indica que as áreas de manguezal próximas de áreas com vegetação rasteira também indicam fragilidade na conversão para solo exposto.

Figura 90 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Campo na transição da classe Manguezal para Solo.

A distância com a classe Urbano até 200 m influencia na transição (Figura 91), após essa distância, passa a não contribuir para essa mudança. Proximidades a áreas construídas têm influência na conversão de áreas ocupadas por vegetação de mangue para solo exposto, indicando degradação por aterramentos, suspensão do fluxo de água entre a vegetação de mangue ou outras causas diretamente relacionadas com a presença de áreas construídas.

Figura 91-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Manguezal para Solo.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Manguezal para a classe Solo nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 são apresentados nas Figuras 92, 93 e 94, respectivamente.

Figura 92 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Solo no período entre 1985 e 1995.

Figura 93 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Manguezal para Solo no período entre 1995 e 2005.

Figura 95 - Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Urbano na transição da classe Campo para Solo.

Nos períodos entre 1985 e 1995, e entre 2005 e 2013, os valores de pesos de evidência são positivos a partir dos 300 m de origem da classe Floresta, e quanto mais distante dessa classe, esse tipo de transição é favorecida (Figura 96).

No período entre 1995 e 2005, não foi encontrada associação com essa variável. Uma explicação plausível para a contribuição da variável "Distância à Floresta" na transição da classe Campo para Solo seria o fato de que as maiores distâncias representam áreas mais remotas, com acesso restrito ou inexistente, resultando na baixa propensão para esta transição.

Figura 96-Valores dos pesos de evidência em função da distância à classe Floresta na transição da classe Campo para Solo.

Os mapas de probabilidade de transição referentes à conversão da classe Campo para a classe Solo nos períodos entre 1985 e 1995, 1995 e 2005, e entre 2005 e 2013 são apresentados nas Figuras 97, 98 e 99, respectivamente.

Figura 97 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Solo no período entre 1985 e 1995.

Figura 98 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Solo no período entre 1995 e 2005.

Figura 99 - Mapa de probabilidade de transição referente à conversão da classe Campo para Solo no período entre 2005 e 2013.

As regiões com maiores probabilidades de transição estão em Cubatão. Uma associação com o histórico da instalação do polo industrial e petroquímico de Cubatão tornou a região mais frágil ambientalmente, com problemas na saúde pública e a intensificação dos processos erosivos na forma de escorregamentos. Em anos mais recentes, com o início dos programas de controle da poluição e de contenção das atividades industriais, há têm ocorrido melhor monitoramento ambiental e prevenção dos acidentes com cargas tóxicas (CETESB, 1991).

5.4 MAPAS SIMULADOS DA PAISAGEM PARA 1995, 2005, 2013

O algoritmo de validação implementado na plataforma Dinamica EGO gera índices de similaridade e mapas de similaridade correspondentes a distintos tamanhos de janela, como, por exemplo, 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11. Os métodos de avaliação com decaimento exponencial e decaimento constante foram aplicados aos modelos simulados de 1995, 2005 e 2013.

Além das análises dos índices de similaridade, foram avaliados os resultados dos mapas simulados em relação à sua correspondência aos mapas reais na

verificação da alocação das mudanças. Dessa maneira, foram gerados resultados com base na calibração de parâmetros internos (Apêndice B) do *software* na execução das simulações.

As avaliações dos mapas simulados gerados para os anos de 1995, 2005 e 2013 são apresentados nas Tabelas 23, 24 e 25, respectivamente, e os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 100 (b), 101 (b) e 102 (b) abaixo.

Tabela 23-Avaliação do resultado do modelo de simulação para o ano de 1995.

Tamanho da Janela	Decaimento exponencial		Decaimento constante	
	Mínima Similaridade	Máxima Similaridade	Mínima Similaridade	Máxima Similaridade
3	0,464	0,478	0,502	0,531
5	0,499	0,528	0,579	0,639
7	0,518	0,552	0,639	0,718
9	0,528	0,565	0,688	0,777
11	0,533	0,571	0,728	0,823

Tabela 24-Avaliação do resultado do modelo de simulação para o ano de 2005.

Tamanho da Janela	Decaimento exponencial		Decaimento constante	
	Mínima Similaridade	Máxima Similaridade	Mínima Similaridade	Máxima Similaridade
3	0,488	0,493	0,538	0,553
5	0,530	0,550	0,630	0,676
7	0,550	0,576	0,694	0,760
9	0,560	0,588	0,741	0,817
11	0,565	0,594	0,775	0,859

Tabela 25-Avaliação do resultado do modelo de simulação para o ano de 2013.

Tamanho da Janela	Decaimento exponencial		Decaimento constante	
	Mínima Similaridade	Máxima Similaridade	Mínima Similaridade	Máxima Similaridade
3	0,436	0,456	0,483	0,510
5	0,485	0,504	0,590	0,616
7	0,509	0,527	0,669	0,688
9	0,521	0,538	0,727	0,743
11	0,528	0,544	0,775	0,782

Em geral, os mapas simulados gerados obtiveram bons resultados na representação dos mapas temáticos, de acordo com as tabelas de avaliação e a comparação visual com mapeamentos obtidos pela classificação da imagem real.

Figura 100 - Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 1995 (a), mapa simulado para o ano de 1995 (b).

1995

Figura 101- Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2005 (a), mapa simulado para o ano de 2005 (b).

2005

Figura 102- Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2013 (a), mapa simulado para o ano de 2013(b).

2013

No caso do mapa simulado do ano de 2013, não foi possível prever todas as novas instalações portuárias finalizadas naquele ano. Esse resultado demonstra que

o intervalo de tempo não foi suficiente para o modelo descrever esses novos empreendimentos instalados. No referido mapa simulado para 2013, o arquivo de pesos de evidência com os novos empreendimentos operacionais rodado no *software* Dinamica EGO é lido a partir do sexto ano da simulação, ou seja, a partir de 2010, sendo que o último ano, é o nono da simulação. Apenas 3 passos para gerar o modelo foi curto para representar as novas mudanças decorrentes da implantação de áreas construídas em função da conversão da classe Água.

Elevou-se também esses valores específicos do arquivo de pesos de evidência, mas, novamente, o intervalo de tempo foi curto para prever essas mudanças sobre o estuário. Uma alternativa pode ser a inserção de uma nova matriz de transição intensificando a transição da classe Água para a classe Urbano, no período entre 2010 e 2013.

Dessa maneira, optou-se por gerar modelos de prognósticos para um intervalo que permitisse projetar os empreendimentos em um intervalo de tempo maior, ou seja, um cenário futuro para o ano de 2024, referenciando o ano de 2013 como tempo inicial.

5.5 MODELOS DE PROGNÓSTICOS

A simulação do cenário para o ano de 2024 produziu mapas da paisagem, incorporando, além das variáveis explicativas das mudanças apresentadas no último período de simulação (2005 a 2013), o arquivo de pesos de evidência gerados considerando os empreendimentos operacionais (Apêndice C), a aplicação do ZEE-BS (Apêndice D), os novos empreendimentos projetados (Apêndice E) e a variável distância aos novos empreendimentos projetados (Apêndice F).

No modelo estacionário para 2024, consideraram-se as mesmas condições socioeconômicas e ambientais atuantes, além de ter sido gerado mapas da paisagem com a expansão de instalações portuárias conforme previstas nos Planos de Zoneamento do Porto de Santos (2006 e 2009).

5.5.1 Modelo estacionário para 2024

Foram considerados os parâmetros do último período entre 2005 e 2013, tais como a matriz de transição, tamanho médio e variância das manchas, índice de

isometria, parâmetros de *patcher* e *expander*. Estendeu-se o período de simulação em onze anos, considerando como tempo inicial o mapeamento de cobertura da terra do ano de 2013.

Como resultado, a saída do modelo simulado para 2024 é apresentado na Figura 103.

Nota-se expansão de áreas construídas, representadas pela classe Urbano, com tendência de crescimento a partir de áreas já consolidadas. Não se previram novas manchas da classe Urbano, e a ocupação deu-se, principalmente, na substituição da classe Campo.

De acordo com a Tabela 26, resultado da quantificação das classes em área (ha) e a diferença entre os períodos em percentuais, é possível verificar a perda de áreas da classe Campo em 11,99%, ocorrendo também decréscimo da classe Floresta (2,37%), Manguezal (4,57%) e Água (5,07%). O acréscimo de áreas está na classe Urbano (11,75%) e Solo (7,31%).

Tabela 26-Quantificação das classes em área (ha), e a diferença entre os períodos (em percentuais).

Ano	2013	2024	2013-2024
Classes	Área (ha)	Área (ha)	(%)
Urbano	17323,74	19358,82	11,75%
Floresta	28378,89	27705,06	-2,37%
Manguezal	5070,96	4839,3	-4,57%
Campo	9123,93	8030,25	-11,99%
Solo	2912,4	3125,34	7,31%
Água	4905,18	4656,33	-5,07%

Figura 103-Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2013 (a), e resultado do modelo estacionário simulado para o ano de 2024(b).

A expansão urbana foi projetada para ocorrer em função de áreas já ocupadas, onde há infraestrutura implantada. Esse perfil relaciona-se com o fenômeno que já vem correndo, que é a valorização dos imóveis apresentados nas

idades vizinhas, principalmente em Praia Grande, Guarujá e até Bertioga, em decorrência da implantação de serviços e alocação de pessoal do Porto de Santos e do desenvolvimento das áreas do Pré-Sal.

Um suposta quantificação anual das áreas da classe Urbano, em hectares, é apresentada na Tabela 27.

Ao se trabalhar com simulação por passos anuais, deve-se considerar que essa quantificação é fictícia e não corresponde à realidade, uma vez que opera com taxas de transição constantes ao longo do período.

Tabela 27 - Quantificação anual da classe Urbano (área construída) em hectares (ha) para o modelo estacionário.

Modelo estacionário	
Ano	Área (ha)
2014	17514
2015	17703,27
2016	17891,46
2017	18078,57
2018	18264,69
2019	18449,64
2020	18633,6
2021	18816,48
2022	18998,28
2023	19179,09
2024	19358,82

5.5.2 Modelo com expansão portuária para 2024

O tamanho médio, variância das manchas, índice de isometria e os parâmetros das funções “*patcher*” e “*expander*” utilizados para a simulação do mapa da paisagem de 2013 foram também adotados para as simulações futuras. Foi gerada uma nova matriz de transição para quantificar as novas áreas construídas para 2024, vislubrando as novas instalações portuárias provenientes dos empreendimentos projetados, sendo que um novo arquivo de pesos de evidência foi gerado para essa nova variável (Apêndices C e E).

Para as outras transições não-urbanas, considerou-se as mesmas quantidades de mudanças, ou matriz de transição do último período calculado (entre

2005 e 2013), pois não houve alteração em seus valores. A nova matriz de transição é apresentada na Tabela 28.

Tabela 28- Matriz de transição de múltiplos passos (em percentuais) no período entre 2013 e 2024.

Período: 2013-2024	Matriz de transição de múltiplo passo (percentuais)		
De/Para	Urbano	Campo	Solo
Floresta	0,14%	0,16%	0,04%
Manguezal	0,26%	0,30%	0,10%
Campo	1,23%	-	0,60%
Solo	2,19%	-	-
Água	0,17%	-	-

De acordo com a Tabela 28, a classe Solo e Campo são as principais classes a contribuir com o aumento da classe Urbano, em 2,19% e 1,23%, respectivamente, em cada passo de tempo. Nota-se que a classe Manguezal apresentou 0,26% de suas áreas também convertidas para a classe Urbano em passos anuais.

A Tabela 29 mostra o resultado da quantificação das classes em área (ha) e a diferença entre os anos, em percentuais. Nota-se a perda de áreas da classe Campo em 11,80%, decréscimo da classe Floresta (3,73%), Manguezal (6,96%) e Água (1,81%). O acréscimo de áreas está na classe Urbano (14,62%) e Solo (1,57%).

Tabela 29-Quantificação das classes em área (ha), e a diferença entre os períodos em percentuais.

Ano	2013	2024	2013-2024
Classes	Área (ha)	Área (ha)	(%)
Urbano	17323,74	19856,07	14,62%
Floresta	28378,89	27319,05	-3,73%
Manguezal	5070,96	4717,89	-6,96%
Campo	9123,93	8047,44	-11,80%
Solo	2912,4	2958,03	1,57%
Água	4905,18	4816,62	-1,81%

A simulação do cenário para o ano de 2024, com os novos empreendimentos projetados, é apresentado na Figura 104 como mapas da paisagem de 2024.

É possível verificar a ocupação de áreas construídas devido à instalação de novos empreendimentos, principalmente próximo à região estuarina e na porção continental de Santos, Guarujá, Cubatão e São Vicente, ocorrendo nas proximidades das principais vias de acesso, como as rodovias.

Figura 104-Mapeamento de cobertura da terra realizado na imagem do ano de 2013 (a), e resultado do modelo simulado considerando novos empreendimentos projetados para o ano de 2024(b).

A Tabela 30 apresenta uma suposta quantificação anual da classe Urbano em área (ha) anuais de acordo com o modelo simulado com novos empreendimentos projetados.

Tabela 30-Quantificação anual da classe Urbano (área construída), em hectares (ha), para o modelo simulado considerando novos empreendimentos projetados.

Ano	Área (ha)
2014	17560,71
2015	17796,33
2016	18030,6
2017	18263,43
2018	18495,09
2019	18725,22
2020	18954,09
2021	19181,52
2022	19407,69
2023	19632,51
2024	19856,07

Esse modelo simulado apresentou áreas com potencial de atração de novos empreendimentos, alguns verificados em processo de licenciamento ambiental, e estão relacionados com as futuras tendências para a região portuária de Santos nos próximos anos.

Além dos terminais de petróleo projetados para a região, são destaques também as instalações dos terminais retroportuários, os quais apresentam importante papel diante da containerização das mercadorias. Desenvolvem-se nessas áreas atividades logísticas do transporte portuário, como depósito de contêineres ou de mercadorias, estoque, atividades de fiscalização e controle, além de pequenas operações de beneficiamento das mercadorias, viabilizando (devido à falta de áreas junto aos cais) e agilizando a movimentação dos terminais de contêineres (SCAZUFCA, 2012).

Também por estarem restritos quanto aos requisitos locacionais por não necessitam estarem justapostos ao canal de navegação, mas somente próximos à operação portuária, ou mesmo distantes desde que com fácil acesso, estes terminais têm se espalhado nas áreas urbanas ou junto a estas em grande parte do território dos municípios da parte central da Baixada, juntamente com o arco viário metropolitano (SCAZUFCA, 2012).

Os modelos simulados permitem a visualização dessa tendência de crescimento das áreas construídas e da expansão portuária, além da quantificação hipotética de suas áreas permitir trabalhar com a simulação por passos anuais.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa, foi possível gerar modelos dinâmicos espaciais da região portuária da Baixada Santista e investigar a relação entre as mudanças apresentadas na cobertura da terra e a infraestrutura de transportes, em especial, a influência das vias secundárias. Foram utilizadas as imagens de média resolução espacial na geração de mapas de cobertura da terra para a identificação das mudanças temporais. A partir desses mapas de cobertura e da técnica de modelagem dinâmica espacial, foram gerados mapas simulados e cenários de prognósticos, com e sem projetos de expansão portuária.

O uso das imagens de satélite LANDSAT possibilitou a identificação das classes de cobertura da terra em escala regional para análise das mudanças temporais na região que compreende a Baixada Santista, especialmente no entorno da região portuária de Santos.

A classificação das imagens de satélite permitiu a obtenção dos mapas de cobertura da terra, como mapas da paisagem referentes aos passos de tempo inicial e final, utilizados na construção dos modelos dinâmicos. A metodologia de classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança viabilizou o mapeamento da classe Manguezal. Em contrapartida, o uso da técnica não-supervisionada ISODATA não permitiu essa distinção, apresentando como principal problema a presença de diversos *pixels* isolados (efeito “*salt-and-pepper*”).

As classes Campo e Solo foram as categorias que mais contribuíram para o aumento da classe Urbano. As classes de vegetação, tanto Floresta quanto Manguezal, apresentaram redução em suas áreas, ainda que em taxas menores em relação ao último período (entre 2005 e 2013). Contudo, a área ocupada por manguezais não é extensa, sendo apenas 5.070,96 hectares em 2013, o que representa apenas 7% área total de estudo.

É importante considerar que a seleção de variáveis explicativas utilizadas para cada tipo de transição deve ser orientada com base nas condicionantes atuantes da dinâmica territorial na área de estudo. E deve-se compreender o histórico territorial em períodos de tempo, não muito longos, que viabilizem a simulação sem que as forças direcionadoras das mudanças mudem nesse intervalo.

Diante dos resultados, as variáveis explicativas relacionadas à distância às vias secundárias e à distância à classe Urbano foram as que apresentaram valores

de pesos de evidência positivo nas transições, com reconhecida influência em distâncias até 300 m das vias secundárias e até 500 m da classe Urbano. Porém, na transição da classe Campo para Urbano, a distância às vias secundárias teve sua influência restrita a até 50 m das mesmas, e seus valores foram decaindo com o afastamento das vias. Outro fator, talvez mais decisivo para essa transição, está na distância à classe Urbano, que contribuiu para essa transição em até 100 m, e a partir dessa distância, passou a agir negativamente. A proximidade às áreas urbanas passa a ser um fator de atração para a conversão de campo em urbano. Resultados semelhantes foram verificados na transição da classe Solo para Urbano, com influência em função da distância das vias secundárias, na faixa entre 60 e 90 m.

Os mapas simulados de 1995 e 2005 foram semelhantes aos mapeamentos temáticos da cobertura da terra reais e apresentaram boa avaliação. Importante ressaltar que apenas o mapa simulado de 2013 não previu as novas instalações portuárias, mesmo com a simulação rodando com a variável de novos empreendimentos operacionais em curto intervalo de tempo.

O modelo estacionário para o ano de 2024 mostrou a expansão de áreas construídas em substituição, sobretudo, às áreas de campo. Não houve expansão de novas manchas de áreas construídas e isso condiz com a tendência de expansão de áreas urbanas seguindo as áreas já consolidadas e com infraestrutura implantada.

Com relação à modelagem considerando os projetos de expansão do porto, é possível verificar as principais tendências de ocupação das áreas construídas, muitas vezes em regiões ocupadas com vegetação de manguezal, representando a fragilidade desse ecossistema frente à implantação dos novos empreendimentos. O crescimento das áreas construídas, com os projetos de expansão, segue o sistema viário existente e proximidade com o canal estuarino. Isso demonstra a tendência da instalação de novas instalações em função das atividades portuárias, ligadas à circulação de mercadorias e da infraestrutura implantada para o transporte de navegação e terrestre.

Foi possível calcular uma taxa de crescimento anual fictícia das áreas construídas e gerar mapas simulados de paisagem futura com e sem os projetos de expansão. Esses mapas podem ser especialmente úteis para o acompanhamento

das mudanças quando da implantação de um novo empreendimento na região, para fins de planejamento viário, logístico, ambiental etc.

Os atuais planos diretores já preveem a expansão de alguns desses projetos em direção, principalmente, à área continental, o que representa atualmente, e representará em um futuro próximo, muitos dos conflitos a serem remediados entre os planos de desenvolvimento ligados à expansão portuária e à preservação das áreas florestais.

Dessa forma, o trabalho procura fornecer diretrizes para o monitoramento dessas áreas através do desenvolvimento de modelos de simulação e geração de cenários pela técnica de modelagem dinâmica espacial. Foi possível o desenvolvimento de modelos dinâmicos espaciais, mostrando as principais tendências de ocupação das áreas construídas. Porém, a construção do modelo com suas variáveis de entrada e parâmetros, não se mostrou adequado para mostrar as consequências para as outras classes não-urbanas de cobertura da terra decorrentes da implantação de novos empreendimentos, sendo que essas classes de cobertura analisadas seguiram a tendência estacionária. Não é um problema do modelo em si, mas sim das suas variáveis de entrada e parâmetros, os quais, devidamente ajustados, poderiam retratar implicações não-estacionárias nessas classes não-urbanas.

Como recomendação relacionada à técnica de classificação de imagens, outras metodologias podem ser aplicadas na classificação das mesmas, como as que utilizam a segmentação de imagens e a análise baseada em objeto.

E para futuros estudos com modelagem dinâmica da paisagem, é recomendável a utilização de imagens com resoluções espaciais maiores que possibilitem a identificação dos usos da terra, bem como a consideração das diretrizes de ocupação contidas nos atuais planos diretores municipais. A concepção de cenários distintos podem ser utilizados como indícios da tendência da ocupação da região, e os mapas simulados podem ser desenvolvidos de forma a integrar os distintos planos de gestão territorial.

Os mapas simulados também podem ser integrados com variáveis de projeções econômicas, que caracterizem o desenvolvimento portuário e as demandas por áreas de ocupação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFIFY, H. A. Evaluation of change detection techniques for monitoring land-cover changes: A case study in new Burg El-Arab area. **Alexandria Engineering Journal**, v. 50, p. 187-195, 2011.

AFONSO, C. M. Transformação Ambiental e Paisagística na Baixada Santista, SP. **Paisagem Ambiente: ensaios**, n. 20, p. 85 – 130, 2005.

AHMED, B.; AHMED, R. Modeling Urban Land Cover Growth Dynamics Using Multitemporal Satellite Images: a Case Study of Dhaka Bangladesh. **International Journal of Geo-Information**, v. 1, p. 3-31, 2012.

ALBIN, P. S. The analysis of complex socioeconomic systems. Lexington, MA: D. C. Heath, 1975.

ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba- SP**. 2004. 351p.Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

ALMEIDA, C. M. Modelos Celulares de Dinâmicas Espaço-Temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. 2007. 1ª ed. Brasília: EMBRAPA, 2007, v. 1, p. 445-496.

ALMEIDA, C. M.; BATTY, M. MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Stochastic cellular automata modelling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, p. 481-509, 2003.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Modelos de simulação e prognósticos de mudanças de uso do solo urbano: instrumento para o subsídio de ações e políticas públicas urbanas. 2005a. In: **XI Encontro Nacional de pós-graduação e pesquisa em planejamento urbano e regional (ANPUR)**, Bahia. 2005a.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L.; BATTY, M. 2005b. GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 4, p. 759-774, 2005b.

ANDERSON, J.R; HARDY, E.E.; ROACH, J. T.; WITMER, R.E. **Sistema de classificação de uso da terra e do revestimento do solo para utilização com dados de sensores remotos**. Tradução de Harold Strang. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 78p.

ARAÚJO, C. A. S. **Aplicações de técnicas de Sensoriamento Remoto na análise multitemporal do ecossistema manguezal na Baixada Santista, SP**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2010.

ARONOFF, S. **Remote Sensing for GIS Managers**. California: Esri Press, 2005. 487 p.

BAJOCCO, S. ANGELIS, S. De.; PERINI, L.; FERRARA, A.; SALVATI, L. The impact of Land use/ Land cover changes on Land Degradation Dynamics: a Mediterranean Case Study. **Environmental Management**, v. 49, p. 980-989, 2012.

BERBEROGLU, S.; AKIN, A. Assessing different remote sensing techniques to detect land use/ cover changes in the eastern Mediterranean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, p. 46-53, 2009.

BIRO, K.; PRADHAN, B.; BUCHROITHNER, M.; MAKESCHIN, F. Land use/ Land Cover Change analysis and its impact on soil properties in the northern part of Gadarif Region, Sudan. **Land Degradation & Development**, v.24, p. 90-102, 2013.

BONHAM-CARTER, G. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. New York: Pergamon, 1994. 414p.

BRASIL, **Lei nº 12.815, de 05 de junho de 2013**. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm>. Acesso em: 05 Maio de 2013.

BRASIL, **Lei nº 8.630, de 25 de fevereiro de 1993**. Dispõe sobre o regime jurídico da exploração dos portos organizados e das instalações portuárias e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8630.htm>. Acesso em: 05 de Maio de 2013.

BRASIL. **Decreto nº 4333, de 12 de Agosto de 2002**. Regulamenta a delimitação das áreas do Porto Organizado de Fortaleza, Santos e Vitória, suas instalações, infraestrutura e planta geográfica. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4333.htm>. Acesso em: 05 Ago 2013.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches**. 2000. Tese (Doutorado), University of Aegean, Greece. Disponível em <<http://www.rri.mvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.html>>. Acesso em: 23 maio. 2013.

BTP. **Brasil Terminal Portuário**. Disponível em: <<http://www.btp.com.br/en/conheca-a-btp/quem-somos/>>. Acesso em: 04 Out de 2014.

CAETANO, M.; SANTOS, T.; GONÇALVES, L. Cartografia de ocupação do solo com imagens de satélite: estado da arte. In: Encontro Nacional de Utilizadores de

Informação Geográfica, 7, 2002. In: **Anais do Encontro Nacional de Utilizadores de Informação Geográfica**, 7, 2002. Lisboa, Portugal.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: integrating remote sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. *Computers and Graphics*, v. 15, n. 6, p. 13-22, 1996.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 1985. **Baixada Santista: memorial descritivo, carta do meio ambiente e de sua dinâmica**. São Paulo: CETESB, 1985. 33p.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 1991. **Avaliação do estado de degradação dos ecossistemas da Baixada Santista**. São Paulo: CETESB, 1991, 45p.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Baixada Santista: Estudos de Manguezais**. São Paulo: CETESB, 1983. 116p.

CHEN, L.; NUO, W. Dynamic simulation of land use changes in port city: a case study of Dalian, China. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v.96, p. 981-992, 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. Editora Egdard Blucher Ltda, 1999. 236p.

CINTRON, G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. **Introducción a la ecología del manglar**. Montevideu: UNESCO-ROSTLAC, 1983. 109p.

CODESP. Companhia Docas do Estado de São Paulo. **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Santos PDZ**. 2006. Disponível em<<http://www.portodesantos.com.br/pdzps.php>>. Acesso em: 02 Nov. 2013.

CODESP. Companhia Docas do Estado de São Paulo. **Plano de Desenvolvimento e Expansão do Porto de Santos PDEPS**. 2009. Disponível em<<http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/relacoes-internacionais/arquivos/relatorio-final-plano-diretor-bid.pdf>>. Acesso em: 05 Jun. 2014.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20, 37-46, 1960.

CONGALTON, R. G. A Review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing Environment**, v. 37, p. 35-46, 1991.

COSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v.47, n. 3, p.199-215, 1989.

COUCLELIS, H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. **Environment and Planning B**, v.24, pp. 165–174, 1997.

CUNHA-LIGNON, M.; MENGHINI, R.P.; SANTOS, L.C.M.; NIEMEYER-DINÓLA, C.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Estudos de Caso nos Manguezais do Estado de São Paulo (Brasil): Aplicação de Ferramentas com Diferentes Escalas Espaço-Temporais. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 1, p. 79-91, 2009.

DER. **Departamento de Estradas de Rodagem**. Base de dados do DER. São Paulo, 2001.

EASTMAN, J. R.; EMANI, S.; HULINAS, S.; JIANG, H.; JOHNSON, A. D.; RAMACHANDRAN, M. **Application of Geographic Information Systems (GIS) technology in environmental risk assessment and management**. Worcester, Mass, Clark University, Idrisi Project, 1997.

EMBRAPA. 2013. EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 10 ago. 2013.

EMBRAPORT. **Empresa Brasileira de Terminais Portuários**. Disponível em: <<http://www.terminalembraport.com.br/a-embraport/historia/>>. Acesso em: 04 Out 2014.

ERENER, A.; DUZGUN, S.; YALCINER, A. C. Evaluating land use/ cover change with temporal satellite data and information systems. **Procedia Technology**, v. 1, p. 385-389, 2012.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128p.

GIRARD, M. C.; GIRARD, C. M.; VENKAT, R. **Processing of remote sensing data**. Lisse: A. A. Balkema, 2003. 486 p.

GOODACRE, C.M., BONHAM-CARTER, G.F., AGTERBERG, F.P.; WRIGHT, .D.F. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, p.205-305. 1993.

GUAN, D., LI, H., INOHAE, T., SU, W.; NAGAIE, T.; HOKAO, K.. Modelling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 20-22, p. 3761- 3772, 2011.

HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Science**, v. 17, n. 3, p. 235-249, 2003.

HERZ, R. **Manguezais do Brasil**. São Paulo, Unversidade de São Paulo: Instituto Oceanográfico, 1991. 247p.

HEUMANN, B, W. Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities. **Progress in Physical Geography**. v. 35, n. 1, p. 87–108, 2011.

HILBERT, K. W. Land Cover Change within the Grand Bay National Estuarine Research Reserve: 1974-2001. **Journal of Coastal Research**, v. 22, n 6, p. 1552-1557, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1985. Bases e referenciais. Disponível em:< <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/cartas>>. Acesso em: 13 fev. 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2006. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 2ª ed. Rio de Janeiro, n. 7, 2006.

INOUE, C. E. N. **Modelagem dinâmica espacial e os impactos de mudanças globais: cenários de ocupação no litoral norte de São Paulo**. 2012. 100p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2012.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Catálogo de imagens. São José dos Campos, SP. 2014. Disponível em:< <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

IWAI, O. K.; QUINTANILHA, J. A. Utilização de imagens de satélite como ferramenta de auxílio ao planejamento urbano. **Revista de Geografia Norte Grande**, n. 34, p. 65-82, 2005.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing : a remote sensing perspective**. 3ª ed. Ed. Upper Saddle River, N.J. Pearson Prentice Hall, 2005. 526 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos Neves Epiphany et al., São José dos Campos: Editora Parêntese, 2009. 598 p.

JIN, S.; YANG, L.; DANIELSON, P.; HOMER, C.; FRY, J.; XIAN, G. A comprehensive change detection method for updating the National Land Cover Database to circa 2011. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 159-175, 2013.

KARA, B.; ESBAH, H.; DENIZ, B. Monitoring and analysing Land Use/Land Cover Changes in a developing coastal town: a case study of Kusadasi, Turkey. **Journal of Coastal Research**, v. 29, n. 6, p. 1362-1372. 2013.

KIEL, R. **Deteção de mudanças no uso e na cobertura do solo em uma série temporal de imagens da região da campanha do Rio Grande do Sul**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

KUMAR, T. S.; MAHENDRA, R. S. NAYAK, S.; RADHAKRISHNAN, K.; SAHU, K. C. Identification of hot spots and well managed areas of Pichavaram mangrove using LANDSAT TM and Resourcesat – Liss IV: an example of coastal resource

conservation along Tamil Nadu Coast, India. **Journal Coastal Conservation**, v.16, p 1-12, 2012.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categoriacal data. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**. Tradução de KUX, H. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.151p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 5ª ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2004. 764p.

LIU, Y. **Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009. 188 p.

LU, D.; MAUSEL, P.; BROZNDÍZIO, E.; MORAN, E. Change detection techiques. International. **Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p.2365–2407, 2004.

LUNA, F.; COSTA, I. N. A Estrada e o Desenvolvimento Econômico: a Estrada São Paulo-Santos, Anais do IX Simpósio Nacional da Associação dos Professores Universitários de História – Tema: O Homem e a Técnica, São Paulo, Vol. II, ANPUH, p. 551 – 567, 1979.

LUNETTA, R. S.; JOHNSON, D. M.; LYON, J. G.; CROTWELL, J. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, p. 444-454, 2004.

MACHADO, I. S. **O Porto de Santos e a Revolução dos Contêineres**. 2012. 165p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2012.

MELLO, A. Y. I; DIOGENES, S. A.; LINHARES, C. A.; LIMA, F. B. Avaliação de técnicas de classificação digital de imagens LANDSAT em diferentes padrões de cobertura da terra em Rondônia. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 537-547, 2012.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente**. 2012. I3geo. Disponível em:<
<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 05 abr. 2013.

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.

MORAIS, A. C. R. **Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do Litoral Brasileiro**. 2ed. São Paulo: Annablume, 2007. 232p.

MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte: ed. Da autora, 2003. 294 p.

MUNTHALI, K.; MURAYAMA, Y. Land use/ cover change detection and analysis for Dzalanyama forest reserve, Lilongwe, Malawi. **Procedia Social and Behavioral Science**, v. 21, p. 203-211, 2011.

NOVAES, M. R. **Análise da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelagem dinâmica espacial**. 2010. 155p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ª ed. São Paulo: Ed Blucher, 2008. 363p.

OHATA, A. T.; QUINTANILLA J. A. O uso de algoritmos de clustering na mensuração da expansão urbana e detecção de alterações na Região Metropolitana de São Paulo. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia - GO. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia: INPE, 2005. p.647–655.

PINTO, N. N.; ANTUNES, A. P. Cellular automata and urban studies: a literature survey. **Architecture, City and Environment**, v. 1, n. 3, p. 368-399. 2007

PINTO, P, M, F. **Sistema de apoio à gestão das zonas costeiras: aplicação de um modelo para simulação do crescimento urbano no trecho Ovar-Mira**. 2008. 112 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

POFFO, I. R. F. **Gerenciamento de riscos socioambientais no complexo portuário de Santos na ótica ecossistêmica**. 2007. 147p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

QUARTAROLI, C. F.; CRISCUOLO, C.; HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M. **Alterações no Uso e Cobertura das Terras no Nordeste do Estado de São Paulo no período de 1988 a 2003**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2006.

ROSSETTI, L. A. F.; ALMEIDA, C. M.; PINTO, S. A. F. Análise de mudanças no uso do solo urbano e rural com a aplicação de modelagem dinâmica espacial. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR**, Foz do Iguaçu: 2013. p. 6317-6323. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0750.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

ROSSITER, D.G. **Technical Note: Statistical methods for accuracy assesment of classified thematic maps**. International Institute for Geoinformation Science & Earth Observation (ITC). 2004.

SANTOS, A. L. G. dos. **Manguezais da Baixada Santista: alterações e permanências (1962-2009)**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009. 169 p.

SÃO PAULO. **Lei complementar nº 815, de 30 de julho de 1996.** Cria a Região Metropolitana da Baixada Santista e autoriza o Poder Executivo a instituir o Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana da Baixada Santista, a criar entidade autárquica a construir o Fundo de Desenvolvimento Metropolitano da Baixada Santista, e dá providências correlatas. Disponível em: <
http://www.emtu.sp.gov.br/Sistemas/legislacao/categorias/regioes%20metropolitanas/1996_leicomp815.htm>. Acesso em: 15 Abr. 2013.

SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Áreas especialmente protegidas.** 2006. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Coordenadoria de Planejamento Ambiental Estratégico e Educação Ambiental, texto José Flávio de Oliveira; Ana Fernandes Xavier; Hiede Luciana dos Santos, São Paulo: SMA/CPLEA, 2006. Coletânea de Leis e Mapas 1 CD-ROM.

SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Zoneamento Ecológico-Econômico da Baixada Santista.** 2013. Disponível em:<
<http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/zoneamento/zoneamento-ecologico-econômico/baixada-santista/>>. Acesso em: 17 Abr. 2014.

SÃO PAULO. Secretaria de Planejamento e desenvolvimento Regional. **Caracterização socioeconômica de São Paulo - Região Metropolitana da Baixada Santista.** 2011. 69 p. Disponível em:
 <http://www.planejamento.sp.gov.br/noti_anexo/files/uam/trabalhos/RMBS.pdf>
 Acesso em: 05 fev. 2014.

SATAPATHY, D. R.; KRUPAMDAM, R. J.; KUMAR, L. P.; WATE, S. R. The application of satellite data for the quantification of mangrove loss and coastal management in the Godavari estuary, East Coast of India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.134, n. 1, p.453-469, 2007.

SCAZUFCA, M. **A primazia do Porto de Santos no cenário portuário nacional no período contemporâneo.** Determinantes logísticos, territoriais e de gestão. 2012. 378 p. Tese (Doutorado)- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. **Manguezal, ecossistema entre a terra e o mar.** Caribbean Ecological Research. São Paulo, 1995. 64 p.

SHIMABUKURO, Y. E.; ALMEIDA-FILHO, R.;KUPLICH, T. M.; FREITAS, R. M. de. Mapping and monitoring land cover types in Corumbiara área, Brazilian Amazônia, using LANDSAT TM and JERS-1 SAR multitemporal data. **Revista Ambiente Água**, v. 3, n. 1, 2008.

SILVA, C. A. M. Riscos ambientais em zonas costeiras da Baixada Santista. In: **XVII Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, 2010, Caxambu, MG.

SINGH, A.K. **Modelling Land Use Cover Changes Using Cellular Automata in a Geo-Spatial Environment.** Dissertação (Mestrado). 2003. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. 2003.

SKLAR, F.H., COSTANZA, R. **The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis**. In: TURNER, G.M., GARDNER, R.H. (Eds.), *Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analyses and Interpretation of Landscape Heterogeneity*. New York: Springer, 1990. p. 239-288.

SOARES, L. F. G. **Modelagem e simulação discreta de sistemas**. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1992. 250 p.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. DINAMICA- A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v.154, p. 217- 235. 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. Tradução de LIMA, L. S. **Modelagem de dinâmica Ambiental com DINAMICA EGO**. Centro de Sensoriamento Remoto. 2009. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Disponível em: < <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

SOARES-FILHO, B. S.; ALENCAR, S.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, M. D. C. V.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.; VOLL, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, v. 10, p. 745-764. 2004.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. **Megadiversidade**, v. 3, n. 1-2, p. 74-86, 2007.

SPALDING, M.; KAINUMA, M.; COLLINS, L. **World Atlas of Mangroves**. London: Earthscan. 2010.

TEIXEIRA, A. M. G.; SOARES-FILHO, B. S.; FREITAS, S. R.; METZGER, J. P. Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: Implications for conservation. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 4, p. 1219-1230, 2009.

TENG, S. P.; CHEN, Y. K.; CHENG, K. S.; LO, H. C. Hypothesis-test-based landcover change detection using multitemporal satellite images: a comparative study. **Advances in Space Research**, v. 41, p.1744–1754, 2008.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. 2004.

VARJABEDIAN, R. 1995. Impactos sobre os manguezais. In: SCHAEFFER-NOVELLI, Y, et al. **Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar**. São Paulo: Caribbean Ecological Research. 1995. p 49-53.

VERBURG, P. H.; SCHOT, P. P.; DIJST, M J.; VELDKAMP. A. Land Use change modeling: current practice and research priorities. **GeoJournal**, v.61, p. 309-324, 2004.

VERBURG, P.H., OVERMARS, K.P., HUIGEN, M.G.A., de GROOT, W.T., VELDKAMP, A. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. **Applied Geography**, v.26, p.153–173, 2006.

WANG, Z. ; YIN, Q. Monitoring Land Use Changes Using LANDSAT Data in Nanjing During 1988-2007. **Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE)**, p. 483 – 486. 2011.

WEBER, C. Object oriented approaches to image analysis. In: **Report of the expert group meeting on slum identification and mapping**. Netherlands, 2008. p.7.

Disponível

em: http://www.ciesin.columbia.edu/confluence/download/attachments/39780353/EGM_slum_mapping_report_final.pdf?version=1&modificationDate=1227107457000&api=v2. Acesso em: 14 jan. 2014.

WOLFRAM, S. **Statical Mechanics of Cellular Automata**. 1983. In: WOLFRAM, S. Cellular automata and complexity: collected papers. 1994. Addison-Wesley Publishing Company.

YU, H.; HE, Z.; PAN, X. Wetlands shrink simulation using Cellular Automata: a case study in Sanjiang Plain, China. **Procedia Environmental Sciences**, v. 2, p. 225-233, 2010.

ZÜNDT, C. **Baixada Santista: uso, expansão e ocupação do solo, estruturação de rede urbana regional e metropolização**. In: CUNHA, J. M. P. (Org.). Novas Metrópoles Paulistas - População, vulnerabilidade e segregação. 1. ed. Campinas: Núcleo de Estudos de População, 2006, v. 1.

Tabela 32 - Seleção de variáveis explicativas para o período entre 2005 e 2013.

Transição/ Variável	Flor> Urb	Flor> Cam	Flor> Solo	Mang> Urb	Mang> Camp	Mang> Solo	Camp> Urb	Camp> Solo	Solo> Urb	Água> Urb
dist. a Urbano	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. a Floresta							x	x	x	x
dist. Manguezal							x	x	x	x
dist. a Campo	x	x	x	x	x	x			x	x
altitude	x	x	x				x	x	x	x
UCs	x	x	x				x	x	x	x
dist UCs	x	x	x				x	x	x	x
declividade	x	x	x			x	x	x	x	x
dist. ferrovias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. hidro dupla										
dist. hidro simples						x		x		x
dist. hidro completa	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. indústrias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. rodovias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. áreas urbanizadas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. vias secundárias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Continuação

Tabela 32 - Seleção de variáveis explicativas para o período entre 2005 e 2013.

Transição/ Variável	Flor> Urb	Flor> Cam	Flor> Solo	Mang> Urb	Mang> Camp	Mang> Solo	Camp> Urb	Camp> Solo	Solo> Urb	Água> Urb
dist. poligonal	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
empreend. operacionais	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dist. empreend. operacionais	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 33 - Seleção de variáveis explicativas utilizadas para geração dos cenários de prognósticos.

Transição/ Variável	Flor> Urb	Flor> Cam	Flor> Solo	Mang> Urb	Mang> Camp	Mang> Solo	Camp> Urb	Camp> Solo	Solo> Urb	Água> Urb
dist. a Urbano	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
dist. a Floresta							x	x	x	X
dist. Manguezal							x	x	x	X
dist. a Campo	x	x	x	x	x	x			x	X
altitude	x	x	x				x	x	x	X
áreas protegidas	x	x	x				x	x	x	X
dist áreas protegidas	x	x	x				x	x	x	X
declividade	x	x	x			x	x	x	x	X
dist. ferrovias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X

Continuação

APÊNDICE B - Parâmetros utilizados no *software* DINAMICA EGO

Tabela 34-Parâmetros internos do DINAMICA EGO para simulação da cobertura da terra no período entre 1985 e 1995.

Transição de classes	Proporção do "Expander"	Proporção do "Patcher"	Tamanho médio de manchas (ha)	Variância do Tamanho (ha)	Isometria (ha)	Número de Passos
Floresta-Urbano	0,8	0,2	0,3978	0,7548	1,5	10
Floresta-Campo	0,5	0,5	0,7047	10,0752	1,5	10
Floresta-Solo	0,7	0,3	0,3172	0,4387	1,5	10
Manguezal-Urbano	0,9	0,1	0,2	0,0647	1,5	10
Manguezal-Campo	0,8	0,2	0,3834	1,4109	1,5	10
Manguezal-Solo	0,6	0,4	0,4552	1,2306	1,5	10
Campo-Urbano	0,7	0,3	0,76	14,1223	1,5	10
Campo-Solo	0,3	0,7	0,3723	3,0738	1	10
Solo-Urbano	0,8	0,2	0,4725	7,4763	1	10

Tabela 35-Parâmetros internos do DINAMICA EGO para simulação da cobertura da terra no período entre 1995 e 2005.

Transição de classes	Proporção do "Expander"	Proporção do "Patcher"	Tamanho médio de manchas (ha)	Variância do Tamanho (ha)	Isometria (ha)	Número de Passos
Floresta-Urbano	0,8	0,2	0,2874	0,2498	1,5	10
Floresta-Campo	0,5	0,5	0,3463	1,3386	1,5	10
Floresta-Solo	0,6	0,4	0,2259	0,1355	1	10
Manguezal-Urbano	0,9	0,1	0,3005	0,3757	1,5	10
Manguezal-Campo	0,7	0,3	0,1898	0,0999	1,5	10
Manguezal-Solo	0,9	0,1	0,3311	0,4682	1	10
Campo-Urbano	0,7	0,3	0,5093	4,1295	1,5	10
Campo-Solo	0,9	0,1	0,3491	3,7235	1	10
Solo-Urbano	0,8	0,2	0,3435	0,6745	1,5	10

Tabela 36-Parâmetros internos do DINAMICA EGO para simulação da cobertura da terra no período entre 2005 e 2013.

Transição de classes	Proporção do "Expander"	Proporção do "Patcher"	Tamanho médio de manchas (ha)	Variância do Tamanho (ha)	Isometria (ha)	Número de Passos
Floresta-Urbano	0,8	0,2	0,2083	0,1325	1,5	8
Floresta-Campo	0,9	0,1	0,2371	0,2443	1,5	8
Floresta-Solo	0,6	0,4	0,2283	0,0652	1	8
Manguezal-Urbano	0,6	0,4	0,3192	1,1499	1,5	8
Manguezal-Campo	0,7	0,3	0,5155	9,2776	1,5	8
Manguezal-Solo	0,9	0,1	0,2486	0,0705	1	8
Campo-Urbano	0,8	0,2	0,5213	2,9505	1,5	8
Campo-Solo	0,9	0,1	0,3428	1,554	1	8
Solo-Urbano	0,8	0,2	0,244	0,182	1,5	8
Água-Urbano	0,8	0,2	0,6273	6,5586	2	8

APÊNDICE C - Valores dos pesos de evidência gerados para os empreendimentos operacionais, utilizados no modelo simulado de 2013 e nos modelos de prognósticos

Figura 105-Valores dos pesos de evidência considerando os empreendimentos operacionais.

Continuação

Figura 105-Valores dos pesos de evidência considerando os empreendimentos operacionais.

As categorias referentes aos empreendimentos operacionais são:

- 1 =Sem dado;
- 2=Empreendimentos definidos para expansão de áreas de retroporto (retroporto em funcionamento no Guarujá)
- 3=Complexo portuário para expansão (Embraport e BTP)
- 4= Complexo portuário para expansão de petróleo e gás.

Figura 106 - Valores dos pesos de evidência gerados considerando a distância aos empreendimentos operacionais.

APÊNDICE D- Arquivo de pesos de evidência para todas as transições considerando a variável categórica do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) da Baixada Santista (parte terrestre), incorporado na geração do modelo simulado para 2024

Figura 107-Valores de pesos de evidência referente ao ZEE terrestre.

Continuação

Figura 107-Valores de pesos de evidência referente ao ZEE terrestre.

De acordo com descrições das zonas contidas no Decreto nº 53.996, de 25 de março de 2013 (SÃO PAULO, 2013), apresentam os seguintes usos e atividades:

1 = Z1T: I - pesquisa científica; II - educação ambiental; III - manejo autossustentado dos recursos naturais, condicionado à elaboração de plano específico; IV - empreendimentos de ecoturismo que mantenham as características ambientais da zona; V - pesca artesanal; VI - ocupação humana de baixo efeito impactante.

2= Z5T. A gestão da Z5T observará as seguintes diretrizes:

I - promoção da arborização urbana; II - otimização da ocupação dos empreendimentos já aprovados; III - estímulo à ocupação dos vazios urbanos garantindo a qualidade ambiental; IV - promoção da implantação de empreendimentos habitacionais de interesse social; V - otimização da infraestrutura urbana existente; VI - incentivo à utilização de instalações ociosas; VII - conservação e recuperação das áreas verdes, incluídas as áreas de preservação permanente e as áreas verdes de uso público.

Na Z5T, observados os termos do artigo 3º do presente decreto, são permitidos, além daqueles estabelecidos para a Z1T, a Z2T, a Z3T e a Z4T, todos os demais usos e atividades, desde que atendidas as normas legais e regulamentares pertinentes.

3= Z2T, I - aquicultura; II - mineração, com base nas diretrizes estabelecidas pelo Plano Diretor Regional de Mineração, quando existente; III - beneficiamento, processamento artesanal e comercialização de produtos decorrentes das atividades de subsistência das populações residentes na zona.

4=Z4TE. Na Z4TE foram consideradas, dentre outras, as seguintes características socioambientais: I - recorrência de áreas de preservação permanente ou de risco geotécnico; II - ocorrência de áreas contínuas de vegetação nativa primária e secundária em estágio avançado de regeneração, com relevância regional e fauna associada, apresentando alteração da cobertura vegetal de 5 a 20% (cinco a vinte por cento) da área total; III - assentamentos humanos dispersos.

Na Z4TE, observado o disposto no artigo 3º do presente decreto, são permitidos, além daqueles estabelecidos para a Z1T e a Z2T, os seguintes usos:

I - complexos de lazer; II - condomínios residenciais.

5=Z5TE. A gestão da Z5TE observará as seguintes diretrizes: I - incentivo à criação de áreas verdes; II - otimização da ocupação dos empreendimentos já aprovados; III - estímulo à ocupação dos vazios urbanos, garantindo a melhoria da qualidade ambiental; IV - promoção da implantação de empreendimentos habitacionais de interesse social; V - conservação ou recuperação das áreas verdes, incluídas as áreas de preservação permanente e as áreas verdes de uso público.

6=Z4T. Observado o disposto no artigo 3º do presente decreto, são permitidos, além daqueles estabelecidos para a Z1T, a Z2T e a Z3T, os seguintes usos e atividades: I - ocupação para fins urbanos; II - comércio e prestação de serviços de suporte aos usos permitidos; III - beneficiamento e processamento de produtos para atendimento dos moradores locais.

7=Z5TEP: são permitidos, além daqueles estabelecidos para a Z1T, os seguintes usos e atividades: I - mineração baseada nas diretrizes estabelecidas pelo Plano Diretor Regional de Mineração, quando existente; II - empreendimentos portuários e retroportuários, observadas as disposições deste decreto e a legislação regedora da espécie.

Em seu Artigo 45, os planos e programas de gestão da Z5TEP terão as seguintes metas: I - nas áreas utilizadas para atividades portuárias e retroportuárias previstas no inciso II do Artigo 44: a) atendimento de 100% (cem por cento) da área ocupada com abastecimento de água potável, coleta e tratamento dos esgotos sanitários e coleta e disposição adequada de resíduos sólidos; b) manejo adequado das águas pluviais em 100% (cem por cento) das áreas urbanizadas. II - nas demais

áreas, excluídas as ocupadas pelos usos e atividades a que alude o inciso II do artigo 44: manutenção e recuperação, quando necessário, de 80% (oitenta por cento) da cobertura vegetal nativa, garantindo a diversidade biológica das espécies.

8=Z1TAEP, onde os usos e atividades obedecem ao da Lei federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000; no diploma de criação da Unidade de Conservação de proteção integral e respectivo Plano de Manejo; na regulamentação específica, no caso das terras indígenas.

9=Z3 T: são permitidos, além daqueles dos estabelecidos para a Z1T e a Z2T, os seguintes usos e atividades: I - agropecuária, compreendendo unidades integradas de beneficiamento, processamento, armazenagem e comercialização dos produtos; II - silvicultura; III - comércio e serviços de suporte às atividades permitidas na zona; IV - turismo rural; V - educacionais, esportivas, assistenciais, religiosas e culturais; VI - ocupação humana com características rurais.

APÊNDICE E - Valores dos pesos de evidência gerado para os novos empreendimentos projetados, utilizados nos modelos de prognósticos.

Valores dos pesos de evidência gerado para os novos empreendimentos projetados, utilizados nos modelos de prognósticos. As categorias referem-se a:

1=Sem Dado;

2=Empreendimentos definidos para expansão de áreas de retroporto;

3=Complexo portuário para expansão

4= Complexo portuário para expansão de petróleo e gás.

5= Empreendimentos possíveis de expansão relacionados ao retroporto e portuário.

Figura 108 - Valores dos pesos de evidência gerados para os novos empreendimentos projetados.

Continuação

Figura 108 -Valores dos pesos de evidência gerados para os novos empreendimentos projetados.

APÊNDICE F - Valores dos pesos de evidência gerado em relação à distância aos novos empreendimentos projetados

A variável distância aos novos empreendimentos projetados não apresentou influência, com valores dos pesos de evidência próximos a zero para a transição Floresta para Urbano, Floresta para Campo, Floresta para Solo, Manguezal para Solo, Campo para Solo, Solo para Urbano, Solo para Água.

A influência com base na distância a essa variável deu-se apenas nas seguintes transições apresentadas na Figura 109.

Figura 109 - Valores dos pesos de evidência gerados em relação à distância aos novos empreendimentos projetados.