

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

Dissertação de Mestrado

**Modelagem da dinâmica de paisagem:
simulação de cenários na região do baixo curso do rio dos Sinos - RS**

Ednardo Correia Lima

Porto Alegre - RS, Maio de 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

Dissertação de Mestrado

**Modelagem da dinâmica de paisagem:
simulação de cenários na região do baixo curso do rio dos Sinos - RS**

Ednardo Correia Lima

Orientador Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Ana Caroline Benedetti (Colégio Politécnico da UFSM)

Prof. Dr. Elódio Sebem (Colégio Politécnico da UFSM)

Profa. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha (Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFRGS)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Geografia.

Porto Alegre - RS, Maio de 2014

CIP - Catalogação na Publicação

Correia Lima, Ednardo

Modelagem da dinâmica de paisagem: simulação de cenários na região do baixo curso do rio dos Sinos - RS / Ednardo Correia Lima. -- 2014.
126 f.

Orientador: Laurindo Antonio Guasselli.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. Modelagem dinâmica de paisagem. 2. Cenários prognósticos. 3. Geoprocessamento. 4. Dinamica EGO. 5. Rio dos Sinos - RS. I. Antonio Guasselli, Laurindo, orient. II. Título.

“O universo não é um amontoado de coisas, e sim um sistema formado por sistemas que agem entre si como se fossem simples elementos. O que se passa em um lugar depende da totalidade de lugares que constroem o espaço.”

Willian Bunge, 1963

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar devo agradecer à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia por toda a base de conhecimento, estrutura, e principalmente pelo caráter das pessoas que foi possível conviver e aprender.

Ao meu orientador Laurindo Antonio Guasselli, pela atenção, apoio, dedicação, integridade, saber, que tanto me fez crescer como pesquisador ao longo dos últimos anos, deixo aqui minha admiração pelo profissional, pessoa e amigo que foi durante a minha jornada.

A CAPES, pela concessão de ajuda de custo para as atividades de campo realizadas nessa pesquisa.

Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, por ser um espaço de vivência e aprendizagem técnica excepcional.

À minha família querida que sempre me apoiou a continuar os estudos, em especial minha mãe Suzana Maria Garcia e minha irmã Solmar Correia Lima, pelo carinho e dedicação.

À minha esposa Carolina Baumann e meu enteado Pedro Baumann, pelo apoio e amor incondicional dispensado a mim, na jornada que tracei e continuo a trilhar, com grande amor, é para vocês que trabalho.

Agradeço também pela oportunidade de ter passado esse momento especial da minha vida, junto ao amigo Guilherme Oliveira, que tanto me apoiou e incentivou junto às demandas que a pesquisa me exigiu.

A todos os professores e colegas pela amizade e convivência em todos esses anos de graduação e pós-graduação, o meu grande abraço e obrigado.

RESUMO

A análise do acelerado crescimento urbano industrial dos municípios próximos às grandes metrópoles brasileiras, principalmente a partir dos anos 1960, requer novas metodologias de análise espaço-temporal que possam antecipar ações de planejamento territorial. Nesse contexto, foi utilizado um modelo de autômato celular para a modelagem da dinâmica da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos - RS ao longo de 21 anos (1990 a 2011) e simuladas as tendências de mudanças dos elementos desta paisagem para 2016 e 2022. O trabalho foi elaborado com auxílio de *softwares* de sistemas de informações geográficas e de simulação espacial, como o Dinamica EGO, compreendendo três etapas: (a) preparação dos dados para o modelo da paisagem para os anos de 1990, 2000 e 2011, que compreende dois períodos de simulação, além da seleção de variáveis espaciais para explicar as transições de uso e cobertura do solo; (b) calibração e validação do modelo, ou seja, definição dos parâmetros para a simulação dos cenários para cada um dos períodos; (c) obtenção dos cenários de prognósticos. A quantificação das alterações na paisagem do baixo curso do rio dos Sinos no período de 1990 a 2011 revelou as seguintes tendências: aumento das áreas de cobertura vegetal, áreas urbanizadas e silvicultura; redução das áreas de campos ou áreas agrícolas e arrozais; as demais classes não apresentaram alterações significativas. Essas tendências foram simuladas no processo de modelagem dinâmica espacial para os períodos (1990 a 2000) e (2000 a 2011), geradas matrizes de transição, com pesos de evidência de transição por faixas de distância de variáveis espaciais e a calibração dos modeladores de formação, retração e expansão de manchas de uso e cobertura do solo. Foram geradas simulações da paisagem para os anos de 2000 e 2011 com similaridades consideradas satisfatórias. A partir dos dados probabilísticos estocados do período de simulação (2011) geramos cenários futuros a curto e médio prazo, devido a maior similaridade apresentada com a paisagem observada, com relação ao primeiro período de simulação (2000). Os cenários futuros simulados a curto e médio prazo indicam tendência de continuidade na dinâmica observada, porém em menor intensidade, conforme se verifica em outras áreas intensamente urbanizadas junto a grandes centros urbanos.

Palavras-chave: modelagem dinâmica de paisagem, cenários prognósticos, geoprocessamento, Dinamica EGO, baixo curso do rio dos Sinos - RS.

ABSTRACT

Analysis of accelerated industrial growth of urban municipalities near Brazil's big cities, mainly from the 1960s, requires new methodologies for spatio-temporal analysis to anticipate actions of territorial planning. In this context, a model of cellular automata for the modeling of landscape dynamics of the lower course of the Sinos - RS river over 21 years (1990-2011) and simulated the changing trends of the elements of this landscape in 2016 and 2022. The work was prepared with the aid of software for geographic information and spatial simulation Dinamica EGO systems, comprising three stages: (a) preparation of data for the model of the landscape for the years 1990, 2000 and 2011, comprising two periods the simulation and the selection of spatial variables to explain land use change and land cover; (b) calibration and validation of the model and, defining the parameters for the simulation of scenarios for each period; (c) obtaining the forecast scenarios. The quantification of changes in the landscape of the lower course of the Sinos river in the period 1990 to 2011 revealed the following trends: increasing canopy coverage areas, urbanized areas and forestry; reduction in agricultural fields or areas of fields and rice paddies; other classes showed no significant changes. These trends were simulated by the spatial dynamics modeling process for the periods (1990-2000) and (2000-2011), generated transition matrices, with weights of evidence of transition by distance bands of spatial variables and calibration of modelers training, contraction and expansion of use of stains and ground cover. Landscape simulations for the years 2000 and 2011 with deemed satisfactory similarities were generated. From the probabilistic data stored in the simulation period (2011) generate future scenarios in the short and medium term, due to greater similarity presented with the landscape observed with respect to the first simulation period (2000). The future scenarios simulated in the short and medium term trend indicates continuity in the observed dynamics, but at a lower intensity, as shown in other heavily urbanized areas near large urban centers such as Porto Alegre.

Keywords: dynamic modeling of landscape, scenery tips, geoprocessing, Dinamica EGO, lower course of the river Sinos - RS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de paisagem e suas manchas.....	22
Figura 2 - Requisitos para modelagem em SIG.....	30
Figura 3 - Estruturas temporais.....	35
Figura 4 - Representações de células em autômatos celulares.....	39
Figura 5 - Exemplo de (AC).....	41
Figura 6 - Arquitetura do <i>software</i> Dinamica.....	43
Figura 7 - Método de comparação <i>fuzzy</i> usando mapa de diferenças e uma função de decaimento exponencial e constante.....	51
Figura 8 – Localizaçõa da área de estudo no Rio Grande do Sul.....	58
Figura 9 - Regiões Fitoecológicas da bacia do rio dos Sinos	58
Figura 10 - Crescimento populacional entre 2000 a 2010 em %.....	63
Figura 11 - Síntese das etapas de modelagem da dinâmica de paisagem no software Dinamica EGO.....	66
Figura 12 - Nove passos do modelo de simulação de mudanças dos elementos da paisagem desenvolvidos no Dinamica EGO.....	75
Figura 13 - Áreas urbanizadas associadas à rede de transporte principal em 2011.....	84
Figura 14 - Arrozais associados à planície de inundação do rio dos Sinos, em 2011.....	85
Figura 15 - Mapa dos elementos da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos em 1990	86
Figura 16 - Mapa dos elementos da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos em 2000.....	87
Figura 17 - Mapa dos elementos da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos em 2011.....	88
Figura 18 - Mapa da situação dos Arrozais no baixo curso do rio dos Sinos entre 1990 a 2011.....	91
Figura 19 - Campos as margens da Br 386, indicando abandono de atividade agrícola (rizicultura), 06/07/2013.....	95
Figura 20 – Expansão das áreas urbanizadas no baixo curso do rio dos Sino no período de 1990 a 2011.....	97
Figura 21 - Mapas de probabilidade de transição entre classes de uso e cobertura do solo para o período de simulação da paisagem entre 2000 a 2011.....	106

Figura 22 - Mapas de paisagem de 2000 e 2011 e de paisagem simulada de 2000 e 2011.....	109
Figura 23 - Mapas de similaridade mínima e máxima de paisagem simulada (2000 e 2011).....	112
Figura 24 - Mapas de paisagem simulada para 2000 e 2011 e de prognósticos para 2016 e 2022.....	115
Figura 25 - Variação da área por classe de uso e cobertura do solo entre 1990 a 2022.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das características de modelos de simulação espacial.....	37
Tabela 2 - Dados demográficos (2000 – 2010).....	63
Tabela 3 - PIB (mil reais) do valor adicionado bruto por setor da economia – 2010.....	64
Tabela 4 - Base de dados cartográficos.....	67
Tabela 5 - Pontos de Controle obtidos em campo (06 e 07/07/2013).....	69
Tabela 6 - Mapas dinâmicos e estáticos produzidos, a partir da base de dados.....	71
Tabela 7 - Descrição das classes de declividade da área de estudo.....	72
Tabela 8 - Matrizes de transição geradas.....	74
Tabela 9 - Cubos raster produzidos.....	77
Tabela 10 - Número de células por classe, área em km ² e percentual (1990, 2000 e 2011).....	89
Tabela 11 - Matrizes de Transição dos elementos da paisagem entre 1990 a 2000.....	92
Tabela 12 - Matrizes de Transição dos elementos da paisagem entre 2000 a 2011.....	93
Tabela 13 - Maiores taxas de transição de passo único dos elementos da paisagem (1990 a 2000).....	93
Tabela 14 - Maiores taxas de transição de passo único dos elementos da paisagem (2000 a 2011).....	96
Tabela 15 - Variáveis proximais com coeficientes de Pesos de Evidência positivos (1990 a 2000).....	101
Tabela 16 - Variáveis proximais com coeficientes de Pesos de Evidência positivos (2000 a 2011).....	102
Tabela 17 - Parâmetros utilizados para calibrar os algoritmos expander e patcher nos modelos de simulação da paisagem de 2000 e 2011.....	105
Tabela 18 - Índices de similaridade fuzzy calculados para os mapas simulados de 2000 e 2011 através das funções de decaimento constante.....	111
Tabela 19 - Área em km ² e transição entre 1990 a 2022 por classes.....	116
Tabela 20 - Matriz de Transição dos elementos da paisagem entre 2011 a 2016.....	117
Tabela 21 - Matriz de Transição dos elementos da paisagem entre 2011 a 2022.....	117

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo geral.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Justificativa.....	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Análise de paisagem.....	17
2.1.1 Elementos de uma paisagem.....	21
2.1.2 Estrutura, função e mudança.....	23
2.1.3 Manchas.....	26
2.1.4 Matriz.....	28
2.2 Modelagem da dinâmica de paisagens.....	29
2.2.1 Sistemas.....	31
2.2.2 O Espaço.....	33
2.2.3 O Tempo.....	35
2.2.4 Modelos.....	36
2.2.5 Modelos Autômatos Celulares (AC).....	39
2.3 Modelador Dinamica EGO.....	41
2.3.1 Arquitetura do Dinamica EGO.....	42
2.3.2 Método de Pesos de Evidências.....	44
2.3.2.1 Matriz de transição.....	45
2.3.2.2 Pesos de Evidências baseados no Teorema da Probabilidade Bayesiana.....	46
2.3.2.3 Calculo das faixas para categorização de variáveis contínuas.....	48
2.3.3 Análise da correlação de mapas.....	48
2.3.4 Método para a validação dos modelos.....	50
2.4 Aplicações de modelos de simulação espacial dinâmica.....	52
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1 Área de estudo.....	57
3.1.1 Características ambientais.....	59
3.1.2 Uso e cobertura do solo.....	60
3.1.3 Características socioeconômicas dos municípios.....	61
3.2 Metodologia.....	65
3.2.1 Quantificação e análise de alterações dos elementos da paisagem.....	67

3.2.1.1 Base de dados cartográficos.....	67
3.2.1.2 Preparação dos dados para a plataforma de modelagem dinâmica.....	73
3.2.1.3 Quantificação e cálculos de transição.....	73
3.2.2 Simulação de processos de transição dos elementos da paisagem.....	75
3.2.2.1 Cálculo de intervalos para categorização de variáveis contínuas.....	76
3.2.2.2 Cálculo dos Pesos de Evidência.....	77
3.2.2.3 Análise de correlação dos mapas.....	78
3.2.2.4 Criação do modelo de simulação da paisagem.....	79
3.2.2.5 Validação da simulação.....	80
3.2.2.6 Simulação com formação e expansão de manchas.....	81
3.2.2.7 Obtenção dos cenários prognósticos.....	81
4. RESULTADOS.....	82
4.1 Quantificação e análise de alterações dos elementos da paisagem.....	82
4.2 Simulação de alterações na paisagem.....	99
4.2.1 Calibração dos modelos de simulação da paisagem.....	99
4.2.2 Validação dos modelos de simulação da paisagem.....	110
4.3 Simulação de cenário prognósticos futuros.....	114
5. CONCLUSÃO.....	119
6. REFERÊNCIAS.....	121

1. INTRODUÇÃO

A análise da paisagem, o entendimento das transformações que nela ocorrem, sua complexidade e a interdependência entre os elementos que a compõem são de grande importância tendo em vista a acelerada dinâmica das alterações e do processo de degradação do ambiente, fato que vêm gerando preocupações em nível local e global.

Para melhor compreensão da dinâmica de alterações em uma paisagem, é indispensável à assimilação de experiências contemporâneas, que apontem para o desenvolvimento e incorporação de técnicas e tecnologias capazes de responder as novas realidades de intensa troca de matéria e energia entre os lugares. Nesse sentido, as plataformas de modelagem dinâmica espacial, como o *software* Dinamica EGO, que simulam alterações na paisagem, representam uma ferramenta poderosa.

Essa plataforma de modelagem utiliza modelos que visam auxiliar no entendimento dos mecanismos causais e processos de desenvolvimento de sistemas, determinando assim, como eles evoluem diante de condições locais, e ainda geram cenários traduzidos por diferentes quadros socioeconômicos, políticos e ambientais espacializados.

Um dos modelos de simulação mais utilizados em análises de mudanças de paisagem é o modelo estocástico-probabilístico. O qual, por meio de uma matriz de transição definida a partir de mudanças no uso e cobertura do solo em períodos passados, associada a critérios de pesos dessas mudanças, torna possível definir áreas que são mais propensas a mudanças.

Dessa forma, o uso de modelos de simulação espacial dinâmica, associados a um sistema de informações geográficas, podem produzir subsídios interessantes para uma análise espaço-temporal mais ampla e complexa.

Para tanto, definimos o baixo curso do rio dos Sinos - RS como área de estudo. Essa região da bacia hidrográfica apresentou ao longo de sua história grandes transformações socioeconômicas, que segundo BARCELLOS (2004); COMITESINOS (2012), já no início do século XX, com a construção da estrada de ferro, recebe um importante impulso econômico. As oficinas de artesanato de couro evoluíram para pequenas e médias indústrias de calçados. Na década de 60, com a criação da Feira Nacional do Calçado (Fenac) e o início das exportações de calçados, a região torna-se o principal polo exportador deste produto no país. Nas décadas de 1970 e 80, a indústria de transformação é consolidada na região, gerando crescimento de uma cadeia produtiva associada. Esses fatos geraram um modelo de ocupação ancorado em formas

desorganizadas e agressivas de uso do solo levando à contaminação crescente dos corpos hídricos e à degradação da flora e fauna original, COMITESINOS (2012); ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL (2012).

Ainda com relação ao uso de ferramentas tecnológicas para análise de atributos espaciais e sua dinâmica, diversos trabalhos utilizaram séries históricas de imagens orbitais, técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem dinâmica espacial, para tal empreitada. Com relação ao uso de imagens de satélite para efetuar análises de paisagem, SUERTEGARAY & GUASSELLI (2012) citam que:

“Neste caso, o observador não está observando a imagem “real”. Está buscando uma aproximação da realidade a partir de uma representação que, por sua vez, leva em conta elementos do real para criar a composição, ou seja, no caso do sensoriamento remoto, leva em conta a energia refletida, captada e transformada por um sensor remoto.” p.28.

Além de representar uma aproximação da realidade, o uso de imagens de satélite permite uma ampliação da dimensão espacial-temporal, tornando assim a escala de análise regional, tal como, permite visualizar os padrões pretéritos de paisagens, a partir de séries históricas disponíveis.

LANG & BLASCHKE (2009), propõem a ideia de análise da estrutura de paisagens, onde devemos nos imaginar fazendo um passeio montanha acima. A partir do ângulo de visada modificado, onde apareceriam novos padrões e obteríamos uma melhor visão do conjunto, e as relações estruturais que anteriormente estavam escondidas para nós. Seguindo um passo adiante em nossa imaginação, deixaríamos o terreno, e então observaríamos a paisagem diretamente abaixo de nós, que pareceria um mosaico composto por manchas que seriam os elementos da mesma.

BERTRAND (1995, *apud* VERDUM, 2012), afirma que:

“Ao nos transferirmos no tempo (escala temporal), notamos que o mesmo recorte espacial dado pela visão se altera, isto é, a paisagem é dotada de uma dinâmica. Todos os elementos que compõem esta dinâmica podem ser objetos de estudo, tanto em conjunto como isolados; no entanto, esta dinâmica sugere uma estrutura e um funcionamento essencialmente únicos, características que dariam a cada paisagem seu caráter específico.” p.15

Estes conceitos, associados ao desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) dinâmicos possibilitam a construção de modelos espaciais explícitos

capazes de representar a realidade geográfica, e as mudanças na paisagem, como fenômenos inerentemente dinâmicos.

BACA *et al.* (2007) cita que, a característica dinâmica das paisagens faz com que os modelos empregados para estudá-las devam basear-se em premissas apropriadas para a abordagem desse aspecto. As paisagens, consideradas como sistemas abertos, estão em permanente interação com outros elementos externos, de forma que mantenha um intercâmbio contínuo de energia e matéria entre si. Além disso, a dinâmica interna entre seus diversos componentes torna mais rica e complexa sua estrutura, com elementos imbricados entre eles, apresentando realimentações que regulam seus fluxos e que criam novas interações.

Segundo SOARES-FILHO (2009), modelos de simulação da paisagem podem ser entendidos como um dispositivo de síntese útil para avaliar, em curto e médio prazo, os resultados de uma variedade de cenários, traduzidos como diferentes conjunturas socioeconômicas, políticas e ambientais. Em espacial, os modelos espacialmente explícitos, que simulam a dinâmica de um sistema ambiental, reproduzindo a maneira como seus padrões espaciais evoluem ao longo do tempo.

Nesse sentido, o propósito de modelar a dinâmica da paisagem, é simular mudanças espaço-temporais dos elementos que a compõem, atrelados a uma territorialidade. Sua concepção permite o entendimento dos mecanismos influentes que determinam a função de mudança e, assim, avaliar como um sistema evolui diante de um conjunto de circunstâncias definidas pelo analista.

A afirmação de PEDROSA & CAMARA (2007), que define um modelo espacial dinâmico como sendo “uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações nas forças direcionadoras”, sintetiza a superação da modelagem em relação às limitações das atuais ferramentas de geoinformação.

Quando utilizado para o estudo de fenômenos de transição dos elementos da paisagem, a modelagem dinâmica torna-se uma ferramenta útil ao planejamento, uma vez que possibilita a simulação de cenários futuros, a partir da experiência e dos dados espaciais e estatísticos acumulados ao longo da análise.

Esforços no sentido de uma compreensão sobre os fenômenos sociais e naturais de dimensões espaço-temporais, com fins de representá-los sob a forma de modelos espaciais dinâmicos, e por que não, prognósticos futuros, constituem-se em uma das

mais instigantes, senão mais férteis, e promissoras agendas de pesquisa no atual estado da arte de geotecnologias, ALMEIDA *et al.* (2007).

1.1 Objetivo geral

Modelar a dinâmica da paisagem na região do baixo curso do rio dos Sinos - RS, e simular cenários futuros utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

1.2 Objetivos específicos

- Quantificar e analisar as alterações dos elementos da paisagem entre os anos de 1990-2000 e 2000-2011;
- Avaliar a contribuição dos elementos da paisagem no processo de modelagem dinâmica espacial;
- Simular processos de transição dos elementos da paisagem;
- Projetar cenários de prognósticos da paisagem para os anos de 2016 e 2022, com base nos modelos dinâmicos de simulação da paisagem.

1.3 Justificativa

O baixo curso do rio dos Sinos - RS foi escolhido como área de estudo, devido ao histórico de transformações socioeconômicas ocorridas principalmente a partir do início do século XX e consequente impacto socioambiental, fortemente marcado por degradação dos recursos naturais; e principalmente pelo atual dinamismo socioeconômico dos municípios que a área de estudo abrange (total ou parcialmente). Como resultado desse dinamismo associado à concentração urbano industrial e precariedade da infraestrutura sanitária, temos uma das áreas mais degradadas do Estado, com destaque a poluição dos recursos hídricos.

Um dos grandes desafios na atualidade é o desenvolvimento de técnicas e abstrações capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais dinâmicos. Para esse estudo, o grande desafio é a geração de um modelo espacial dinâmico, compatível com a paisagem atual do baixo curso do rio dos Sinos - RS, que

contenha as características dinâmicas causais/locais que expliquem alterações dos elementos da paisagem, adequadas também para a geração de cenários futuros.

Os padrões de desenvolvimento de paisagens no tempo e no espaço são o resultado de complexas interações de forças físicas, biológicas e sociais. A maioria das paisagens foi alterada pela ação antrópica e o mosaico de paisagens resultante é uma mistura de áreas naturais remanescentes e espaços sociais, que variam em tamanho, forma e arranjo. Padrões de uso e cobertura do solo podem influenciar numa variedade de fenômenos ecológicos, incluindo o escoamento de água e erosão ou a propagação de perturbações no meio. Assim, a capacidade de prever esses padrões espaciais pode ser crucial para a compreensão da alteração desses padrões, TURNER (1987).

Nesse estudo foi adotado o conceito de paisagem como materialização de processos sociais, lida a partir de imagens de satélites, que serviram para a produção de mapas de uso e cobertura do solo para o período de 1990 a 2011. Essa perspectiva foi associada ao método de análise da estrutura e dinâmica de paisagem, empregado pelo *software* Dinamica EGO. Esse *software* é baseado em concepções que tentam associar as aproximações quantitativas e analíticas a padrões de pensamento sistêmico-holístico, LANG & BLASCHKE (2009). O conceito de estrutura da paisagem é também designado como ecologia de paisagens pela escola norte-americana, LANG & BLASCHKE (2009).

Gerar prognósticos futuros da dinâmica do uso e cobertura do solo para o baixo curso do rio dos Sinos poderá servir de subsídio para a gestão territorial e ambiental dos 15 municípios inclusos parcial ou total; para a orientação de projetos de saneamento, como o Pró-Sinos e; para a expansão da infraestrutura modal.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem por objetivo revisar e discutir fundamentos teóricos e técnicas de análise de alterações em paisagens e a geração de cenários prognósticos futuros. Para tanto, a revisão é focada em estudos que buscaram aliar a base conceitual de análise da estrutura horizontal de paisagens; modelagem dinâmica espacial baseada em Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

2.1 Análise de Paisagem

A paisagem constitui para a geografia um conceito que possibilita uma análise unificada do espaço, como expressão materializada da sociedade possível de ser visualizada pelo observador. Para SUERTEGARAY & GUASSELLI (2004), a paisagem seria em grande parte associada à ideia de imagem, cabendo descrevê-la, enquanto expressão de processos. E ainda, a paisagem como materialização de processos sociais, pode ser lida a partir de imagens de satélite, onde o observador estaria visualizando a imagem real, buscando uma aproximação da realidade a partir de uma representação, que leva em conta elementos do real para criar uma composição que, no caso do sensoriamento remoto, leva em conta a energia refletida, captada e transformada por um sensor remoto em imagem.

VERDUM & FONTOURA (2009), definem a paisagem como um conjunto das formas que caracterizam uma determinada parte da superfície terrestre, onde os elementos que compõem a paisagem, podem ser analisados em função de sua forma e magnitude, possibilitando assim, classificações de diferentes tipos. Destacam ainda a importância nesse tipo de análise, dos elementos da natureza, que podem ser observados a partir de um ponto de referência e sua leitura possibilita definir formas resultantes da associação do ser humano com os demais elementos da natureza.

SOARES-FILHO (1998b) apresenta o enfoque conceitual e metodológico da Ecologia de Paisagem, como uma ciência para o estudo da dinâmica de paisagens. O enfoque centraliza-se na combinação da abordagem horizontal do geógrafo, através do exame das inter-relações espaciais de um fenômeno natural, com a abordagem vertical de um ecólogo.

A Ecologia de Paisagem pode ser considerada dentro de uma visão tradicional, como o estudo das inter-relações entre os fenômenos e processos da Paisagem, incluindo as comunidades de plantas, animais e o homem. No entanto, nas últimas décadas, o conceito dessa disciplina evoluiu na direção de um estudo dos padrões textuais da paisagem e dos processos que a resultam, a partir da utilização de SIG's e modelos de simulação espacial.

Por essa linha de pesquisa, a Ecologia de paisagem surgiu como uma importante disciplina no estudo da estrutura, da função e das mudanças da paisagem. FORMAN & GODRON (1986) explicam essas características da seguinte forma:

- **Estrutura**, é o produto do relacionamento espacial entre os distintos ecossistemas ou elementos presentes. Mais especificamente, é como o arranjo ou padrão espacial da paisagem (descrito pelos tamanhos, formas, número e tipos de configurações dos ecossistemas) governa a distribuição de energia, materiais e organismos.
- **Função**, ou interações entre elementos espaciais, representadas pelos fluxos de energia, materiais e espécies entre os ecossistemas presentes.
- **Mudanças**, dada pela alteração na estrutura e na função do mosaico ecológico através do tempo.

Em contraste com muitos ramos da ecologia, esses estudos reconhecem o potencial do Homem em influenciar a estrutura e função da paisagem. Portanto, o estudo da Ecologia de Paisagem se concentra não somente nas dimensões biológicas e físicas de um ambiente, mas também nos aspectos históricos, culturais, socioeconômicos da Ecologia Humana, que se encontram conectados aos diferentes usos do solo. O homem não representa apenas um fator de perturbação externa aos ecossistemas, mas sim um componente interativo e co-evolucionário, SOARES-FILHO (1998b).

MARTINS *et al.* (2004); LANG & BLASCHKE (2009), citam o conceito de paisagem cultural, que considera o Homem como fator fundamental na transformação das paisagens. Nesse sentido, o desenvolvimento de instrumentos e técnicas propiciou o aparecimento de novos elementos estruturais e dinâmicos na paisagem, produtos da mente humana, ou seja, da noosfera.

MARTINS *et al.* (2004), cita a paisagem cultural como um sistema físico, isto é, por meio de medidas de entrada e saída de matéria e energia. Desse ponto de vista, as paisagens culturais podem ser classificadas em três níveis: tradicional, regional e globalizada. Aqui nos interessa a abordagem conceitual de MARTINS *et al.* (2004), com

relação à paisagem cultural globalizada com resquícios de paisagem cultural regional, pois, se enquadram com as características estruturais da paisagem da área de estudo.

Dessa forma, as paisagens culturais regionais seriam aquelas que antecederam a tendência atual de globalização. Na situação regional, os fluxos de matéria e de energia ocorriam entre os centros urbanos, consumidor e o meio rural, produtor. Essa polarização teria aumentado progressivamente, passando para um intercâmbio entre regiões, até chegar à situação atual, transcontinental. Por outro lado, as paisagens culturais globalizadas são o resultado da intervenção recente do homem, especialmente, depois do processo de industrialização e de uma elevada taxa de importação de matéria. Mais recentemente, esse tipo de intervenção aumentou em função da globalização da economia mundial, MARTINS *et al.* (2004).

As paisagens globalizadas empregam tecnologia que depende da entrada de energia externa ao sistema para suprir as elevadas taxas de importação e exportação de matéria. Essa lógica provoca grande desequilíbrio no balanço de matéria e energia. Nesse caso, o balanço de energia é sempre positivo devido à elevada entrada de fontes externas à paisagem, como a utilização de combustíveis fósseis. Em relação à matéria, há uma tendência de balanço negativo onde os recursos naturais são explorados sem reposição necessária, MARTINS *et al.* (2004).

Podemos usar como exemplo o solo utilizado para o plantio de arroz na área de estudo, que num prazo relativamente curto, o sistema tende ao colapso e provoca a exaustão de nutrientes e da matéria orgânica, além da perda progressiva dos recursos hídricos, excessivamente utilizados nessa cultura.

FORMAN & GODRON (1986), cita que outros impactos importantes das paisagens culturais globalizadas são a fragmentação dos ecossistemas originais e a destruição da biodiversidade. A fragmentação provoca o isolamento progressivo de comunidades biológicas, diminuindo o fluxo gênico na paisagem, originando em curto prazo a destruição quase que completa da biodiversidade.

SOARES-FILHO (1998); PORTO & MENEGAT (2004), indicam que o conceito de paisagem, como foi exposto anteriormente, é bem conveniente para aplicação do geoprocessamento, pois através do mapeamento desses padrões pelo sensoriamento remoto e da análise de suas relações espaciais, obtidas das formas cartográficas de mapas armazenados em um SIG, poderemos caracterizar distintas paisagens e também desvendar os processos que a resultam.

LANG & BLASCHKE (2009), apresentam o enfoque metodológico da análise da Estrutura da Paisagem, como um conceito de trabalho relativamente jovem dentro da ecologia de paisagens.

Trata-se do estudo do mosaico da paisagem que aparece como um padrão e ordenamento espacial específico das unidades de paisagem numa determinada seção de pesquisa. Trabalha com as feições espaciais/estruturais observáveis e mensuráveis na paisagem e caracteriza as suas condições, seu desenvolvimento e sua mudança temporal. As estruturas e padrões espaciais são considerados como uma manifestação espaciais/temporais de processos que ocorrem em diferentes planos de escala. Esse conceito ocupa-se com os graus de relação e com os diferentes alcances de processos da ecologia de paisagens.

Esses processos incluem também fluxos de matéria e energia, bem como os processos de vida dos organismos. Processos e estruturas encontram-se num jogo alternando causa e efeito, isso significa que os processos que ocorrem na paisagem geram padrões e estruturas, os quais, concomitantemente, são também influenciados e guiados pelas estruturas espaciais dominantes. Trata-se em síntese, das causas e efeitos da heterogeneidade espacial sobre os diferentes processos ecológicos.

Segundo LANG & BLASCHKE (2009), em seu desenvolvimento, o conceito de estrutura da paisagem foi fortemente determinada por ferramentas apoiadas em computador e por métodos de processamento de informações geográficas, bem como do processamento digital de imagens. Para a avaliação da estrutura da paisagem, desenvolveu-se um conjunto de métodos designado como medidas da estrutura da paisagem. A emergência desse conjunto de métodos ocorre em paralelo com a exigência por uma ciência prospectiva com orientação quantitativa, nos anos de 1980 e 1990. Devido, ao seu grande potencial, deslocou-se para o centro dos interesses do planejamento e da análise da paisagem apoiados em SIG.

O conceito de estrutura da paisagem também é designado como o conceito norte-americano de Ecologia de Paisagem, desenvolvido em sua origem, segundo LANG & BLASCHKE (2009), por FORMAN & GODRON e TURNER nos anos 1980, sendo aplicado atualmente em diversos países.

A quantificação de paisagens, ou seja, de elementos individuais e sua ordenação espacial, naturalmente não pode ser um objetivo em si mesmo, o objetivo não é descrever, mas explicar e compreender os processos que ocorrem nelas, LANG & BLASCHKE (2009).

Do ponto de vista da aplicação prática, a medida da estrutura da paisagem objetiva trabalhar para complementares pesquisas *in situ*, ou seja, focar perfis no trabalho de campo. É exatamente por meio dessa descrição e análise que se pretende obter dados sobre relações e, finalmente, sobre funções e processos para apoiar ou eliminar hipóteses e para gerar resultados quantitativos para indicadores de relações espaciais.

MARTINS *et al.* (2004), cita que a compreensão integrada da realidade é uma pretensão dos estudos de paisagem, alcançado até certo nível, uma vez que as informações espaço-temporais sempre são incompletas, deduzíveis em parte, pela percepção do observador ou mesmo por inferências estatísticas. Dessas limitações, surge a necessidade de se definirem aspectos genéticos e de evolução sempre associados a modelos geralmente impossíveis de serem testados que correspondem, apenas, a algum aspecto da realidade, nunca de sua totalidade.

Os diferentes conceitos de paisagem apresentados pelas ciências mostram que o aspecto estrutural pode ser bem caracterizado, mas os processos e a dinâmica não o são. Nesse sentido, a dinâmica de paisagem leva ao desenvolvimento de estudos quantitativos de funcionamento ambiental onde são considerados modelos estatísticos que levam em conta as variáveis espaciais e temporais em diversas escalas. As principais questões levantadas nesses estudos envolvem a determinação dos limites, dos processos-chave e das forças motrizes do sistema modelado, MARTINS *et al.* (2004).

2.1.1 Elementos de uma Paisagem

Uma paisagem terrestre pode ser classificada no que tange ao grau de intervenção humana em: paisagem natural, modificada ou organizada, DOLFUSS (1978, *apud* SOARES-FILHO, 1998b). Segundo este autor, uma paisagem natural seria aquela que não foi submetida à ação do homem, pelo menos em data recente, enquanto a modificada, como o nome indica, foi transformada, em até certa extensão, pelo homem, consistindo em um estado de transição para a paisagem organizada. Esta última, também conhecida como paisagem cultural, resulta de uma ação meditada, combinada e contínua do homem sobre o ambiente. Paisagens culturais podem ser ainda descritas como paisagens rurais, caracterizadas pelas atividades agropecuárias ou urbanas, produto esta de aglomerações humanas.

Dessa forma, a análise de uma paisagem, quer seja natural, modificada ou cultural, leva em conta o reconhecimento, em diferentes escalas, dos elementos de paisagem, os

quais aparecem como manchas ou retalhos e variam de tamanho, forma, tipo, heterogeneidade e características de bordas, SOARES-FILHO (1998).

FORMAN & GODRON (1986), denominam como elementos de paisagem, unidades ecológicas básicas que possuem relativa homogeneidade, não importando se eles são de origem natural ou humana. Considerando que uma paisagem, do ponto de vista humano, teria a dimensão de algumas dezenas de quilômetros ou mais, o conceito de escala espacial, neste contexto, implicaria que esses elementos de paisagem seriam usualmente identificáveis em fotografias aéreas ou mesmo imagens de satélite, podendo variar de 10 m a 1 km ou mais de extensão.

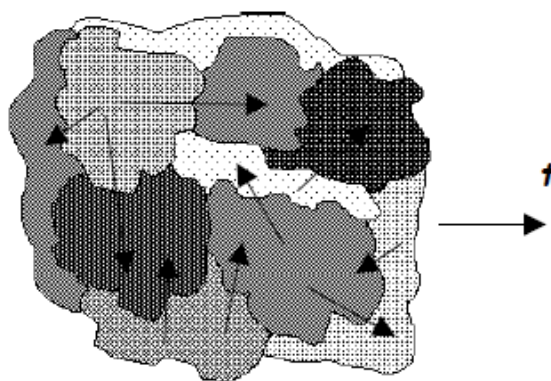


Figura 1 – Elementos de paisagem e suas manchas segundo FORMAN & GODRON (1986, *apud* SOARES-FILHO, 1998b).

As setas na figura 1, indicam as interações entre as manchas nas trocas de materiais e energia (função), enquanto o padrão formado pelas manchas definem a estrutura da paisagem. A evolução da estrutura e da função ocorre pelas mudanças através do tempo. Estão presentes nessa representação de paisagem sete elementos de paisagem e dez manchas.

SOARES-FILHO (1998b) cita que a definição de FORMAN & GODRON (1986), de elemento da paisagem se aproximam mais com uma metodologia de classificação voltada à representação de unidade de uso e cobertura do solo. Por isso, o autor propõe que seja usado o termo elemento de paisagem no sentido de se referenciar tipos de uso e cobertura do solo, enquanto o termo unidade de paisagem, indicando regiões, representativas de sistemas ambientais formados por um conjunto único de vegetação, solo, relevo e clima.

LANG & BLASCHKE (2009), citam que uma paisagem é dividida em compartimentos, na acepção da ecologia de paisagens de idioma alemão, designados

como complexos parciais que, de acordo com as esferas terrestres, participam da estrutura da paisagem, ou seja, rochas, solo, água, relevo, clima e vida vegetal e animal. Onde a ocorrência simultânea dos componentes, designados também de Geofatores ou Fatores da Paisagem, levam à formação de elementos da paisagem que, em consequência disso, são delimitados por diferentes critérios.

No âmbito deste trabalho, usaremos o conceito de elementos da paisagem como manchas, sendo a menor unidade espacial visível na escala adotada, melhor definida no capítulo da metodologia. Essa metodologia mais prática do ponto de vista da Ecologia de Paisagem parece-nos bem justificada em função da tecnologia aplicada (SIG, Sensoriamento Remoto e modelagem dinâmica espacial) e da finalidade desse trabalho.

2.1.2 Estrutura, função e mudança

Para FORMAN & GODRON (1986), cada elemento da paisagem na escala de análise definida pode ser reconhecido como uma mancha, um corredor ou uma matriz de fundo. Objetos ecológicos, no sentido amplo, como animais, plantas, biomassa, energia de calor, água e nutrientes minerais são distribuídos de forma heterogênea entre esses elementos da paisagem, que por sua vez, variam em tamanho, forma, número, tipo e configuração. Determinar essas distribuições espaciais é entender a estrutura da paisagem. Objetos ecológicos, no entanto, continuamente movem-se ou fluem entre os elementos da paisagem. Determinar e prever esses fluxos ou interações entre os elementos da paisagem é o entendimento da função da paisagem.

Este princípio explicita o caráter multidisciplinar dos estudos da estrutura da paisagem. Paisagens são heterogêneas e diferem na distribuição de espécies, energia e materiais entre as manchas, corredores e matriz presentes. Conseqüentemente, paisagens diferem funcionalmente nos fluxos de espécies, energia e materiais entre esses elementos estruturais da paisagem.

O mosaico de manchas composto por elementos de paisagem definem um padrão estrutural particular de cada paisagem. Diversas paisagens, formadas por distintos processos geomorfológicos, regimes de perturbação e interferência humana possuem em comum essa estrutura fundamental. Nesse contexto, a estrutura pode ser entendida como o resultado da lei (função geradora) que governa a organização espacial dos elementos da paisagem, gerando um arranjo espacial representado pelo padrão ou textura, FORMAN & GODRON (1986).

A importância do conceito de estrutura advém também do reconhecimento que, um arranjo espacial da paisagem, em um instante no tempo, pode revelar não só os processos que estão ocorrendo, mas também refletir os processos que determinaram o seu desenvolvimento. Por assim dizer, os componentes da paisagem interagem, resultando em padrões, que são reflexos de mecanismos causais e, em menor proporção, de componentes aleatórios, FORMAN & GODRON (1986).

Desse modo, pode-se dizer que o estudo do relacionamento espacial entre os elementos de paisagem constitui um tema central de pesquisa na Ecologia de Paisagem, tendo em vista que a estrutura horizontal da paisagem relaciona à distribuição de objetos ecológicos, energia calórica e nutrientes minerais com o tamanho, a forma, o número, o tipo e a configuração das manchas, corredores e matriz, FORMAN & GODRON (1986).

A estrutura horizontal da paisagem corresponde segundo LANG & BLASCHKE (2009), ao padrão específico externo da paisagem. Ela se origina por meio de um determinado ordenamento de elementos homogêneas da paisagem. A associação de tais elementos, equivalentes do ponto de vista hierárquico e de escala, determina a textura da paisagem.

A observação desses elementos é efetuada na forma de observação espacial. A metodologia básica desse conceito assinala que todos os objetos geográficos se distinguem por meio de sua localização específica e, em particular, por meio das relações de posição e das interconexões com os fenômenos geográficos vizinhos.

Segundo LANG & BLASCHKE (2009), quando o enfoque da observação se concentra mais nos aspectos abióticos e geomorfológicos, então se fala de tipos de textura. Quando se ressalta aspectos bióticos e de ecologia animal, fala-se principalmente de mosaico de manchas. Dessa forma, a estrutura da paisagem horizontal pode ser restituída por meio de procedimentos imageadores e ser caracterizada por meio de medidas da estrutura do espaço.

Neste estudo partiremos do ponto de vista de que a estrutura da paisagem é formada e alterada em grande parte pelo homem, por isso, também será vista como um tipo de interfase entre as esferas biótica, abiótica e humana. A influência humana é dividida em diferentes campos de atividade, incluindo a cultural, econômica e da técnica, em conformidade com as características da área de estudo.

Uma compreensão atual da paisagem, segundo LANG & BLASCHKE (2009), prevê um ecossistema total, que percebe o homem como parte do sistema e, não como uma

instância externa. Isso não significaria que as ações humanas seriam pré-definidas sistemicamente, como por instinto, mas sim por ações contextualizadas.

A forma de expressão espacial da influência humana sobre a paisagem é a forma específica de uso do solo. Este pode ser considerado como um tipo de área de sombreamento ou integração entre os sistemas naturais e socioeconômicos, LANG & BLASCHKE (2009).

Em adequação ao conjunto estrutural, a heterogeneidade apresenta-se também com base nas características funcionais de paisagens, que de modo geral são multifuncionais. A múltipla funcionalidade, segundo LANG & BLASCHKE (2009), assume três aspectos: (1) múltipla funcionalidade como uma função agregadora espacial, associada a diferentes unidades de paisagem; (2) múltipla funcionalidade como ocorrência de funções no mesmo local, mas temporalmente defasadas; (3) múltipla funcionalidade como integração de funções que ocorrem ao mesmo tempo e estão relacionadas à mesma unidade de paisagem, como uma autêntica superposição de funções, LANG & BLASCHKE (2009).

A partir de uma visão abiótica, os fluxos de materiais e de energia estão em primeiro plano, eles incluem processos de amortecimento (faixa de distância), filtragem e transformação que servem, por exemplo, a amortecimento de certas intervenções humanas ou à capacidade de recuperação após uma intervenção. Aqui, função é entendida no sentido sistêmico, como a passagem de grandezas de entrada para grandezas de saída transformadas, considerando-se determinados parâmetros. Numa forma de observação mais socioeconômica, podemos distinguir, entre outras, funções de habitação, transporte e produção.

Um enfoque importante deste estudo é a alteração espaço-temporal da paisagem, ou seja, o seu desenvolvimento. Nesse sentido, LANG & BLASCHKE (2009), cita que as paisagens estão submetidas a uma mudança gradual, independente da influência humana. Essas mudanças ocorrem de forma cíclica, repetindo-se num espaço de tempo regular e de forma concomitante ocorrências episódicas também ocorrem, porém de forma irregular. Tais eventos, então, apresentam certa regularidade probabilística, eles ocorrem, na escala de tempo histórico, de forma direcional, seguindo numa certa direção e com tendência a continuar nela. Essa tendência implica em certa taxa de mudança, associada à medida de intensidade.

Seguindo o princípio de mudança na paisagem citado por FORMAN & GODRON (1986), um efeito de homogeneização é proporcionado pelo processo de colonização e

crescimento das plantas, a modificação do solo, e colonização animal. No entanto, uma paisagem nunca é totalmente homogênea, porque as taxas de variação são diferentes em cada elemento da paisagem, causadas por distúrbios ou estabilidade.

Distúrbios moderados normalmente estabelecem mais manchas ou corredores na paisagem. Distúrbios graves podem eliminar muitas manchas e corredores, como por exemplo, em uma paisagem arenosa mais homogênea, ou uma cobertura ainda vegetativa pode ser eliminado para expor um substrato heterogêneo.

“When undisturbed, horizontal landscape structure tends progressively toward homogeneity; moderate disturbance rapidly increases heterogeneity, and severe disturbance may increase or decrease heterogeneity.” [Quando não perturbada, a estrutura horizontal da paisagem tende progressivamente a homogeneidade; perturbação moderada tende a aumentar rapidamente a heterogeneidade; e perturbação grave pode aumentar ou diminuir a heterogeneidade]. FORMAN & GODRON (1986), p. 27

2.1.3 Manchas

Os menores elementos individuais observáveis da paisagem, de acordo com a escala de detecção e observação, são designados, segundo LANG & BLASCHKE (2009), como *patch* (mancha) ou, de um modo geral, como elemento da paisagem, assim como usaremos em nosso trabalho.

Uma *patch* é definida por FORMAN & GODRON (1986), como uma forma da superfície delimitada não linearmente, e a sua aparência é distinta em relação ao seu entorno. Normalmente, as manchas resultam da associação de diferentes espécies vivas. Contudo, algumas manchas podem não conter vida nenhuma ou apenas na forma de micro-organismos, como no caso de serem formadas pela presença proeminente de rocha, solo, pavimentos ou edificações.

Nesse contexto existiriam quatro tipos de manchas que podem ser reconhecidas em uma paisagem baseadas no ponto fisionômico, a saber: manchas de perturbação; manchas remanescentes; manchas de regeneração ou de recursos ambientais; e manchas introduzidas, como no caso das manchas agrícolas ou formadas por habitações, FORMAN & GODRON (1986); LANG & BLASCHKE (2009).

Perturbações em pequenas áreas na matriz de uma paisagem produzem uma mancha de perturbação. A perturbação ou distúrbio consiste em um evento que causa uma mudança significativa no padrão normal de uma paisagem. Os regimes de perturbação

podem ter diversas causas, como no exemplo de distúrbios naturais, tais como fogo, escorregamento de encostas; ou pela prática de uso do solo, como a extração de madeira em uma floresta.

Por outro lado, manchas remanescentes podem restar em meio a um mar de perturbações, como no exemplo de manchas de vegetação, poupadas pelo uso agrícola e que posteriormente passarão a servir como pequenas ilhas fontes de sementes necessárias ao processo de regeneração vegetal.

Por sua vez, manchas de regeneração ou de recursos ambientais podem ocorrer assemelhando-se às manchas remanescentes, mas com uma origem distinta. Um processo de regeneração ocorre quando um local, dentro de uma área de perturbação crônica, fica livre, permitindo o desenvolvimento do processo de sucessão vegetal. Portanto, em uma paisagem rural, a dinâmica das manchas agrícolas depende largamente das atividades de manutenção. Interrompendo-se esta atividade, a mancha será invadida pela vegetação, dando lugar ao processo de sucessão e o seu conseqüente desaparecimento.

SOARES-FILHO (1998b), cita que é cada vez mais comum encontrar paisagens antropogênicas formadas por manchas introduzidas por habitações e atividades agrícolas, cujos padrões não mostram relação com os atributos naturais, mas sim com o contexto socioeconômico de uma região, como é o caso do uso do solo.

Para fins de modelagem dinâmica de uma paisagem, segundo SOARES-FILHO (1998b) uma mancha, qualquer que seja seu tipo ou origem, se faz representar por uma entidade em um mapa, formada por um único polígono ou mesmo corresponder a uma área singular, definida por um conjunto de células (*pixel*), contíguos de igual rótulo ou valor (representação matricial), equivalentes, por exemplo, a um tema obtido pela classificação digital de uma imagem de satélite. Nesses termos cartográficos, as manchas vão possuir ainda atributos nominais definidos pelos tipos de elementos de paisagem que as compõem (estradas, florestas, campos agrícolas e etc.).

LANG & BLASCHKE (2009), cita que a delimitação de manchas é um critério decisivo para um trabalho com o conceito de estrutura da paisagem, onde os métodos podem levar a resultados diferentes, dependendo do tipo de delimitação. Dentre outros métodos, os autores comentam o que usaremos nesse trabalho, a delimitação visual-manual:

“... manchas delimitadas por meio de interpretação visual de imagens. Ainda que a capacidade de interpretação humana tenha altíssima

capacidade e a interpretação por especialistas seja efetuada de acordo com uma determinada chave de interpretação, ela permanece subjetiva e frequentemente é de difícil repetição.” p. 119

NOVO (2008); ROSA (2009), citam que a vetorização (manual-visual), a partir de imagens orbitais, apresenta maior precisão na delimitação de classes de uso e cobertura do solo. Em áreas com grande heterogeneidade de manchas, como o caso do baixo curso do rio dos Sinos, necessitamos, além de uma delimitação mais precisa, uma base de dados cartográficos diversificados, observações de campo e experiência por parte do analista com relação às características socioeconômicas da região.

2.1.4 Matriz

A matriz de uma paisagem pode ser definida como o seu elemento mais extensivo e conectado, que possui o papel preponderante no funcionamento da paisagem, FORMAN & GODRON (1986); LANG & BLASCHKE (2009).

Segundo esses autores, a matriz também pode ser caracterizada pela sua maior conectividade e pelo seu controle preponderante no fluxo de energia e na dinâmica da paisagem. Por exemplo, os corredores de vegetação em torno de campos agrícolas ou pastagens, atuando como áreas fontes de sementes ao processo de regeneração florestal.

Se nenhum tipo de elemento de paisagem for predominante, o maior grau de conectividade indicará qual elemento corresponde à matriz. Ainda, se nenhum desses critérios for observado, o papel dominante na dinâmica da paisagem determinará a matriz. Quando o elemento da paisagem mais estendido corresponder a menos de 50% da área, os outros dois critérios tomam maior importância, LANG & BLASCHKE (2009).

SOARES-FILHO (1998b) ressalta que qualquer estudo de paisagem necessita reconhecer as suas mudanças através do tempo, posto que a mesma consista, em um dado momento, de um estágio no qual os processos dinâmicos estão ocorrendo, não sendo óbvio o destino dos elementos de paisagem.

O cenário emergente de uma paisagem consiste então em um mosaico de manchas de vários tamanhos, de várias origens e em vários estágios de regeneração, que se encontra em perpétua alteração, podendo ou não tender a equilíbrios transitórios de conversão a várias taxas. Portanto, qualquer estudo quantitativo das dimensões

corológicas da paisagem requer que o tempo, ou as mudanças temporais sejam consideradas, quer seja na compreensão do relacionamento dos padrões aos processos naturais e antropogênicos que os originaram ou para fins de prognósticos futuros.

2.2 Modelagem da dinâmica de paisagens

Como discorrido anteriormente, uma paisagem se encontra em perpétua evolução, podendo a sua estrutura e composição mudar drasticamente ao longo do tempo. Da necessidade de investigar essas mudanças surgiu ao longo das últimas décadas uma gama de técnicas e conceitos de modelagem baseados em sensoriamento remoto, geoprocessamento e SIG's.

Nesse sentido, SOARES-FILHO (1998b), cita que durante as décadas de 60 e 70 ocorreu um rápido desenvolvimento de técnicas de mapeamento assistido por computador e de gerenciamento de dados espaciais. Já nos anos 1980, o enfoque concentrou-se na extensão desses campos para um conjunto robusto de capacidade analítica, típica dos atuais programas de SIG. Este desenvolvimento, em conjunto com a ampla disponibilidade de dados de sensoriamento remoto, abriu uma grande avenida para a pesquisa de modelagem de mudanças na paisagem.

Porém, até recentemente, a maioria das pesquisas científicas realizadas para construir modelos espaciais que representem a realidade geográfica, utilizavam sistemas computacionais, que tratavam os dados espaciais de uma forma estática, em intervalos de tempo discretos e desconectados entre si, desconsiderando o caráter dinâmico da realidade geográfica, PEDROSO & CAMARA (2007).

A modelagem dinâmica, segundo esses autores, procura transcender as limitações atuais dos SIGs, fortemente baseados em uma visão estática, bidimensional do mundo. O objetivo dos modelos dinâmicos em SIG é realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo. Onde, um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações nas forças direcionadoras.

Normalmente, os SIG's são desenvolvidos a partir de suposições preestabelecidas quanto à homogeneidade, a uniformidade e a universalidade das propriedades de seus componentes, que incluem o espaço e as relações espaciais, o tempo e o modelo matemático que descreve o fenômeno. Entretanto, para modelar processos dinâmicos em SIG com o nível necessário de realismo, estas suposições rígidas têm que ser

flexibilizadas de tal forma que o sistema seja capaz de representar, COUCLELIS (1997, *Apud* PEDROSO & CAMARA, 2007):

- O espaço como uma entidade não homogênea, tanto nas suas propriedades, quanto na sua estrutura;
- As vizinhanças como relações não estacionárias;
- A regra de transição como regra não universal;
- A variação do tempo como um processo regular e irregular;
- O sistema como um ambiente aberto a influências externas.

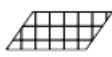

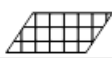



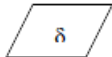
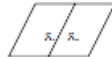

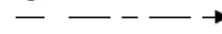


Espaço	Estrutura	regular 	irregular 
	Propriedades	uniforme 	não uniforme 
Vizinhança	estacionária 	não estacionária 	
Função de Transição	universal 	não universal 	
Tempo	regularidade 	irregularidade 	
Sistema	fechado 	aberto 	

Figura 2 - Requisitos para modelagem em SIG.

Fonte: COUCLELIS (1997, *Apud* PEDROSO & CAMARA, 2007).

Segundo PEDROSO & CAMARA (2007), para implementar sistemas espaciais dinâmicos, alguns princípios básicos relativos aos principais elementos destes sistemas devem ser considerados. Entre estes elementos destacam-se a questão da representação do espaço e do tempo, onde o modelo dinâmico a ser utilizado para a representação do fenômeno espacial-temporal e a abordagem computacional para implementar esses princípios deve ocorrer de forma integrada e consistente. Para tanto, discutiremos esses elementos nas próximas seções.

SOARES-FILHO (1998b) cita que a modelagem se refere ao processo de pesquisa que leva à geração de modelo (representação) de um sistema. Este processo se desenvolve, então, através da definição de um conjunto de hipóteses ou predições, que

poderão ser comparadas com medidas do mundo real. Dependendo da concordância entre o observado e o resultado gerado, o modelo será aceito ou modificado de alguma maneira, para novamente ser testado.

De acordo com BATTY (1976, *apud* ALMEIDA *et al.*, 2007), o processo de modelagem dinâmica relaciona-se diretamente com o método científico, uma vez que nele conjeturam-se hipóteses, as quais são refutadas por experimentos, por novas observações, e, sobretudo, por *insights*.

Dessa forma, o propósito da modelagem dinâmica é simular mudanças espaço-temporais dos atributos do meio ambiente relacionados também a territórios. Sua concepção permite o entendimento dos mecanismos influentes que determinam a função de mudanças e, assim, avaliar como um sistema evolui diante de um conjunto de circunstâncias definidas pelo analista, GRIGIO (2008).

2.2.1 Sistemas

Na definição de LIMA & QUEIROZ (1997, *apud* MARTINS *et al.*, 2004), a paisagem é um sistema. Na paisagem (um todo) os elementos são coordenados entre si e funcionam (aspectos dinâmicos) organizados no espaço (estrutura da paisagem).

Com relação ao conceito de sistema, LIMBERGER (2006) cita que não é possível identificar uma definição que unifique o que seja sistema, porém apesar de variarem as definições, normalmente encontram-se presentes as características principais desse conceito, como o caráter global, o aspecto relacional, a organização, a hierarquização.

Ainda neste sentido, dentre os vários conceitos existentes sobre sistema, alguns autores colocam que para se caracterizar um sistema é necessário que exista qualquer conjunto de objetos que possam ser relacionado no tempo e no espaço. No entanto, outros dizem que além de relações é necessário que haja uma finalidade, a execução de uma função por parte desse conjunto inter-relacionado, para que possa ser considerado como um sistema, LIMBERGER (2006).

BERTALANFFY (1973, *apud* VICENTE & PEREZ FILHO, 2003), defini sistemas como um conjunto de elementos em interação. O autor da Teoria Geral dos Sistemas na década de 1950 faz referência à condição mais geral e básica que permeia todos os tipos de sistemas.

KOESTLER (1969, *apud* MARTINS *et al.*, 2004), cita uma noção mais ampla, onde podemos compreender um sistema como um conjunto de elementos com diversas

ligações entre esses elementos; e um conjunto de ligações entre o sistema e seu ambiente, isto é, cada sistema é composto de subsistemas e todos são partes de um sistema maior onde cada um deles é autônomo e ao mesmo tempo aberto e integrado ao meio, ou seja, existe uma inter-relação direta com o meio. Dessa forma, o conceito de sistema é abstrato, ou seja, uma simplificação da realidade, um modelo.

Segundo BERTALANFFY (1973, *apud* VICENTE & PEREZ FILHO, 2003), um sistema pode ser classificado em aberto ou fechado. Os sistemas fechados abrangem a relação de elementos em interação que tem seus princípios regidos pelos conceitos tradicionais da física, especificamente as leis da termodinâmica, onde os fluxos de energia e matéria são invariavelmente controlados dentro de um ambiente fechado. Nos sistemas abertos, as condições iniciais sofrem a influência direta de um número enorme de variáveis e variantes em processo constante de reações e contrarreações, expressas nas oscilações de seus níveis de entropia.

Enquadram-se nesse tipo de sistema a totalidade das relações que compõem a realidade como um todo, desde uma célula, passando por bacias hidrográficas, às cidades, a economia, a sociedade, etc. Há uma relação simbiótica no tempo e no espaço, sendo diversas as concepções teóricas e conceitos desenvolvidos a partir da ideia de sistemas abertos, dando base à abordagem sistêmica, principalmente a partir de meados do século XX, VICENTE & PEREZ FILHO (2003).

Segundo CHRISTOFOLETTI (1979, *apud* LIMBERGER, 2006), um sistema é caracterizado por: a) seus elementos ou unidades; b) suas relações - os elementos dependem um dos outros, através de ligações que denunciam os fluxos; c) seus atributos – são as qualidades atribuídas a um sistema para que se possa dar-lhe características, tais como comprimento, área, volume, composição ou densidade dos fenômenos observados; d) entrada (*input*); e) saída (*output*).

Um sistema é composto por matéria, energia e estrutura. A matéria se caracteriza pelo material que será mobilizado através do sistema, é aquilo que vai se movimentar. A energia se caracteriza pelas forças que fazem o sistema funcionar, gerando a capacidade de realizar trabalho. Já a estrutura é constituída pelos elementos e suas relações, expressando-se através do arranjo de seus componentes, CHRISTOFOLETTI (1979, *apud* LIMBERGER, 2006).

Para MORIN (1997, *apud* LIMBERGER, 2006) um sistema é, ao mesmo tempo, um e múltiplo. Ou seja, é único, mas também é múltiplo, sendo que é composto por vários outros subsistemas. O subsistema (parte) tem uma identidade complexa, múltipla e uma

ao mesmo tempo, pois a parte de um sistema tem sua identidade própria e participam da identidade do todo. Assim, o todo não é somente a soma das partes; depende da intensidade das interações e inter-relações que ocorrem entre as partes. E para compreender as características das partes constitutivas de um sistema é necessário que se conheça não somente as partes, mas também as suas relações.

Ou seja, as propriedades essenciais, ou “sistêmicas”, são propriedades do todo, que não são possuídas pelas partes; as propriedades do sistema são destruídas quando um sistema tem seus elementos isolados, separados. As partes só podem ser entendidas através do contexto do todo maior, LIMBERGER (2006).

2.2.2 O Espaço

O espaço é um conceito chave na Geografia e, por extensão, na Ciência da Informação Espacial. Dessa forma, cabe-nos fazer uma breve reflexão sobre esse elemento base, ponto de partida e fonte de complexidade para o processo de simulação de alterações em uma paisagem.

MASSEY (2009) traz a ideia de espaço, de uma forma interessante e filosófica, muito ligada à complexidade geográfica, dos fluxos descontínuos entre os lugares, destacando as armadilhas da representação espaço-temporais estáticas.

Para essa autora, o espaço é como uma esfera de uma simultaneidade dinâmica, constantemente desconectada por novas chegadas, constantemente esperando por ser terminada pela construção de novas relações. Está sempre sendo feito e sempre, portanto, em certo sentido, inacabado. Se realmente, tomássemos um recorte através do tempo, seria cheio de buracos, de desconexões, de primeiros encontros provisórios malformados. Tudo está conectado com tudo, pode ser um fato político qualquer, com implicações mais amplas do que aquilo que provavelmente comumente reconhecemos.

MASSEY (2009) nos indica de forma sutil a não conduzir à visão por um holismo sempre constituído, pois interações podem ocorrer ou não, e elos potenciais que podem jamais ser estabelecidos. Devemos considerar resultados imprevisíveis e histórias em curso. Espaço, então, não pode ser jamais, aquela simultaneidade completa na qual todas as interconexões já tenham sido estabelecidas, na qual cada lugar já está ligado a todos os outros.

Ainda para MASSEY (2009), o acaso do espaço implica o inesperado. O especificamente espacial dentro do tempo-espaço é produzido por isso, algumas vezes

por um acaso circunstancial, outras não, arranjos relacionados entre si, que é o resultado da existência de uma multiplicidade de trajetórias. Em configurações espaciais, narrativas de outra forma não conectadas podem ser conduzidas a entrar em contato com outras, previamente conectadas. Há sempre um elemento de caos. Este seria o acaso do espaço.

SANTOS (2004), traz o conceito de espaço a partir da noção de relatividades introduzidas por Einstein, onde as formas seriam comparáveis à matéria e a energia à dinâmica social. Dessa forma, o espaço deve ser considerado como um conjunto de relações realizadas através de funções e de forma que se apresentam como testemunho de uma história escrita por processos do passado e do presente. Isto é, o espaço se define como um conjunto de formas representativas de relações sociais do passado e do presente e por uma estrutura representada por relações sociais que estão acontecendo diante dos nossos olhos e que se manifestam através de processos e funções. O espaço é, então, um verdadeiro campo de forças cuja aceleração é desigual.

SANTOS (2006) faz uma distinção entre espaço absoluto e espaço relativo, como o espaço dos fixos e o espaço dos fluxos. O espaço absoluto seria uma estrutura para localizar pontos, trajetórias e objetos. Espaço relativo seria o espaço constituído pelas relações espaciais entre os elementos.

PEDROSO & CAMARA (2007) traduzem estes conceitos para a representação computacional, claro de forma aproximada, como sendo representações associadas a recobrimentos planares (mapas de polígonos e matrizes) e representações associadas à conectividade (grafos). Um caso típico de medida realizada no espaço absoluto seriam os índices de auto correlação espacial. Neste caso, um dos instrumentos básicos é a matriz de proximidade espacial, cujo cálculo usualmente é feito em função de distância euclidiana entre objetos ou da existência de uma fronteira entre eles.

Em muitos fenômenos geográficos, os objetos estabelecem relações entre si que independem das relações espaciais típicas como as relações topológicas, direcionais e de distância. Estes fenômenos geralmente incluem relações como o fluxo de pessoas ou de materiais, conexões funcionais de influência, comunicação e acessibilidade, entre outras, COUCLELIS (1997, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007).

COUCLELIS (1997, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007) propõe a ideia de espaço próximo, como uma extensão dos conceitos de espaço absoluto e relativo. No espaço próximo o conceito chave é a vizinhança associada à noção de proximidade, que conduzem também ao conceito de proximidade funcional ou influência. O conceito de vizinhança é facilmente visualizado em representações matriciais do espaço. Algumas

operações espaciais disponíveis em GIS como filtros espaciais, por exemplo, utilizam a noção de espaço próximo de forma limitada. No filtro espacial, o estado de uma célula (um pixel de uma imagem) é modificado com base nos estados das demais células em sua vizinhança definida através de uma máscara.

A abstração fundamental na maior parte dos GIS atuais é o conceito de mapa, fortemente relacionado com noções cartográficas e, portanto, do espaço absoluto. Em processos dinâmicos a noção de espaço relativo e próximo são fundamentais para estabelecer e representar fluxos e conexões entre entidades do sistema, PEDROSO & CAMARA (2007).

2.2.3 O Tempo

A ordem temporal refere-se ao modo como o tempo flui. Neste caso, pode-se assumir que o tempo flui de forma linear, ramificada ou cíclica. No tempo linear considera-se que o tempo flui sequencialmente, ou seja, existe uma ordem de precedência entre os pontos no tempo, de tal forma que cada ponto tenha apenas um sucessor e um antecessor. No tempo ramificado múltiplos pontos podem ser os sucessores ou antecessores imediatos de um mesmo ponto. O tempo cíclico é utilizado para modelar eventos e processos recorrentes, EDELWESS & OLIVEIRA (1994, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007).

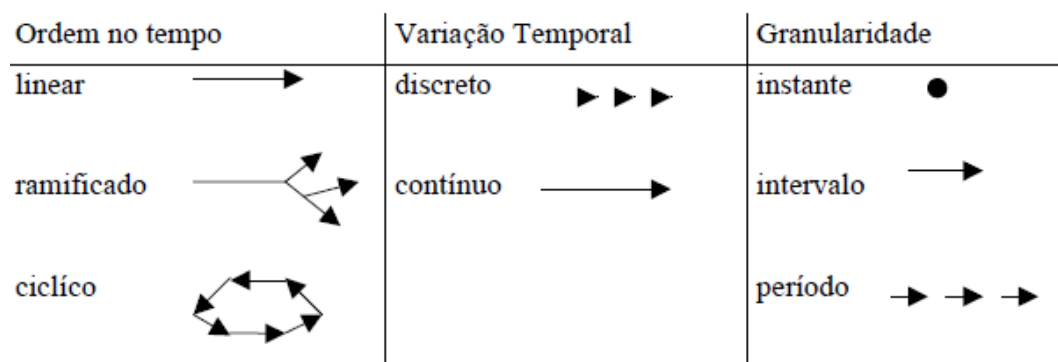


Figura 3 – Estruturas temporais.

Fonte: WORBOYS (1998, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007).

Com relação à variação temporal duas possibilidades podem ser consideradas: tempo contínuo e discreto. Uma variável temporal contínua é usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão. Por exemplo, a

expansão da área de desmatamento de uma floresta entre dois instantes de tempo medidos e interpolados. Se necessário, pode-se gerar um novo mapa para representar a área desmatada entre os instantes t e t' porque este processo é contínuo no tempo.

Uma variável temporal discreta é usada quando o tempo é medido em certos pontos ou intervalos e a variação é descontínua entre estes pontos. Uma delimitação de lotes de um cadastro imobiliário pode ocupar uma posição num instante t e outra num instante t' , mas não faz sentido dizer que a delimitação ocupou alguma posição intermediária entre t e t' , PEDROSO & CAMARA (2007).

Associado ao conceito de variação temporal discreta existe o conceito de *Cronos*. Um *chronon* é a menor duração de tempo suportada por um sistema e pode variar em diferentes aplicações, EDELWEISS & OLIVEIRA (1994, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007). A granularidade temporal de um sistema está diretamente relacionada com a duração de um *chronon*. As diferentes granularidades de um sistema temporal conduzem à definição de instante e intervalo de tempo. Um instante de tempo representa um ponto particular no tempo. Um intervalo é o tempo decorrido entre dois instantes e um período consiste de uma sequência de intervalos de tempo.

2.2.4 Modelos

Um modelo pode ser entendido como a representação de um sistema, a qual pode se dar através de várias linguagens: matemática, lógica, física, analógica, icônica, gráfica etc., e segundo uma ou mais teorias. Um sistema é um conjunto de partes ou subsistemas interconectados, apresentando interdependência entre os componentes e seus atributos. Por sua vez, a teoria pode ser definida como sendo um conjunto de ideias, postulados, relações causais etc., que formam um todo coerente, desenvolvido com o intuito de explicar um grupo de fatos ou fenômenos, estabelecendo leis fundamentais, relações sistemáticas e princípios gerais, NOVAES (1981, *apud* ALMEIDA *et al.*, 2007).

Segundo PEDROSO & CAMARA (2007), um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Ao se construir um modelo, dependendo do objetivo, pode-se dar ênfase a um ou outro destes elementos. Nesta visão, os modelos podem ser classificados em empíricos e de sistemas.

Modelos empíricos focalizam os relacionamentos entre as variáveis do modelo, a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro. Os modelos de Cadeias de Markov e de Logístico de Difusão servem como

exemplo. Modelos de sistemas são descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, enfatizando as interações entre todos os componentes de um sistema. Como exemplo, podemos citar os modelos Simulação Espacial Dinâmica.

Na Tabela 1, segue um resumo das principais características dos modelos citados como exemplo anteriormente, segundo o potencial de cada um deles para responder as perguntas por que, quando e onde. Questões essas indicadas por PEDROSO & CAMARA (2007), como essenciais para descrever de forma quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial.

Tabela 1 - Resumo das características de modelos de simulação espacial.

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

Fonte: PEDROSO & CAMARA (2007).

SOARES-FILHO (1998b) cita que os modelos podem ser classificados genericamente em três grupos: réplica, conceitual e matemático. Os modelos classificados como matemáticos que serão utilizados nesse trabalho ainda podem ser classificados em determinísticos, descritivos ou estocástico-probabilísticos.

Um modelo descritivo que envolva a análise de parâmetros de seus diversos estados, através da variação dos elementos do sistema e de suas relações, é denominado de modelo exploratório. Estes são também considerados dinâmicos, posto

que descrevam o processo de evolução de um sistema ao longo do tempo, NOVAES (1982, *apud* SOARES-FILHO, 1998).

Em um modelo determinístico de dinâmica, a evolução de um sistema no tempo e no espaço pode ser completamente previsto, desde que seja conhecido um conjunto de condições iniciais. Por sua vez, os modelos de dinâmica estocástico-probabilísticos (estatísticos), utilizam variáveis aleatórias segundo uma lei imutável, mas que depende de fatores aleatórios ou de acaso. Cada vez que um modelo probabilístico é rodado, um resultado diferente pode ser obtido.

PEDROSO & CAMARA (2007), cita que os modelos de sistemas procuram descrever o sistema como um todo, isto é, tentam representar as interações entre todos os seus componentes. Uma característica chave destes modelos é a eficiência com que abordam a dimensão espacial, implementando conceitos como as relações de vizinhança e suportando o uso combinado de múltiplas escalas.

Modelos de simulação dinâmica espacial baseiam-se em modelos de ecossistemas com extensões para acomodar a heterogeneidade espacial e processos humanos de tomada de decisão. Uma abordagem para desenvolver modelos de simulação dinâmica espacial é representar o espaço como uma matriz de células e aplicar as equações matemáticas a cada uma das células da matriz, simultaneamente. Cada célula do modelo está conectada com suas células vizinhas, de tal forma que é possível estabelecer um fluxo entre células adjacentes. Isto simplifica sobremaneira o mecanismo de predições do sistema porque, por exemplo, se uma célula tem três vizinhos com estado x , é altamente provável que o estado desta célula venha a ser x também.

Entretanto, este raciocínio simplista pode ser aperfeiçoado em regras de transição. Outro aperfeiçoamento desse modelo é a possibilidade de incorporar processos de tomada de decisões. Modelos que incorporam este mecanismo são chamados modelos baseados em regras. As regras de tomada de decisão são representadas através de abstrações muito semelhantes àquelas que ocorrem na mente humana, PEDROSO & CAMARA (2007).

2.2.5 Modelos Autômatos Celulares (AC)

A plataforma de modelagem dinâmica que usaremos nesse trabalho é estruturada em modelos de sistemas de simulação espacial dinâmica baseada em Autômatos Celulares. Dessa forma faremos uma revisão mais aprofundada das características desse modelo.

Segundo ALMEIDA *et al.* (2007), modelos baseados em Autômatos Celulares (AC), têm a sua origem na Geografia Quantitativa, devido em grande parte ao trabalho de Waldo Tobler, durante os anos 70, na Universidade de Michigan (EUA). Tobler já em 1979 começou a explorar a aplicabilidade de modelos de autômatos propriamente ditos em sistemas geográficos, o que culminou em seu famoso artigo *Cellular Geography*.

Nos anos 80, em Santa Barbara, Couclelis influenciada por Tobler continuou essas especulações até o final da década, quando então as aplicações de autômatos começaram a se consolidar e passaram a ser dotadas de aprimoramentos conceituais, como as noções de fractais, entropia, criticidade, etc.

A década de 90 presenciou sucessivos refinamentos nos modelos urbanos de autômatos celulares, que passaram a incorporar dimensões ambientais, socioeconômicas e políticas, e conseguiram enfim articular níveis analíticos de micro e macro escala.

ALMEIDA (2003) cita que, atualmente, os modelos de (AC) possuem aplicações nas mais diversas áreas, desde a física teórica e empírica até mudanças de uso e cobertura do solo, engenharia e controle de tráfego, disseminação de epidemias, biologia comportamental, dentre outras.

Nos modelos baseados em (AC), segundo PEDROSO & CÂMARA (2007), o espaço é representado por um mosaico de células, geralmente de tamanhos e formatos idênticos. Algumas das formas mais simples utilizadas para representar células em (AC) são apresentadas na Figura 4.

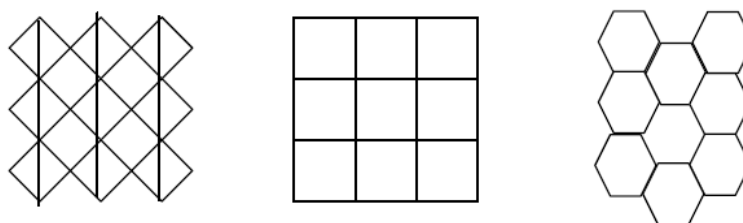


Figura 4 – Representações de células em autômatos celulares.

Fonte: CÂMARA (1996, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007).

Sobre cada célula de um (AC) são aplicadas regras de transição, que determinam quando e porque o estado de uma célula se altera e podem ser qualitativas ou quantitativas.

Sobre os mecanismos de (AC), SOARES-FILHO *et al.* (2003), cita que, consiste num arranjo n-dimensional de células, no qual o estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com o arranjo específico de certa vizinhança, sendo todas as células atualizadas simultaneamente a passos discretos de tempo.

Segundo ALMEIDA (2003), mesmo nos mais simples (AC), padrões globais complexos emergem diretamente da aplicação de regras locais, e é exatamente esta propriedade de complexidade emergente que torna os (AC) tão fascinantes, e o uso de seus modelos tão atrativos.

Para ilustrar como se dá o mecanismo de aplicação das regras de transição, CÂMARA (1996, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007), apresenta um exemplo simples, onde uma célula pode assumir dois estados (branco e preto) e sua vizinhança é definida sobre duas células adjacentes. As regras de transição especificam que o estado de uma célula num instante $t+1$ é igual ao dos seus vizinhos no instante t , se estes vizinhos tiverem os estados iguais, caso contrário, o estado da célula permanece o mesmo. Para entender o exemplo é necessário identificar os componentes básicos do autômato celular clássico, que são:

- espaço euclidiano, dividido em uma ordem de células;
- uma vizinhança de tamanho e formato definidos (Figura 5a);
- um conjunto de estados discretos (Figura 5b);
- um conjunto de regras de transição (Figura 5c);
- um conjunto de intervalos de tempo, com atualização simultânea das células (Figura 5d).

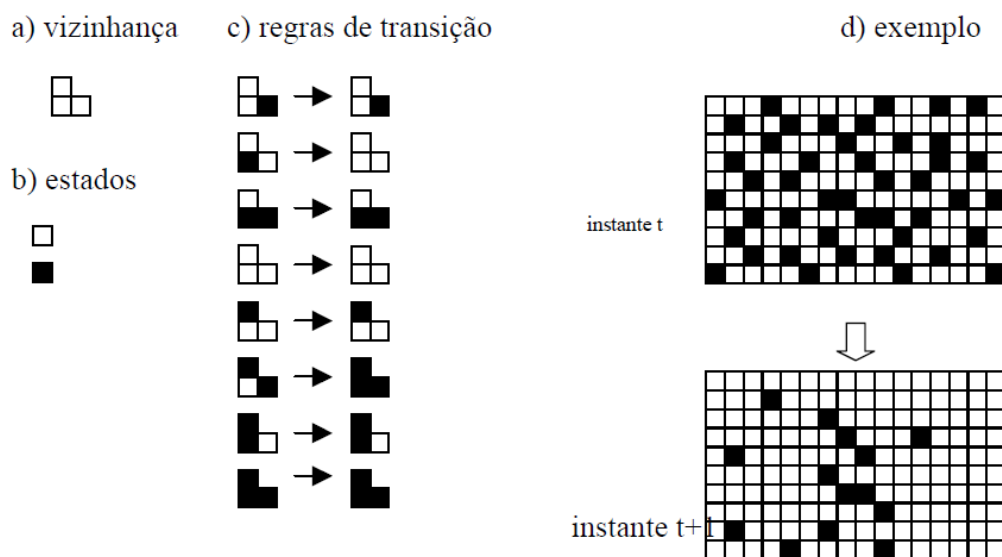


Figura 5 – Exemplo de (AC). Fonte: CÂMARA (1996, *apud* PEDROSO & CAMARA, 2007).

A dinâmica de aplicação das regras de transição em um autômato celular é semelhante a um filtro espacial. Desta forma, todas as células são avaliadas e, quando for o caso, modificadas para um novo estado. Na Figura 5d, a primeira célula da segunda linha do autômato tem, no instante t , o estado branco e suas vizinhas possuem estados diferentes (uma é branca e outra preta). Neste caso o estado da célula permanece o mesmo (1ª regra de transição). Seguindo o mesmo mecanismo, a segunda célula da segunda linha, tem no instante t , o estado preto e suas vizinhas tem o estado branco, logo o estado desta célula sofre uma transição para branco (2ª regra de transição). O processo segue este mecanismo para as demais células até que todas tenham sido avaliadas. No exemplo acima, pode-se observar que as mudanças geradas por (AC) são estritamente locais, isto é, baseadas nas vizinhanças de cada célula.

2.3 Modelador Dinamica EGO

Como exemplo de modelo de simulação espacial baseado em (AC) temos o *software* Dinamica EGO (EGO é uma sigla para *Environment for Geoprocessing Objects* – Ambiente para Objetos Geoprocessáveis). O Dinamica é uma ferramenta desenvolvida e mantida pelo Departamento de Cartografia, Centro de Sensoriamento Remoto, pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, aplicada em uma variedade de estudos de dinâmica da paisagem e modelagem ambiental.

O *software* Dinamica foi desenvolvido por SOARES-FILHO (1998b) e a partir de reformulações passou a denominar-se Dinamica EGO, RODRIGUES *et al.* (2007).

Segundo SOARES-FILHO (1998b), o DINAMICA foi desenvolvido para simular a dinâmica de paisagem em áreas de colonização amazônica ocupadas por pequenos colonos. Como proposta, este programa foi idealizado para incorporar processos de decisão com objetivo de modelar o uso do solo; parametrizar dados de regressão logística, por exemplo, incluir processos estocásticos de múltiplos passos de tempo com probabilidades espaciais com características dinâmicas; e ainda computar o efeito da vizinhança em um projeto misto de mosaico e manchas.

A configuração adotada para o *software* segundo SOARES-FILHO *et al.* (2003), usa como entrada um conjunto de mapas, a saber: um mapa da paisagem inicial, como representado pelo mapa de estados dos elementos de paisagem obtidos por sensoriamento remoto; e um conjunto de variáveis cartográficas, que se dividem em dois tipos, estáticas e dinâmicas, sendo as últimas recalculadas em cada iteração do programa. As variáveis cartográficas (tipos de solo, vegetação, distância das estradas, altitude, etc), são combinadas, através da definição de seus pesos de evidência, para gerar mapas de probabilidades de transição. Após cada iteração, o *software* produz como saída mapas de paisagem, um para cada passo de tempo (período de análise), mais os mapas das probabilidades de transição e das variáveis dinâmicas.

A versão atual do *software*, o Dinamica EGO, segundo RODRIGUES *et al.* (2007), foi concebido como um *software* genérico de modelagem de mudanças ambientais, por isso, ele tem sido aplicado a uma variedade de estudos, citados posteriormente, que incluem a modelagem de expansão urbana e dinâmica intra-urbana; avaliação de propostas de zoneamento ecológico-econômico; alterações do uso e ocupação do solo; e modelagem de desmatamento tropical desde uma escala local a bacia Amazônica.

2.3.1 Arquitetura do Dinamica EGO

O Dinamica EGO usa um engenho de mudanças, composto por dois processos de transição complementares: o *Expander* (função expansiva, que se dedica unicamente à expansão ou contração de manchas de uma determinada classe de uso e cobertura do solo); e o *Patcher* (função formadora de manchas de novas manchas), além de um módulo de difusão.

Ambos os processos, segundo SOARES-FILHO *et. al.* (2003), usam um mecanismo nucleador de manchas, que opera sobre o mapa de probabilidades de transição e tem como parâmetros de entrada a isometria, variância e tamanho médio das manchas. A quantidade definida de células a serem mudadas para uma determinada transição é repartida, de acordo com o especificado pelo usuário, entre as duas funções citadas.

Já o módulo de difusão leva um processo de transição $i \Rightarrow j$ a migrar para novas áreas, em junção de uma saturação de células limites j dentro de uma vizinhança especificada. A combinação dos dois processos de transição, mais o módulo de difusão, apresenta numerosas possibilidades no tocante à geração e desenvolvimento de padrões de mudanças espaciais e na geração de cenários futuros.

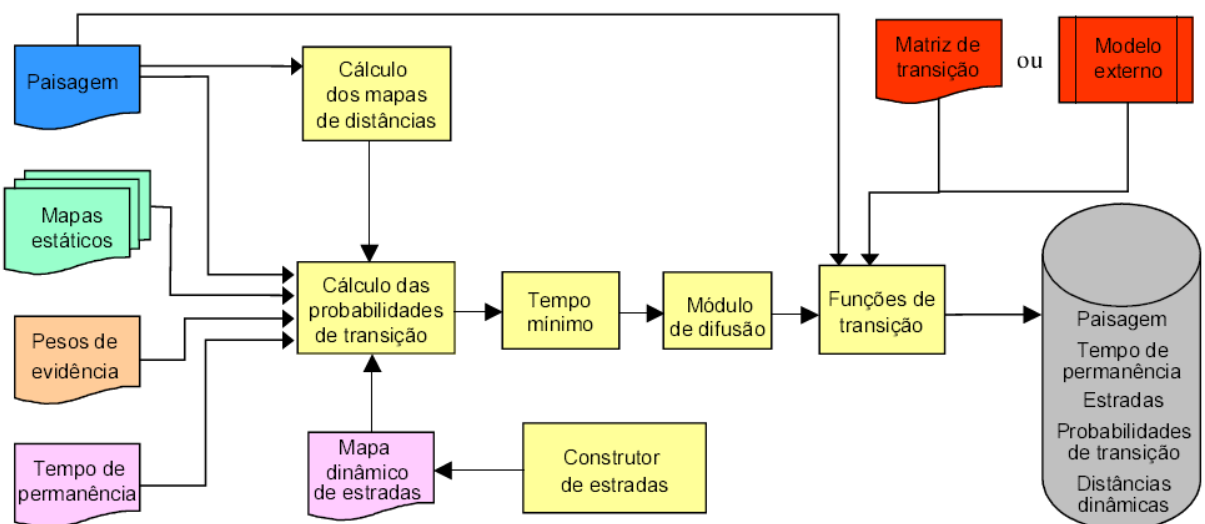


Figura 6 – Arquitetura do software Dinamica. Fonte: SOARES-FILHO *et al.* (2003).

Segundo RODRIGUES *et al.* (2007), os processos citados acima, efetuados pelo Dinamica EGO, são efetuados por *functors* responsáveis pela execução de uma tarefa específica, incluindo toda uma gama de operadores de álgebra cartográfica, utilizando-se de expressões lógicas e aritméticas. A esse respeito, *functors* podem ser considerados como os elementos básicos de um modelo cartográfico. Até o presente, segundo RODRIGUES *et al.* (2007), foram implementados os operadores de análise espaciais mais comuns disponíveis em SIG comerciais, mais uma série de operadores especialmente desenhados para simulação espacial, incluindo métodos de calibração e validação, SOARES-FILHO (2013).

Além desses, existem os operadores de grupo, conhecidos como *containers*. Os *containers* são especiais, pois agrupam e determinam um comportamento para o conjunto de operadores contidos nele. Os *functors* e *containers* recebem e enviam dados para outros *functors* e *containers* por meio de um conjunto de entradas e saídas chamados portos. Cada porto possui um tipo de dado associado, por exemplo: tabela, mapa, matriz, valor, etc. O tipo de porto determina seu modo de edição e visualização, sendo que para cada tipo há um editor e visualizador específico. Para a criação de modelos, os *functors* e *containers* são sequenciados em um fluxo de dados através da interface gráfica, SOARES-FILHO (2013).

Por essa interface, os modelos podem ser criados simplesmente, arrastando e conectando *functors* através de portos com tipos equivalentes. Os modelos são assim desenhados na forma de um diagrama e a execução segue a cadeia de fluxo de dados. Nessa interface, o fluxo de dados não é mais “oculto”, obrigando o usuário a construí-lo, o que torna sua flexibilidade diretamente proporcional à complexidade, RODRIGUES *et al.* (2007).

Esse autor, também cita que, no contexto de evolução na área de geotecnologia, fez-se necessária a criação de uma interface amigável e poderosa que permita ao usuário, quer seja iniciante ou avançado, implementar modelos de álgebra cartográfica de forma rápida e/ou intuitiva. Para tanto, a natureza da interface gráfica do DINAMICA EGO foi baseada na teoria de grafos direcionados, nos quais a informação parte de um ponto, percorre um caminho guiado pelas conexões dos *functors* e chega a outro ponto, não necessariamente diferente do inicial, SOARES FILHO (2013).

2.3.2 Método de Pesos de Evidências

A construção de um modelo de simulação de mudanças na paisagem passa pela definição de um modelo conceitual, no qual são definidos os elementos ou estados de uma paisagem e suas transições possíveis. A construção de uma função de mudança não é trivial, segundo SOARES-FILHO *et al.* (2003), consiste sempre na parte mais complexa do modelo. Ela pode ser composta em duas funções, uma de quantificação de mudanças e outra dedicada à alocação espacial das mudanças, lembrando sempre que as mudanças em uma paisagem não se dão ao acaso, mas sim, condicionados a uma estrutura espacial.

2.3.2.1 Matriz de transição

A modelagem dinâmica efetuada com o *software* Dinamica EGO, inicialmente compreende a obtenção de uma matriz de transição, que é gerada a partir da tabulação cruzada dos dados de uso e cobertura do solo, nos diversos anos considerados, GRIGIO (2008). Outro componente da função de mudança opera sobre os mapas de probabilidades, buscando localizar as quantidades desejadas de mudanças, através de uma escolha aleatória e ordenada das células mais prováveis. Sendo um princípio dos autômatos celulares, a vizinhança tem uma forte influência sobre o estado da célula, tendendo a formar padrões espaciais com arranjos distintos em relação ao tamanho, forma e orientação das manchas. As mudanças são todas baseadas nas tendências históricas, GRIGIO (2008).

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

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{1.} & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & P_{2.} & P_{2j} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{3j} \\ P_{j1} & P_{j2} & P_{j.} & P_{jj} \end{bmatrix}^v * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0}$$

A matriz ***P_{ij}*** é conhecida como matriz de transição, na qual as colunas representam as probabilidades de um determinado estado *i* permanecer no mesmo estado ou mudar para o estado *j* durante o intervalo de tempo $t \Rightarrow t + v$, de modo que:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, \quad i=1,2..n.$$

Sendo o estimador de *P_{ij}* dado pela seguinte equação, onde o *n* é o número de estados na paisagem, SOARES FILHO (1998b).

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

O modelo de transição, como definido anteriormente, requer apenas que seja especificado o número finito de estados e que sejam conhecidas as probabilidades, ou melhor, as taxas de transição de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto, GRIGIO (2008).

As operações citadas são efetuadas pelo *functor* vinculando ao bloco *Load Categorical Map* um par de *layers*. Um *layer*, de uso e cobertura do solo de uma data inicial, correspondente à paisagem inicial (*initial landscape*) e um *layer* uso e cobertura do solo de data final, (*final landscape*), correspondente a um período de análise de alteração na paisagem. Os passos de tempo (*time step*) são especificados, nesse estudo em anos, gerando tabelas de tempo único (para todo o período) e múltiplo (para cada ano) no período de tempo discreto, definidos para os cruzamentos de *layers*.

2.3.2.2 Pesos de Evidências baseados no Teorema da Probabilidade Bayesiana

Nesta pesquisa, o método dos pesos de evidência é utilizado para o cálculo das probabilidades de transição das classes de uso e cobertura do solo analisados. O método baseia-se no teorema da probabilidade Bayesiana, que determina a possibilidade de ocorrer um evento, dada a ocorrência prévia de uma evidência. A probabilidade bayesiana está relacionada a dois conceitos: a probabilidade *a priori* $P(D)$ e a probabilidade *a posteriori* $P(D/B)$, BONHAM-CARTER (1994, *apud* ALMEIDA, 2003).

De acordo com BONHAM-CARTER (1994, *apud* ALMEIDA, 2003), as vantagens do modelo Bayesiano são:

- objetividade, que impede a escolha subjetiva de fatores de ponderação;
- A possibilidade de combinação de múltiplos mapas de evidências em um modelo de fácil adaptação a linguagens computacionais;
- A incorporação ao modelo de mapas de entrada com dados incompletos;
- A possibilidade de aplicação de mapas multiclasse, onde cada fatia é tratada como uma evidência presente (ou razão de probabilidade);
- A modelagem de incertezas devido a variações nos pesos e dados incompletos.

E as desvantagens são:

- A combinação de mapas de entrada assume que os mesmos são condicionalmente independentes entre si. O teste para independência condicional só é possível quando o método for aplicado de maneira orientada aos dados, dado que ele requer a tabulação cruzada entre pares de mapas de evidência;
- A limitação da aplicação do modelo aos casos em que a variável resposta (evento) é bem conhecida.

As referências, a seguir, sobre o método de pesos de evidência baseado no Teorema *Bayesiano* aplicado no Dinamica EGO são retiradas de SOARES-FILHO (2009).

No qual, o efeito de uma variável espacial em uma transição é calculado independentemente de uma solução combinada. Os pesos de evidência representam cada influência sobre uma variável na probabilidade espacial de uma transição $i \Rightarrow j$ e são da seguinte forma:

$$O\{D|B\} = \frac{P\{D|B\}}{P\{\bar{D}|B\}}$$

$$\log\{D|B\} = \log\{D\} + W^+$$

Em que $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ são as chances, respectivamente, de ocorrer a priori o evento D e ocorrer D dado um padrão espacial B . W^+ é o peso de evidência de ocorrer o evento D , dado um padrão espacial B . A probabilidade a posteriori de uma transição $i \Rightarrow j$, dado um conjunto de dados espaciais (B, C, D, \dots, N) , é expressa da maneira a seguir:

$$P\{i \Rightarrow j | B \cap C \cap D \dots \cap N\} = \frac{e^{\sum W_N^+}}{1 + e^{\sum W_N^+}}$$

Onde B, C, D , e N são os valores das variáveis espaciais K que são medidas na localização x, y e representadas por seus pesos W_{+n} .

2.3.2.3 Cálculo das faixas para categorização de variáveis contínuas

Os Pesos de Evidência são calculados exclusivamente com mapas categóricos (de classes), dessa forma é necessário classificar os mapas de variáveis contínuas, como por exemplo, altitude, declividades, rodovias, mapas de distâncias, etc.. O presente método é adaptado de AGTERBERG & BONHAM-CARTER (1990, *apud* SOARES-FILHOS, 2009).

O *functor Determine Weights of Evidence Ranges* do DINAMICA EGO, calcula faixas (intervalos) para a derivação dos Pesos de Evidência. Ele seleciona o número de intervalos e o tamanho de seus *buffers* tendo como objetivo preservar a estrutura dos dados.

Esse *functor* define os intervalos para a derivação dos pesos de evidências de mapas de uso e cobertura do solo inicial e final; mapas de variáveis estáticas (contínuas) e; mapas de variáveis dinâmicas. Os mapas estáticos devem compor um cubo de dados raster (co-registrados). O resultado desta etapa é um arquivo base (esqueleto) dos Pesos de Evidências, que é usado como entrada para o cálculo dos mesmos, DIAS (2011).

2.3.3 Análise da correlação de mapas

Em estatística é possível determinar a probabilidade de ocorrerem mudanças mediante algumas evidências do problema ou de variáveis explicativas. No entanto, essas variáveis devem ser independentes, conforme o teorema de Bayes, para que possam explicar uma transição de classes de uso e cobertura do solo, TRENTIN & FREITAS (2010). Nesse contexto, utiliza-se o Índice de Cramer (V), o qual toma por base as medidas absolutas de áreas das classes, e a Incerteza de Informação Conjunta (U), que se refere aos valores percentuais e constitui-se em uma medida de correlação entre os mapas, ALMEIDA (2003).

Ambos os índices são utilizados para verificar a independência entre os pares de variáveis explicativas do modelo, a partir da matriz de transição entre pares de mapas variáveis. Tais índices variam de zero (0) a um (1): quanto mais próximo a zero forem seus valores, menor será o grau de dependência ou associação entre as variáveis; já o contrário representará dependência. Os valores inferiores a 0,5 para ambos os índices mencionados sugerem menos associações do mais, ALMEIDA (2003).

Dessa forma, SOARES FILHO (2009), cita que, a única suposição necessária ao método dos Pesos de Evidência é que os mapas de entrada devem ser espacialmente

independentes. Para tanto, um grupo de medidas pode ser aplicado para estimar esta suposição, como o teste de Cramer e o de Incerteza de Informação Conjunta. Como resultado, variáveis correlatas devem ser desprezadas ou combinadas em uma terceira que substituirá o par correlacionado no modelo.

O índice de Cramer é definido por BONHAM-CARTER (1994, *apud* BENEDETTI, 2010) pela seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{X^2 / T \cdot M},$$

onde:

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

X² = estatística qui-quadrado;

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

A Incerteza de Informação Conjunta (**U**) também se baseia na matriz de tabulação cruzada **T**; assim, **U(A,B)** pode ser usada como uma medida de associação, sendo definida por BONHAM-CARTER (1994, *apud* BENEDETTI, 2010):

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

A qual varia entre 0 e 1, sendo que quando os dois mapas são completamente independentes, então **H(A,B) = H(A) + H(B)** e **U(A,B)** é 0, e quando os dois mapas são completamente dependentes, **H(A) = H(B) = H(A,B) = 1**, e **U(A,B)** é 1.

ALMEIDA (2003), cita que, valores inferiores a 0,5 tanto para **V** quanto para **U** sugerem menos associação do que mais. Este critério foi adotado para a seleção de variáveis explicativas do modelo. Nos casos onde elevadas correlações positivas ou negativas são identificados, dois mapas de evidências podem ser combinados em um através de uma operação Booleana, ou um deles deve ser descartado, preferivelmente aquele que apresentar a menor associação com a variável resposta ou evento BONHAM-CARTER(1994, *apud* ALMEIDA, 2003).

2.3.4 Método para a validação dos modelos

Segundo SOARES-FILHO *et al.* (2009), modelos espaciais requerem uma comparação em um contexto de vizinhança, porque até mesmo mapas que não se assemelham exatamente célula-a-célula podem ainda apresentar padrões similares e, igualmente, concordância espacial nas proximidades de uma célula. Para lidar com essa questão, muitos métodos de comparação baseados em proximidade têm sido desenvolvidos, porém nesse trabalho destacamos o de HAGEN (2003, *apud* SOARES-FILHO *et al.*, 2009), por ser o método adaptada por RODRIGUES *et al.* (2007).

O teste de similaridade *fuzzy* está baseado no conceito de *fuzziness of location*, no qual a representação de uma célula é influenciada por si mesma e em menor extensão pelas células vizinhas, RODRIGUES *et al.* (2007). O resultado deste teste varia de zero (0) a um (1); quanto mais próximo de um (1), mais similar estará à simulação da situação real. No espaço intermediário desse intervalo, as células da vizinhança mais próxima de cada transição, ou com valores próximos a 1, também serão consideradas similares, porém em menor grau, em decorrência da função de decaimento exponencial considerada pelo teste.

No método *fuzziness of location* (dubiedade de localização), segundo RODRIGUES *et al.* (2007) a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor proporção, pelas células vizinhas. Um vetor exato é associado a cada célula do mapa, sendo que esse vetor possui tantos elementos quantos forem às classes temáticas adotadas, assumindo 1 para categoria a *i* e 0 para as categorias diferentes de *i*. Dessa forma, o vetor de vizinhança *fuzzy* (***Vnbhood***) para cada célula é dado por:

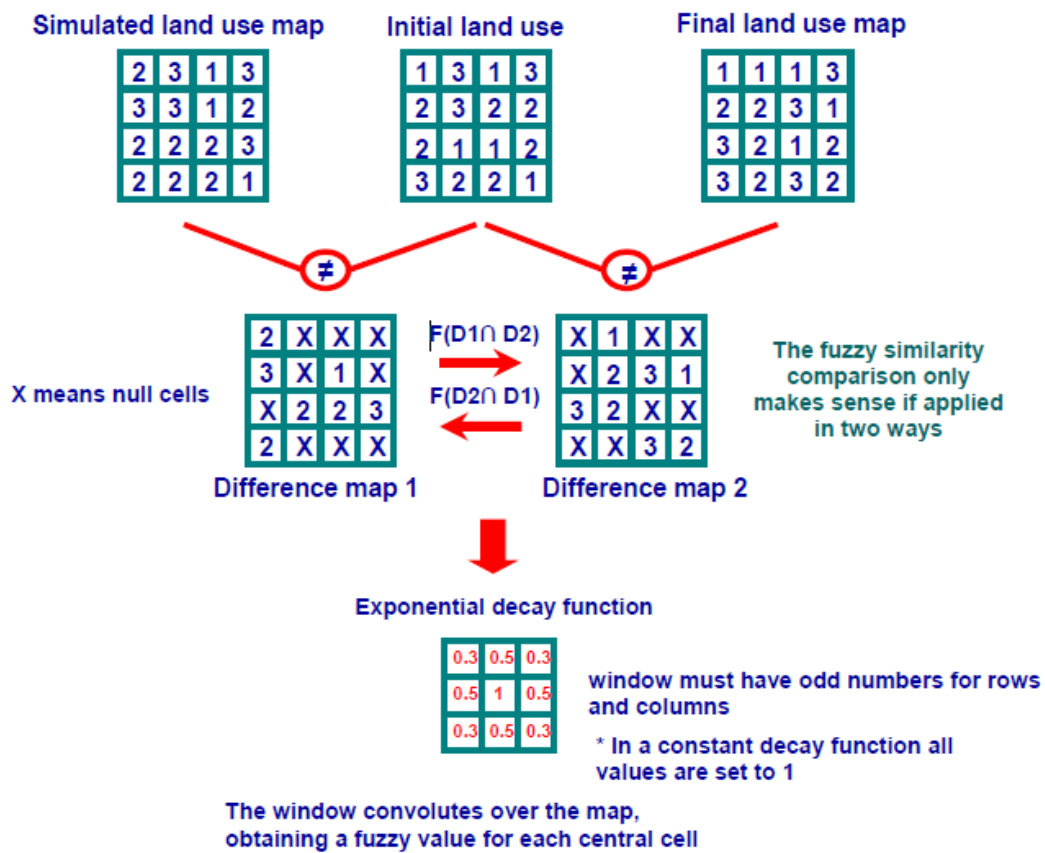
$$\underline{V_{nbhood}} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood\ 1} \\ \mu_{nbhood\ 2} \\ M \\ \mu_{nbhood\ C} \end{bmatrix}$$

$$\mu_{nbhood\ i} = \mu_{crisp\ i,1} * m_1, \mu_{crisp\ i,2} * m_2, \dots, \mu_{crisp\ i,n} * m_n \quad Max$$

Onde:

$\mu_{nbhood\ i}$ representa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de N células (normalmente $N=n^2$); $\mu_{crisp\ ij}$ 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 ; m_j é a pertinência baseada em distância da célula vizinha j , em que m refere-se a uma função de decaimento exponencial ($m = 2^{-d/2}$), sendo d a distância unitária entre células, medida de centroide a centroide.

Este método, segundo SOARES-FILHO *et al.* (2009), emprega uma função de decaimento exponencial com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central, Figura 7.



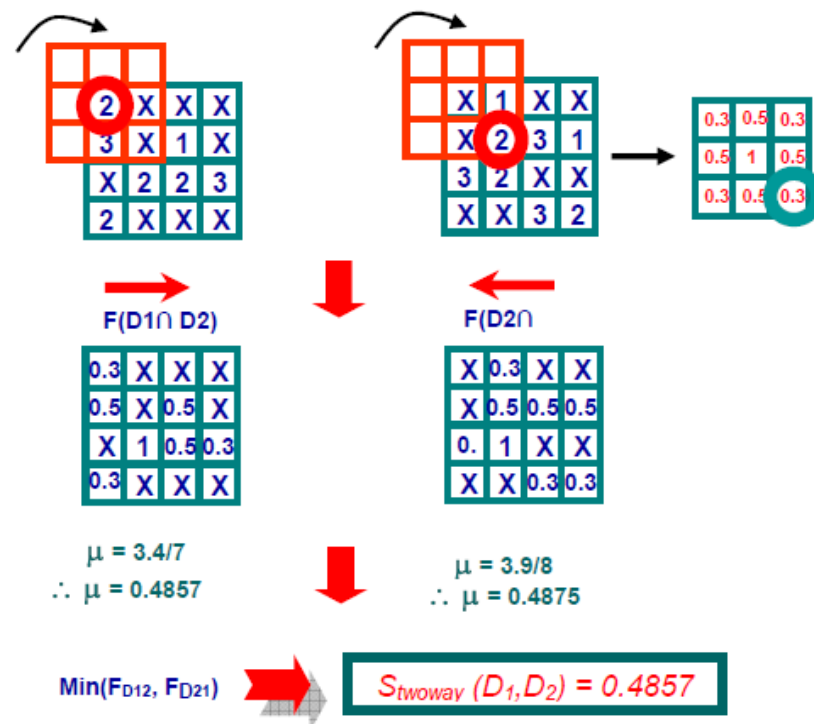


Figura 7 – Método de comparação *fuzzy* usando mapa de diferenças e uma função de decaimento exponencial e constante. Fonte: SOARES-FILHO *et al.* (2009).

2.4 Aplicação de modelos de simulação espacial dinâmica

Atualmente, modelos de simulação espacialmente explícitos têm recebido atenção por parte de pesquisadores de diversas áreas, sendo usados para avaliação de complexas questões ambientais, RODRIGUES *et al.* (2007). Nesse estudo priorizaremos a revisão de trabalhos que aplicaram modelos de simulação espacial baseados em Autômatos Celulares e o *software* Dinamica EGO como plataforma para a simulação de mudanças e padrões espaciais. Tal revisão visa compreender as potencialidades e possibilidades que a modelagem dinâmica espacial, como recurso tecnológico, pode oferecer para auxiliar na compreensão dos padrões de alteração da paisagem na área de estudo.

SOARES-FILHO (1998) desenvolveu um modelo espacial de simulação de mudanças na paisagem, entre os anos de 1986 a 1995, em uma zona de fronteira de colonização amazônica no norte do Estado do Mato Grosso. Buscou com este trabalho, aprimorar métodos de mapeamento e de análise da dinâmica da paisagem e

desenvolver/implementar técnicas de construção, calibração e operação de modelos de simulação de mudanças.

A sua tese possibilitou a compreensão que é possível desenvolver modelos baseados em ambiente SIG que simulem a gênese e o desenvolvimento dos padrões espaciais gerados pela dinâmica de paisagem e que variáveis espaciais identificadas nos produtos do sensoriamento remoto, em conjunto com outros dados auxiliares, podem indicar como e onde estão ocorrendo tais mudanças.

ALMEIDA *et al.* (2007), analisa o padrão de crescimento urbano do município de Bauru no período de 1979 a 1988, a partir das alterações de classes de uso do solo. Para tanto utilizou variáveis relacionadas a aspectos socioeconômicos e de infraestrutura para alimentação do modelo de (AC) na plataforma de modelagem dinâmica. Essas variáveis foram vetorizadas no AutoCAD 14, sendo posteriormente exportadas para o *software* de SIG, SPRING e IDRISI. Como conclusão da aplicação desse método de análise espacial, a autora destaca que:

“Modelagens de dinâmicas de uso do solo urbano mostram-se extremamente úteis para os casos de identificação dos principais vetores de expansão urbana e de suas vocações (tendências de uso)... Por fim, é válido reiterar que modelagem dinâmica constitui-se em um desafio eminente para a próxima geração de SIG.” p.

41

De forma complementar a conclusão, a autora cita que a integração entre modelos dinâmicos e SIG's deve ser entendida como um acoplamento e não como mera subjugação de modelos a esses sistemas. Neste sentido, PARKS (1993, *apud* ALMEIDA *et al.* 2007) apresenta três fortes razões para esta integração. Primeiramente, o fato de que a representação espacial é crítica à solução de problemas ambientais, porém os SIG's carecem de recursos preditivos e analíticos para lidar com problemas complexos. Segundo, ferramentas de modelagem não dispõem de componentes analíticos espaciais suficientemente flexíveis como aqueles encontrados em SIG, e são frequentemente inacessíveis ao público não especialista. Terceiro, modelagem e SIG podem ambos adquirir maior robustez através de mútua cooperação e co-evolução.

TRENTIN & FREITAS (2010), utilizaram a mesma metodologia de ALMEIDA *et al.* (2007) para a modelagem da dinâmica espacial da área urbana do município de Americana - SP no período de 1962 a 2005. Posteriormente, efetuaram uma simulação das tendências (prognóstico) de ocupação urbana para curto (2010) e médio prazo

(2016). Para tanto utilizaram SIG e o software de simulação Dinamica EGO, versão mais atualizada.

Como resultados do método utilizado os autores destacam: o desempenho do Dinamica, que continua sendo aprimorado, sobretudo para aplicações vinculadas ao desflorestamento. Porém, nas aplicações em áreas urbanas, que concentram maior detalhamento e dinâmica de paisagem se comparadas com as áreas de florestas, as manchas de uso criadas pela simulação não correspondem às formas e desenhos apresentados especificamente pelas áreas urbanas; à demanda de tempo de processamento para a modelagem, a qual foi considerável nesta aplicação, embora tenham sido utilizadas poucas variáveis e a área de estudo possui reduzida extensão territorial e; o modelo de (AC) utilizado, também mostra suas deficiências e limitações, como por exemplo, o fato de considerar o tempo como discreto e a generalização necessária aos mapas. Contudo, a possibilidade de espacialização das simulações que esse modelo permite já representa um progresso na área de modelagem.

ROSSETTI *et al.* (2011), utilizaram metodologia similar ao utilizado por ALMEIDA *et al.* (2007), porém neste estudo, avaliaram a dinâmica de mudanças no uso terra em toda a área do município de Rio Claro - SP, não somente a área urbanizada, para o período de 1995 e 2006. Como resultado os autores desenvolveram uma simulação de uso da terra para o cenário de 2006 com boa aproximação quando comparados com os dados mapeados para o mesmo ano. Nesse trabalho foi enfatizada a importância na seleção e definição das variáveis que determinam as ocorrências das mudanças no uso da, tais como, corredores comerciais, condomínios, rodovias, ferrovias, etc.

GRIGIO (2008) efetuou análise das tendências de alteração da paisagem do baixo curso do rio Piranhas-Assú - RN, referente ao período de 1988 a 2004. Para tanto o autor utilizou mapas de usos e ocupação do solo, vulnerabilidade natural e ambiental. Estes serviram de base para a criação de um modelo de simulação da paisagem gerado no *software* Dinamica EGO. A partir da validação dos modelos com os mapas de paisagem real, foram gerados cenários prognósticos futuros da paisagem para os anos de 2009, 2014, 2019 e 2024.

Como análise final do uso do *software citado* para a simulação da paisagem a autora destaca: para se atingir resultados satisfatórios, há a necessidade de um profundo conhecimento da área de estudo e a realização de um curso de treinamento, pois o *software* é totalmente intuitivo; os índices de similaridade *Fuzzy* entre os mapas de paisagens simuladas e reais com janelas de tamanho 11X11, foram maiores, porém

visualmente esta similaridade não se confirmou. O uso de janelas de tamanho 3X3 apresentou melhor resultado comparativo; apesar da simulação de cenários futuros não levar em consideração ações, programas e projetos públicos e/ou privados, o banco de dados criado permite a inserção de novas variáveis e conseqüente melhoria na simulação de cenários prognósticos futuros da paisagem.

DIAS (2011), analisou a dinâmica espacial e simulou cenários futuros da expansão urbana e uso do solo da bacia hidrográfica do Lago Paranoá - DF, para os períodos de 1998 a 2009 e cenários futuros de 2014 e 2020. Como resultados do método aplicado, o autor destaca: o *software* Dinamica EGO, permite uma clara dimensão dos processos inseridos em cada modelo de sua plataforma de simulação; a simulação de cenários futuros é válida apenas se os padrões de alterações de expansão urbana e uso do solo, obtidos se manterem; inserir variáveis, como, aspectos demográficos, sociais e econômicos podem melhorar a simulação, a partir das variáveis explicativas.

BENEDETTI (2010), analisou a dinâmica da conversão de áreas florestais das Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul, microrregiões da metade sul do Estado. Para tanto, utilizou mapas temáticos dos anos de 2000, 2004 e 2008, elaborados a partir do produto NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) do sensor MODIS e mapas de uso e ocupação do solo. Estes geraram modelos que serviram para a simulação das áreas florestadas para o ano de 2016. Como plataforma de simulação a autora utilizou o *software* DINAMICA EGO.

Com relação ao método empregado e os resultados, a autora desta: a eficiência dos modelos dinâmicos para monitorar processos de conversão das classes de vegetação, comprovada pelos indicativos fornecidos nas matrizes de transição que compõem o modelo, e por serem incorporadas variáveis julgadas importantes à dinâmica da cobertura florestal, com base nos resultados obtidos através do método dos pesos de evidência; contudo, efetua as mesmas recomendações que DIAS (2011), com relação ao modelo que simula tendências.

LIMA (2012) modelou a dinâmica da Mata Atlântica brasileira no *software* no mesmo *software*. Para tanto utilizou a estimativa de taxas de desmatamento e regeneração com base em um modelo econométrico, e a integração do mesmo com variáveis espaciais. O modelo foi calibrado com dados baseados no Censo Agropecuário do IBGE (1998 e 2006) e com dados do convênio SOS Mata Atlântica/INPE (1995, 2000, 2005 e 2008). Por fim, simulou este bioma para o ano de 2030. A autora destaca que o método pode ser utilizado para observar o fenômeno de transição florestal, para identificar

áreas prioritárias para conservação e recuperação, e para avaliar os impactos de alterações no Código Florestal para a conservação do bioma.

RODRIGUES *et al.* (2007), apresenta a versão mais recente do *software*, intitulado Dinamica EGO. Citando, que o mesmo foi totalmente reescrito, acabando-se com a herança do fluxo estático de processamento da versão anterior. Esta versão é mais complexa e flexível está sendo usada como plataforma do SimAmazonia 2, o qual integra uma variedade de modelos desenvolvidos por pesquisadores do projeto “Cenários para a Amazônia”, incluindo uma versão atualizada do modelo de desmatamento PanAmazônico, integrada a modelos de rentabilidade da soja e da exploração madeireira e CARLUCC – um modelo que simula fluxos de carbono dentre os componentes da floresta e entre ela e a atmosfera. Esses modelos são rodados simultaneamente trocando dados entre si. Além da descrição desses novos modelos integrados ao Dinamica EGO, os autores descrevem a arquitetura simplificada do *software*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo apresenta os principais aspectos ambientais e socioeconômicos da área de estudo. Também descreve os materiais e métodos utilizados no processo de modelagem dinâmica de paisagem do baixo curso do rio dos Sinos - RS, conforme os objetivos deste estudo.

3.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na porção Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Figura 8, entre as coordenadas N 6.722.000 m a N 6.688.600 m e E 470.660 m a E 499.660 m, totalizando 998 km² de área, aproximadamente.

A mesma foi delimitada para fins de análise da dinâmica de paisagem, considerando-se aspectos socioeconômicos e socioambientais. Sendo assim, utilizou-se como limite inicial a transição das regiões fitoecológicas de Florestas Estacionais Semidecíduais-Submontanas para a Área de Tensão Ecológica de Contato Savana/Estepe, obedecendo à área de drenagem do baixo curso do rio dos Sinos e seu exutório como limite final, Figura 9.

A área abrange total e parcialmente 15 municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre. Esses 15 municípios abrigam 1.599.778 habitantes, sendo que 92,19% habitam áreas urbanas e apenas 7, 81% em áreas rurais, (IBGE, 2010).

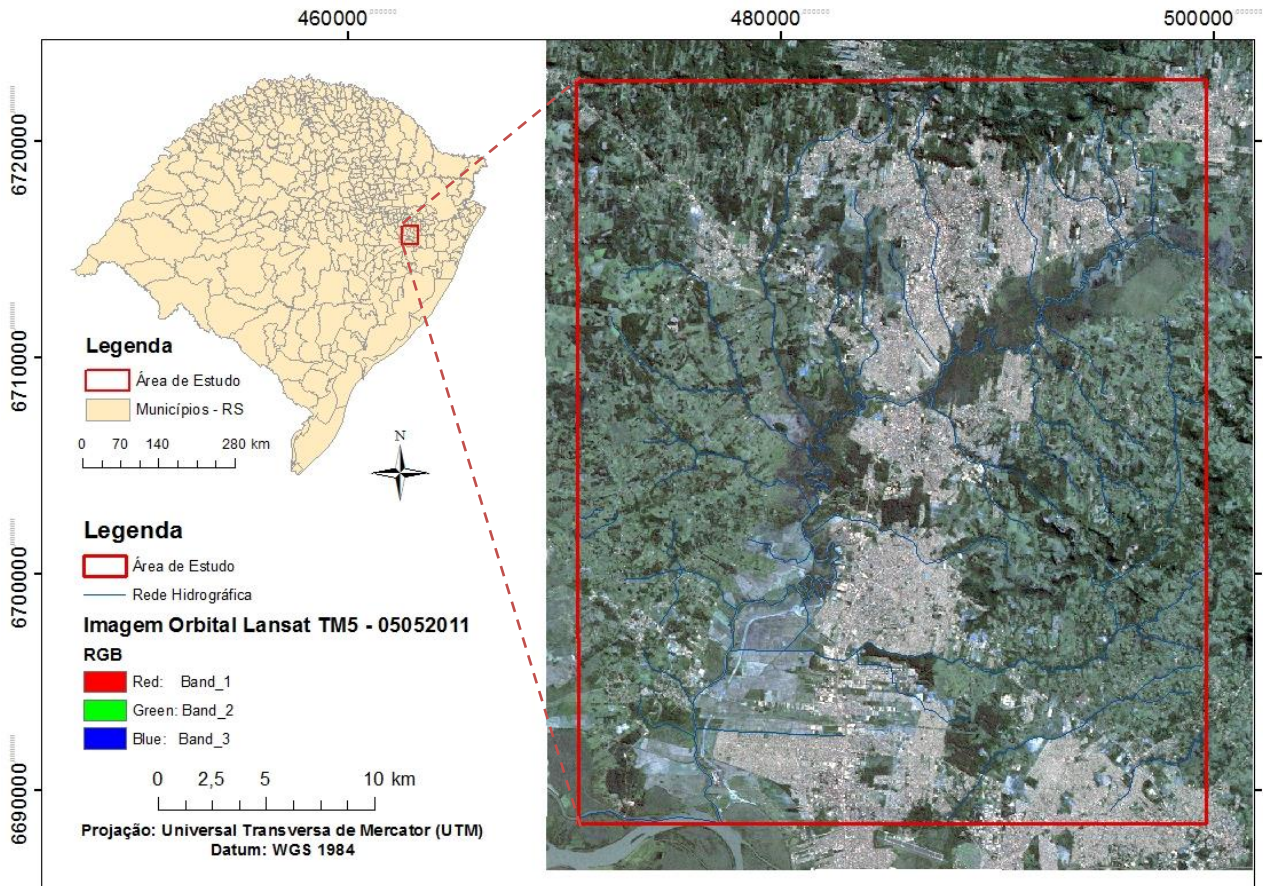


Figura 8 - Localização da área de estudo no Rio Grande do Sul.

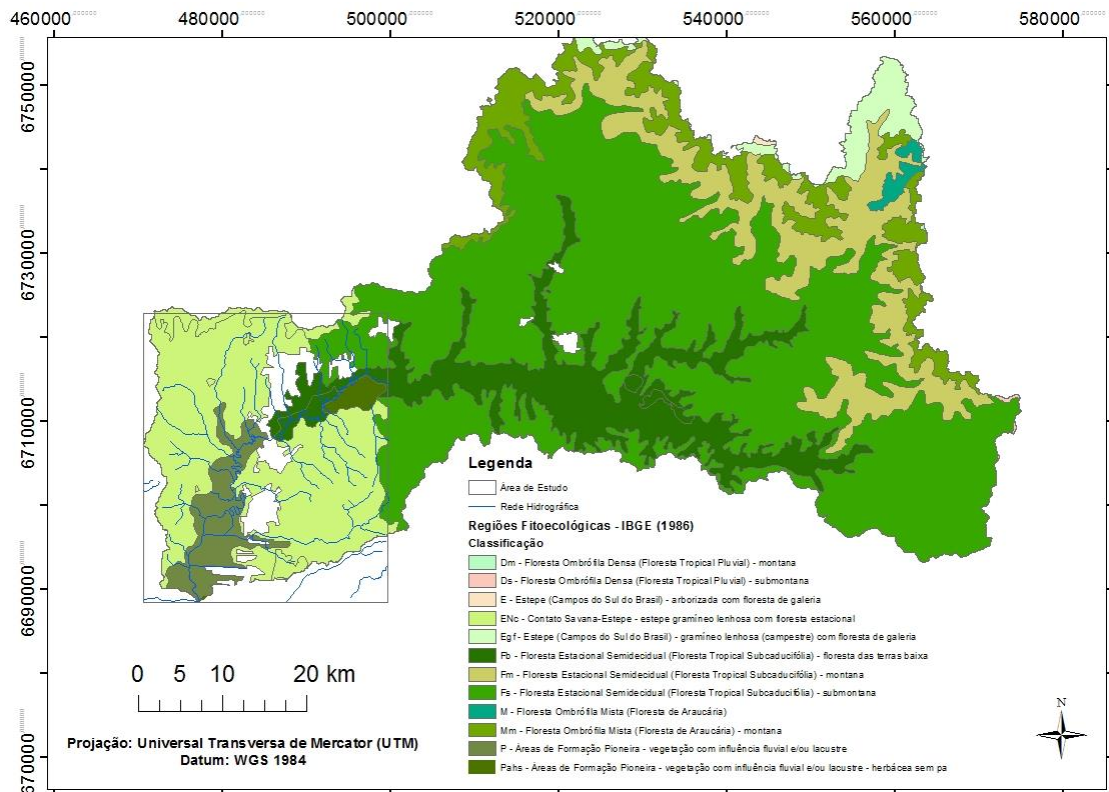


Figura 9 - Regiões Fitoecológicas da bacia do rio dos Sinos. Fonte: modificado de IBGE (1986).

3.1.1 Características ambientais

A área de estudo está inserida na unidade geomorfológica da Depressão Periférica, caracterizada como uma depressão embutida entre o Planalto Uruguaio Sul-rio-grandense e o Planalto Meridional. Este compartimento, juntamente a outros quatro do relevo gaúcho, constitui a primeira expressão da paisagem no Estado, na medida em que, através dela são individualizadas unidades que associadas a outras características, entre elas a vegetação e o uso do solo, expressam a diferenciação paisagística. SUERTEGARAY & MOURA (2012); SUERTEGARAY & GUASSELLI (2012).

As regiões fitoecológicas foram definidas a partir do estudo da vegetação original realizado pelo IBGE (1986), utilizando a metodologia do Projeto RADAMBRASIL, no levantamento de recursos naturais entre os anos de 1978 a 1982.

Uma Região Fitoecológica compreende um espaço definido por uma florística de gêneros típicos e de formas biológicas características que se repetem dentro de um mesmo clima, podendo ocorrer em terrenos de litologia variada, mas com relevo bem marcado, IBGE (1986) e BIODIVERSIDADES RS (2012).

A vegetação campestre ocupava originalmente a maior parte da área aproximada da bacia, 50,83%, já a vegetação florestal, anterior ao início da ação antrópica, que a reduziu em aproximadamente 90%, era responsável por 26,62% da área total, IBGE (1986).

As Florestas Estacionais Semidecíduais de Terras Baixas, as Áreas de Tensão Ecológica de Contato Savana/Floresta Estacional e as Áreas de Formação Pioneira, abrangiam a área de estudo, definidas e caracterizadas pelo IBGE (1986) e (1992), como:

Floresta Estacional Semidecidual de Terras Baixas: vegetação condicionada na Região Sul pelo clima subtropical sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio do inverno, com temperaturas médias inferiores a 15°C. Neste tipo de vegetação a porcentagem das árvores caducifólias no conjunto florestal, situa-se entre 20 e 50%.

Áreas de Formações Pioneiras: as formações pioneiras independem do clima, razão pela qual são encontradas distribuídas em grande parte do Rio Grande do Sul. Atualmente, 78% destas áreas, apesar de se tratar originalmente de locais brejosos ou sujeitos a inundações periódicas, com adversas condições à utilização agrícola, encontram-se drenadas e transformadas em lavouras de arroz, um dos maiores cultivos agrícolas do Estado.

Áreas de Tensão Ecológica, Contato Savana / Floresta Estacional: são constituídas pela interpenetração de floras entre duas ou mais regiões fitoecológicas. Nas áreas mapeadas pelo IBGE (1986), estes contatos apresentam-se predominantemente sob a forma de enclave, onde a flora de cada região guarda a sua identidade ecológica sem se misturar. Sua distribuição ocorre de maneira dispersa, em relevo variando de suavemente ondulado a ondulado planáltico na Depressão Central.

Já nas partes alagadiças, junto ao curso médio e inferior, existe um ecossistema em que a fertilidade natural trazida pelas cheias e a presença constante da umidade no solo formam uma paisagem típica: os banhados. Eles funcionam como um filtro biológico e local de reprodução de peixes e outros animais do rio. Além disso, atuam como reguladores da vazão, absorvendo o excesso das cheias e liberando água nos períodos de seca.

Junto às margens do rio e seus afluentes existe a mata de galeria, ambiente que recebe este nome por formar um corredor no meio do qual corre o rio. Possuem uma parte ocupada por cidades, lavoura e pecuária, existindo poucos lugares intactos, COMITESINOS (2012).

3.1.2 Uso e cobertura do solo

SUERTEGARAY & GUASSELLI (2012), ao analisar as unidades de paisagem do Rio Grande do Sul, definiram a área como uma subunidade de paisagem agrícola. Esta seria a expressão da transformação do uso original deste espaço pastoril através da introdução e expansão da cultura do arroz a partir das primeiras décadas do século XX. Os autores também destacam o processo de crescimento das cidades na região metropolitana de Porto Alegre em conjunto com áreas urbanizadas do eixo industrial São Leopoldo-Caxias do Sul, como exemplos de transformação das unidades de paisagem analisadas. Neste estudo, os autores não individualizam essa unidade de paisagem em função da escala de representação utilizada.

LIMA (2010), efetuou análise da variação espaço-temporal do uso e cobertura do solo da bacia do rio dos Sinos no período de 08/09/1993 a 13/04/2009. Os dados relevam que a área da bacia é predominantemente coberta por vegetação, campos e áreas cultivadas.

Com relação a variação espaço-temporal das classes, vale destacar a redução da área da classe de campos ou áreas agrícolas e o aumento da área de solo exposto, áreas de silvicultura e mancha urbana. As variações de áreas apuradas permitem inferir, que as áreas urbanizadas se expandiram e como reflexo aumentaram as áreas de solo exposto junto à periferia da mesma. Nas áreas rurais, a retração da classe de campos ou áreas agrícolas, pode ser explicada em parte pela expansão das áreas de solo exposto, utilizadas para pousio de lavouras. Porém, uma parte significativa de uso do solo, foi substituída por silvicultura, classificado nesse trabalho como florestamentos, LIMA (2010).

3.1.3 Características socioeconômicas dos municípios

A partir de 1824, com a imigração alemã, emergiram novos núcleos de produção colonial, tendo por base São Leopoldo, ao norte de Porto Alegre, no Vale do rio dos Sinos. Um intenso comércio estabeleceu-se entre Porto Alegre e as colônias e criou, segundo Singer (1968, *apud* BARCELLOS, 2004), as bases da industrialização que se desenvolveu na cidade. O seu incremento a partir de 1890, com uma estrutura diversificada e voltada para o mercado local, levou a mesma a assumir a liderança industrial do Estado a partir de 1920.

O eixo norte, seguindo a via férrea e depois a BR-116, concluída no final dos anos 40, ligando São Leopoldo e Novo Hamburgo a Porto Alegre, concentrou, desde meados do século XX até o início dos anos 70, a ocupação urbana e industrial da atual RMPA (Região Metropolitana de Porto Alegre).

Nos anos 60, começaram a se sobressair outros centros industriais além de Porto Alegre, Novo Hamburgo e São Leopoldo. Foi o caso de Canoas, que, nessa época, passou a disputar posição com Novo Hamburgo, e, com menor peso, Sapucaia e Esteio no eixo norte. Em Canoas, foi fundamental a instalação da Refinaria Alberto Pasqualini, que ensejou o desenvolvimento de um parque industrial já diversificado em 1970.

Com relação ao desenvolvimento demográfico metropolitano BARCELLOS (2004) cita que há pelo menos duas décadas, se concentra no entorno imediato de Porto Alegre e, de um modo muito menos intenso, em algumas localidades pequenas situadas no Vale do Rio dos Sinos, na região da produção coureiro-calçadista. Entre 1991 e 2000, a população metropolitana aumentou, em média, 16%, enquanto, na região do Vale dos Sinos, as cifras são impressionantes em alguns casos, embora se trate de municípios de

pequeno porte, como Nova Hartz, onde o incremento também ultrapassou os 50%, e Dois Irmãos e Parobé, entorno de 40%. A sede metropolitana, mesmo com menor crescimento e perdendo peso demográfico, continua ainda a concentrar a população da Região numa proporção que foi de quase 40% em 2000.

A partir dos dados censitários de 2000 e 2010, apurou-se crescimento populacional médio de 8,40%, representando 123.911 habitantes a mais nos municípios da área de estudo, Tabela 2. Nesse mesmo período Porto Alegre cresceu menos (3,58%). Ambas as taxas não são elevadas se levarmos em consideração o período de amostragem de dez anos.

Porém, em municípios de pequeno porte, como Nova Santa Rita, Dois Irmãos, Ivoti e Portão, que apresentaram taxas de crescimento superiores a 20%, chegando a 44%, em Nova Santa Rita, essa taxa é mais elevada se comparadas a dos municípios de médio porte como Cachoeirinha, Canoas, Novo Hamburgo, etc.

De uma forma geral, os municípios de população menor, apresentaram maior crescimento demográfico, com relação aos de maior porte e a metrópole, Tabela 2 e Figura 10, para o período de 2000-2010, como também apontou BARCELLOS (2004), para o período de 1991 a 2000. Diversos fatores podem explicar tal fato, dentre eles, a descentralização industrial para os municípios menores e de menor custo de produção e razoável infraestrutura, atraindo assim trabalhadores.

Tabela 2 – Dados demográficos (2000 – 2010).

Município	População Absoluta			População Urbana		
	2000	2010	Variação (%)	2000	2010	Variação (%)
Cachoeirinha	107.564	118.278	9,96	100,00	100,00	0,00
Campo Bom	54.018	60.074	11,21	95,96	95,50	-0,46
Canoas	306.093	323.827	5,79	100,00	100,00	0,00
Capela de Santana	10.032	11.612	15,75	62,57	59,70	-2,87
Dois Irmãos	22.435	27.572	22,90	99,27	98,90	-0,37
Estância Velha	35.132	42.574	21,18	97,82	97,40	-0,42
Esteio	80.048	80.755	0,88	99,89	99,90	0,01
Gravataí	232.629	255.660	9,90	91,19	95,20	4,01
Ivoti	15.318	19.874	29,74	89,99	90,90	0,91
Nova Santa Rita	15.750	22.716	44,23	73,33	85,70	12,37
Novo Hamburgo	236.193	238.940	1,16	98,22	98,30	0,08
Portão	24.657	30.920	25,40	80,37	81,80	1,43
São Leopoldo	193.547	214.087	10,61	99,66	99,60	-0,06
São Sebastião do Caí	19.700	21.932	11,33	81,00	80,30	-0,70
Sapucaia do Sul	122.751	130.957	6,69	99,24	99,60	0,36
Total	1.475.867	1.599.778	8,40	91,23	92,19	0,95

Fonte: IBGE, Censo Demográfico de 2000 e 2010.

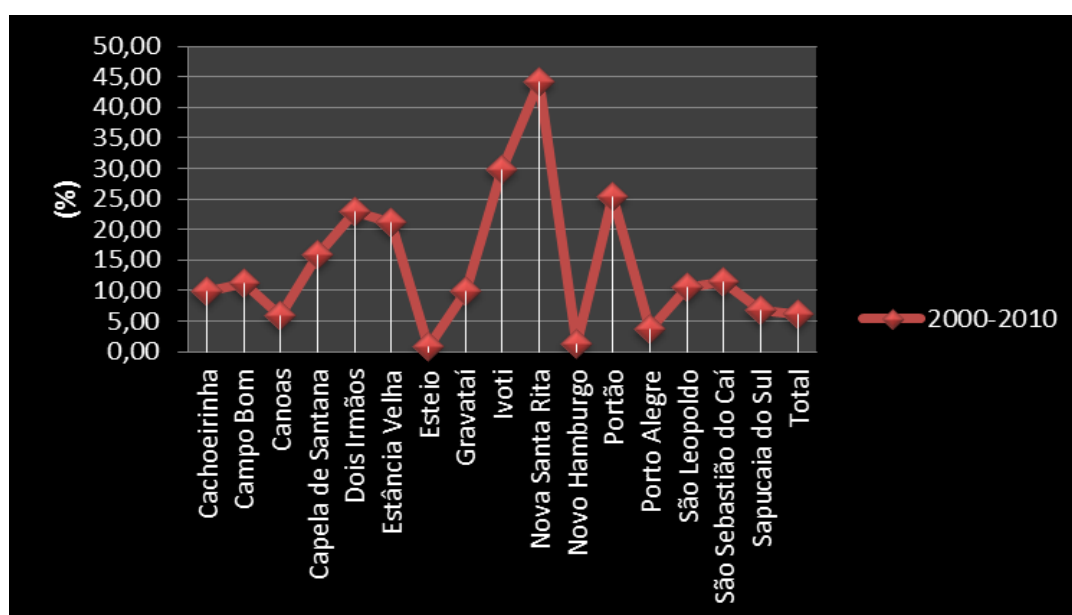


Figura 10 – Crescimento populacional entre 2000 a 2010 em %.

Os 15 municípios da área de estudo possuem elevada população urbana média (92,19% em 2010), indicando clara concentração populacional junto à sede dos municípios. A taxa de urbanização, Tabela 2, mostra que os municípios próximos a Metrópole possuem taxas mais elevadas, próximas a 100%, enquanto que os mais afastados apresentam taxas mais baixas, próximas a 80%.

Transformações ocorridas nas últimas décadas no uso e cobertura do solo, resultado do êxodo rural, envelhecimento da população rural, divisão das propriedades por herança e transição da agricultura de subsistência em pequenas propriedades rurais para sítios de final de semana, indicando urbanização do modo de vida no campo, MONTE-MÓR (2011).

O levantamento da População Economicamente Ativa (PEA) por setores da economia revela que a maior parte da PEA da área de estudo está ocupada no setor terciário (60,35%), seguido de (37,15%) no secundário e apenas (2,5%) no primário. Esses dados apontam maioria absoluta de trabalhadores ocupados em atividades urbanas industriais, somado ao fato de muitas estarem ligados as novas atividades do meio rural, caracterizadas como serviços (como exemplo: turismo rural, ecoturismo, manutenção de sítios e hotéis fazenda, dentre outros).

A respeito da ocupação da PEA pelos setores da economia, também o Produto Interno Bruto (PIB) dos municípios é maior no setor terciário, seguido pelo setor industrial, ambos ficando muito acima do setor agropecuário, demonstrando claramente que, a ocupação e a produção de riqueza são concentradas em atividades urbano-industriais, Tabela 3.

Tabela 3 – PIB (mil reais) do valor adicionado bruto por setor da economia – 2010

Município	Agropecuário	Industrial	Serviços	Total	Per capita (em reais)
Cachoeirinha	939,00	979.161,00	1.827.022,00	4.363.658,00	36.888,00
Campo Bom	2.087,00	583.161,00	764.391,00	1.562,00	26.001,00
Canoas	4.723,00	5.336.607,00	8.810.618,00	16.547.966,00	51.070,00
Capela de Santana	17.027,00	13.958,00	69.373,00	106.534,00	9.173,00
Dois Irmãos	7.522,00	268.051,00	352.346,00	723.379,00	26.236,00
Estância Velha	3.174,00	306.455,00	426.458,00	822.326,00	19.308,00
Esteio	838,00	491.092,00	1.714.172,00	2.572.026,00	31.883,00
Gravataí	16.059,00	3.356.083,00	2.565,00	7.081.795,00	27.689,00
Ivoti	5.002,00	153.387,00	243.758,00	455.246,00	22.903,00
Nova Santa Rita	15.012,00	153.012,00	338.621,00	588.957,00	25.938,00
Novo Hamburgo	16.758,00	1.285.928,00	3.141.613,00	5.395.053,00	22.568,00
Portão	15.954,00	325.163,00	305.390,00	728.835,00	23.601,00
São Leopoldo	2.526,00	1.232.662,00	2.445.009,00	4.125.575,00	19.259,00
São Sebastião do Caí	24.351,00	121.305,00	240.619,00	426.846,00	19.451,00
Sapucaia do Sul	574,00	996.548,00	1.066.278,00	2.316.303,00	17.683,00
Total	132.546,00	15.602.573,00	21.748.233,00	46.256.061,00	

Fonte: IBGE, Censo Demográfico (2010).

3.2 Metodologia

A metodologia utilizada para modelar a dinâmica da paisagem na região do baixo curso do rio dos Sinos - RS nos períodos de 1990-2000 e 2000-2011 e simular cenários prognósticos futuros, para tanto foram realizadas as etapas de trabalho relacionadas a abaixo:

- ✓ Quantificação e análise de alterações dos elementos da paisagem (seção 3.2.1);
- ✓ Avaliação da contribuição dos elementos da paisagem no processo de modelagem dinâmica espacial e simulação de processos de transição dos elementos da paisagem (seção 3.2.2);
- ✓ Projeção de cenários de prognósticos da paisagem para os anos de 2016 e 2022, com base nos modelos dinâmicos de simulação da paisagem (seção 3.2.3).

A Figura 11 ilustra a síntese conceitual e metodológica das etapas do processo de modelagem da dinâmica de paisagem no *software* Dinamica EGO.

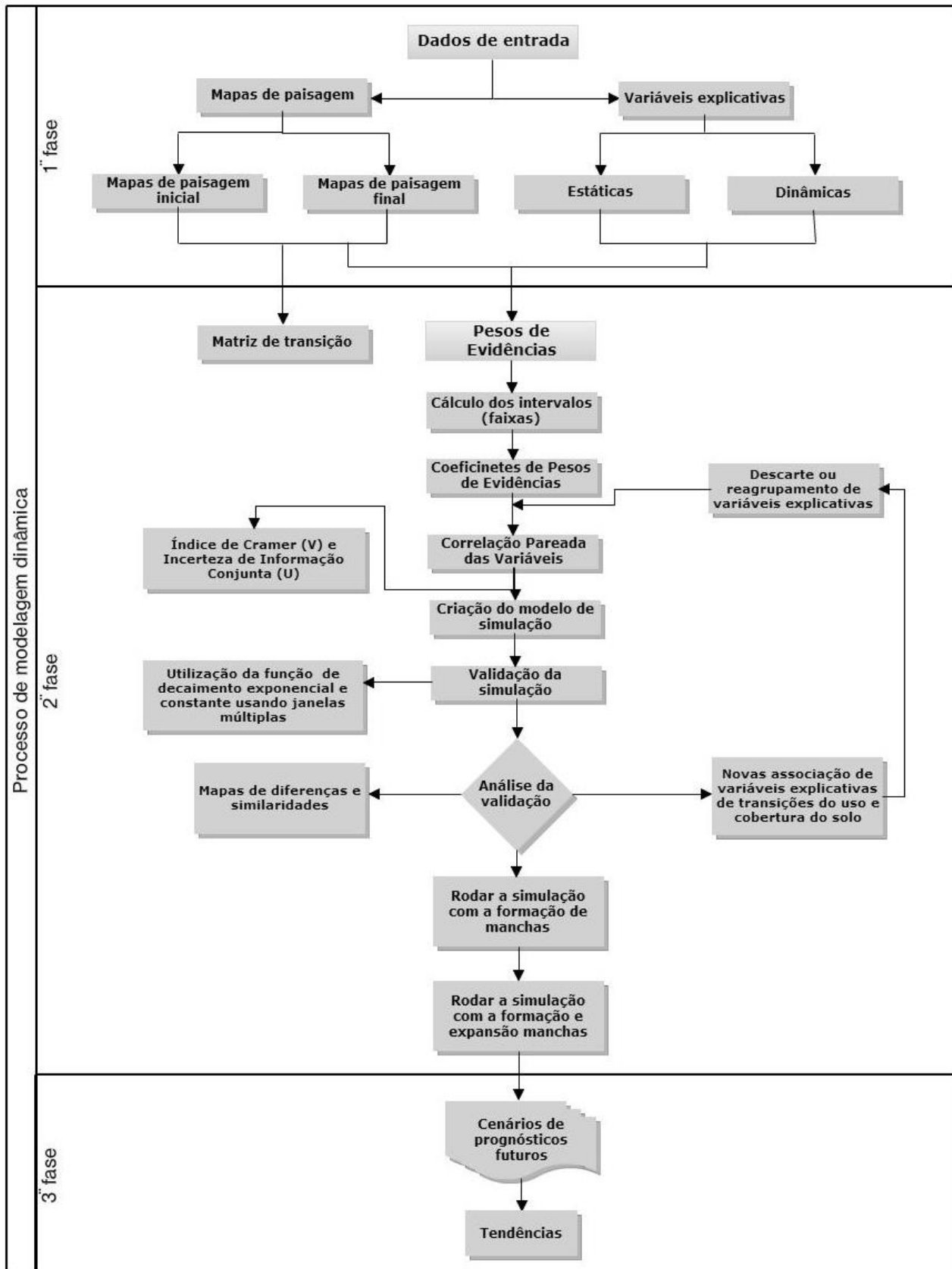


Figura 11 - Síntese das etapas de modelagem da dinâmica de paisagem no *software* Dinamica EGO.

3.2.1 Quantificação e análise de alterações dos elementos da paisagem

Neste capítulo além da metodologia para quantificar as alterações ocorridas na paisagem no período de 1990-2000 e 2000-2011, consta também os materiais e métodos utilizados para gerar os mapas dinâmicos e estáticos utilizados no processo de modelagem da dinâmica de paisagem da área de estudo.

3.2.1.1 Base de dados cartográficos

Na Tabela 4, segue a base de dados cartográficos utilizada para o processo de delimitação e distinção dos elementos da paisagem no baixo curso do rio dos Sinos em 1990, 2000 e 2011.

Tabela 4 – Base de dados cartográficos.

Fonte	Informação	Formato
CPRM – Serviço Geológico do Brasil.	Mapas dos municípios do RS – 1:750.000	<i>Shapefile Feature Class</i> – Polígonos
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias.	Modelo Digital de Elevação. Imagem SRTM - 1:250.000, Carta SH-22-V-D (IBGE).	<i>TIFF</i> (16 bits) - 90m
INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais.	Imagens orbitais, sensor TM (<i>Thematic Mapper</i>), do satélite Landsat TM5, bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7, referentes à órbita-ponto 221/81, nas seguintes datas 21/12/1990, 27/12/2000 e 05/05/2011.	<i>Raster</i> (8 bits) - 30m
Centro de Ecologia da UFRGS, a partir das Cartas Topográficas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG)	Carta Topográfica - 1:50.000 - MI:2970/2 – Nomenclatura: SH.22-V-D-VI-2/Novo Hamburgo - Datum Horizontal: Córrego Alegre - Datum Vertical: Torres - Ano foto:1975, Ano da Impressão:1996.	<i>Raster</i> (8 bits) - 5m
Idem	Carta Topográfica - 1:50.000 - MI: 2970/4 – Nomenclatura: SH.22-V-D-VI-4/São Leopoldo/Córrego Alegre/Torres/1975, Ano da Impressão:1980.	<i>Raster</i> (8 bits) - 5m

Para o processamento digital, geoprocessamento da base cartográfica e modelagem dinâmica foram utilizados respectivamente os *softwares* ArcGis 9.3 (ESRI, 2008), Envi 4.0 (RSI, 2003) e Dinamica EGO 6.4 versão 2.2.8 (CENTRO DE SENSORIAMENTO REMOTO/UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS-BRASIL, 1998-2013).

As imagens orbitais foram processadas digitalmente, onde se efetuou um empilhamento das bandas 1 (0,45 μ m – 0,52 μ m, região espectral do azul), 2 (0,52 μ m – 0,60 μ m, verde), 3 (0,63 μ m – 0,69 μ m, vermelho), 4 (0,76 μ m – 0,90 μ m, infravermelho próximo), 5 (1,55 μ m – 1,75 μ m, infravermelho de ondas curtas) e 7 (2,08 μ m – 2,35 μ m, infravermelho médio) para cada cena.

Para a interpretação visual das imagens orbitais efetuou-se processamento de composições coloridas (R4G5B3 e R3G2B1). Segundo ROSA (2008), a utilização de composições coloridas é fundamental pelo fato de que o olho humano é capaz de discriminar mais facilmente matizes de cores do que tons de cinza, dessa forma associar cores as bandas, facilita a diferenciação de alvos da cena.

Para realçar os níveis de cinza (NC), procedeu-se também com a análise dos histogramas das imagens processadas, a fim de aumentar o contraste. Os histogramas das imagens possibilitam visualizar de forma gráfica a frequência de ocorrência dos pixels no intervalo discreto dos NC (0 a 255), e assim melhorar sua distribuição.

Para o conjunto de imagens orbitais e demais *shapes* foi estabelecido como padrão os seguintes parâmetros: projeção UTM (Transversa Universal de Mercator); Datum WGS 84 e; fuso 22J.

O georreferenciamento da imagem orbital Landsat TM5 de 05/05/2011 foi efetuado a partir dos pontos de controle obtidos em campo nos dias 06 e 07/07/2013, com o uso do GPSMAP 76 – *versatile navigator (Global Positioning System)*, Tabela 5 e pontos de controle auxiliares obtidos no *software Google Earth*, totalizando 48 pontos. Para as imagens de 27/12/2000, foram utilizados 276 pontos de controle e 21/12/1990 210 pontos de controle da imagem de 2011 já georreferenciada, a fim de obter a máxima semelhança espacial entre as mesmas.

Tabela 5 – Pontos de Controle obtidos em campo (06 e 07/07/2013).

Ponto	Coordenadas	Altitude (m)	Uso e Cobertura do Solo
1	476923 E, 6694506 N	5	Campo, próximo a BR 448.
2	477774 E, 6695565 N	4	Mata ciliar, próxima a BR 448.
3	477835 E, 6695541 N	9	BR 448 em obras, situação de solo exposto cercada de campo e mata ciliar do rio dos Sinos.
4	476827 E, 6694489 N	7	BR 386 cercada por campo e arbustos.
Observação: nestes quatro pontos de controle, as áreas citadas como campo são antigas áreas de cultivo de arroz.			
5	474831 E, 6696823 N	30	Solo exposto, próximo a maciço de florestamento.
6	478988 E, 6693582 N	7	Campos, a margem direita da BR 386 (sentido BR 116). Mesmo caso citado na observação.
7	480095 E, 6693306 N	10	Cultivo de arroz, em pousio.
8	495983 E, 6707626 N	96	Mancha urbana, Lomba Grande - Novo Hamburgo.
9	493165 E, 6709533 N	38	Silvicultura, as margens da estrada Leopoldo Petri.
10	491935 E, 6711007 N	14	Ponto sobre o rio dos Sinos.
11	491157 E, 6711406 N	13	Banhado com cobertura vegetal arbórea e arbustiva.
12	490412 E, 6712013 N	11	Ponte sobre área de banhado.
13	487199 E, 6715767 N	32	Mancha urbana, Novo Hamburgo sob a estação de metrô.
14	486023 E, 6719405 N	38	Vegetação, as margens da BR 116.
15	486094 E, 6722163 N	101	Vegetação, as margens da BR 116.
16	497094 E, 6707330 N	72	Área urbana, bem arborizada, Lomba Grande, Novo Hamburgo.
17	495668 E, 6707835 N	88	Área urbana, bem arborizada, Lomba Grande, Novo Hamburgo.
18	484680 E, 6711498 N	22	Vegetação, à margem direita da RS 240, sentido N.
19	482385 E, 6712996 N	39	Vegetação, na margem direita da RS 240, sentido N.
20	481404 E, 6713928 N	39	Idem
21	475294 E, 6714712 N	99	Estrada não pavimentada do Garcês entre silvicultura.
22	479281 E, 6714431 N	19	Ponte sobre rio cercado de vegetação.
23	474251 E, 6715246 N	84	Estrada não pavimentada do Garcês entre vegetação e silvicultura (margem direita, sentido NE).
24	471159 E, 6698971 N	29	Silvicultura, na margem direita da BR 386, sendo Triunfo.
25	491150 E, 6694691 N	33	Vegetação, na margem direita da RS 118, sentido Gravataí.
26	490229 E, 6695892 N	28	Silvicultura, na margem direita da RS 118, sentido Esteio.

Os recortes efetuados nas imagens e demais mapas, extrapolaram a área de estudo. Esse procedimento está relacionado ao método estatístico empregado. As células limítrofes ficariam sem vizinhança, e dessa forma, não teriam probabilidade de alteração, dessa forma, extrapolando a área de estudo esse problema se transfere para fora da mesma.

Os mapas dos elementos da paisagem foram produzidos e divididos em dois grupos: mapas dinâmicos, cujos elementos da paisagem sofrem alterações ao longo do processo de modelagem e os mapas estáticos, que não sofrem alterações ao longo do processo de modelagem.

Os mapas dinâmicos de paisagem para os anos de 1990, 2000 e 2011, foram produzidos a partir da classificação digital e vetorização visual das imagens Landsat TM5. O processo de classificação das imagens orbitais foi dividido em duas etapas: o treinamento e a classificação digital. Para esse trabalho foi utilizada a classificação digital supervisionada, a qual exige conhecimento prévio da área de estudo no sentido de orientar a aquisição das amostras junto à imagem orbital e a definição da sua classe. Para a definição das classes, utilizamos diversas fontes, tais como: pontos de controle de campo, imagens do *Google Earth* e cartas topográficas. Metodologia sugerida por DORNELES (2003); NOVO (2008); ROSA (2009).

Com o processo de classificação obtivemos apenas a delimitação das classes de campos ou áreas agrícolas e cobertura vegetal, todas as demais classes dos mapas de paisagem de 1990, 2000 e 2011, Tabela 6, foram obtidas através do processo de vetorização na escala de 1:50.000, compatível com a resolução espacial da base de dados cartográficos. O processo de vetorização se mostrou necessário para as demais classes, devido a grande imprecisão do processo de classificação digital supervisionada.

Segundo TRENTIN & FREITAS (2010), se faz necessário generalizar as classes dos elementos da paisagem distinguidos nas imagens orbitais. A complexidade dos modelos utilizados no *software* Dinamica EGO tende a aumentar quanto maior for o número de classes distintas consideradas, e essas detêm, invariavelmente, uma regra própria que está associada ao desenvolvimento especificado a partir de vários parâmetros.

Tabela 6 – Mapas dinâmicos e estáticos produzidos, a partir da base de dados.

Mapas	Ano	Classes	Formato
Dinâmicos			
Paisagem	1990, 2000, 2011	1. Campos ou Áreas Agrícolas; 2. Cobertura Vegetal; 3. Silvicultura; 4. Áreas Urbanizadas; 5. Solo Exposto; 6. Arrozais; 7. Corpos d'Água.	<i>Shapefile</i> <i>Feature Class</i> <i>(Polygon)</i>
Estáticos			
Contínuos			
		Distância do Rio Principal	<i>Tiff (raster)</i>
		Distância da Rede Hidrográfica	<i>Tiff (raster)</i>
	1990 e 2000	Distância da Rede de Transporte	<i>Tiff (raster)</i>
	2011	Distância da Rede de Transporte	<i>Tiff (raster)</i>
		Distância das Áreas de Preservação Permanente (APP)	<i>Tiff (raster)</i>
		Distância da Planície de Inundação	<i>Tiff (raster)</i>
	1990	Distância das áreas urbanizadas em 1990	<i>Tiff (raster)</i>
	2000	Distância das áreas urbanizadas em 2000	<i>Tiff (raster)</i>
Estáticos			
Catagóricos			
		Declividade: < 5%; 5 a 12%; 12 a 30%; 30 a 47% e > 47%	<i>Tiff (raster)</i>
		Altitude: 0 a 50m; 50 a 150m; 150 a 250m e 250 a 443m	<i>Tiff (raster)</i>

Os mapas estáticos, também denominados de variáveis espaciais explicativas, foram produzidos e divididos em dois grupos: contínuos (de distância em m) e categóricos, Tabela 6.

O mapa de Distância do Rio Principal foi produzido a partir da vetorização na imagem Landsat TM5 de 2011.

O mapa da Distância da Rede Hidrográfica foi produzido a partir da rede hidrográfica constante nas cartas topográficas.

O mapa da Distância da Rede de Transportes em 2000 foi produzido, a partir da vetorização da rede rodoviária principal (pavimentada e não pavimentada) localizada fora da área urbanizada e da rede ferroviária, nas cartas topográficas, e imagens orbitais. O mapa da Distância da Rede de Transportes em 2011, contem os mesmos dados, apenas acrescidos da BR 448, cuja construção foi iniciada após o ano 2000.

O mapa de Distância das Áreas de Preservação Permanente (APP) foi produzido a partir do mapa da Rede Hidrográfica, utilizando um *buffer* de 30m para os afluentes e subafluentes e outro de 100m para o rio principal, definidas conforme a Lei nº 4.771/65, atualmente essa Lei foi revogada pela Lei nº 12.651/12.

O mapa da Distância da Planície de Inundação do rio dos Sinos foi produzido, a partir dos mapas de declividade e altimetria. A definição da cota de altitude e declividade para a delimitação da área de inundação do rio dos Sinos segue metodologia sugerida por BAZZAN (2011).

O mapa de declividade foi produzido, a partir de uma imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Procedeu-se com os seguintes passos: transformação para um arquivo de pontos; conversão das referências espaciais de GCS_WGS_1984 para WGS_1984_UTM_ZONE_22J; interpolação do arquivo de pontos para *raster* com resolução espacial de 30m; e extração das declividades. As classes de declividade foram geradas a partir da metodologia desenvolvida por DE BIASE, (1992), Tabela 7.

Tabela 7 – Descrição das classes de declividade da área de estudo.

Classes de Declividade	Declividade (%)
Limite urbano-industrial, em trabalhos de planejamento urbano. Área de terras cultiváveis com problemas simples de conservação do solo, sem maiores problemas de erosão.	< 5
Limite máximo para o emprego de mecanização agrícola.	5 - 12
Limite máximo para a urbanização sem restrições, a partir do qual toda e qualquer forma de parcelamento far-se-á através de exigências específicas. Limita também o emprego de mecanização agrícola, devido à inclinação das vertentes.	12 - 30
Limite máximo para o corte raso de vegetação, segundo o código florestal, a partir de tal declividade, só será permitida a exploração se sustentada por coberturas florestais.	30 - 47
Entre 47 e 100%, não é permitida a derrubada de florestas para nenhum fim.	> 47

Fonte: DE BIASE (1992). Adaptado pelo autor.

O mapa de altitude foi produzido, a partir de uma imagem SRTM, transformada em um arquivo de pontos, e interpolado para *raster* com resolução espacial de 30m. As classes de altitude foram geradas arbitrariamente em conformação com as características da área de estudo e metodologia adotada no processo de modelagem dinâmica espacial, que requer generalização das classes.

Para validação e verificação dos mapas, utilizaram-se diversas fontes, tais como: pontos de controle de campo, Tabela 5, imagens do *Google Earth* e cartas topográficas. Metodologia sugerida por, DORNELES (2003); NOVO (2008); ROSA (2009).

3.2.1.2 Preparação dos dados para a plataforma de modelagem dinâmica

O *software* Dinamica EGO suporta dados em vários formatos, incluindo mapas *raster*, tabelas, matrizes, e arquivo de coeficiente de Pesos de Evidências. Para dados espaciais, o mesmo suporta apenas conjuntos de dados *raster* com o mesmo número de colunas e linhas, exportado em formatos específicos, ligados ao mesmo sistema de coordenadas e a um ponto de registro comum a todas as células do *grid*, SOARES-FILHO *et al.* (2009).

Dessa forma, tornou-se necessário geoprocessar todos os mapas produzidos, Tabela 6, a fim de torná-los compatíveis com os padrões da plataforma de modelagem dinâmica. O geoprocessamento necessário efetuado no *software* Arcgis9.3 para atender tais padrões seguiu os seguintes passos:

- Uniformização de todos os layers em arquivos *raster* no formato *tiff*;
- Criação de um *layer* do tipo *Shapefile Feature Class Point* para cada mapa, já com um *grid* de 30mx30m, com 970 colunas e 1.147 linhas, compatíveis com as dimensões espaciais da área de estudo extrapolada;
- Junção dos atributos espaciais dos mapas com os respectivos *Shapefile Feature Class Point* criados;
- Transformação de todos os *Shapefile Feature Class Point*, já com os atributos espaciais embutidos, novamente para arquivos *raster* formato *tiff* com tamanho de dado em termos de *bits de Signed 32 bit Integer (-2147483648, 2147483647)*.

3.2.1.3 Quantificação e cálculos de transição

Na quantificação da paisagem da área de estudo, identificou-se as áreas e os percentuais de cada elemento dessa paisagem e as transições ocorridas em percentual e km² nos períodos de análise.

Para tanto, inicialmente procedeu-se com a formatação das planilhas de atributos dos mapas, a fim de, definir um número para cada elemento da paisagem, no *software* ArcGis.

Nessa fase do estudo, foram utilizados apenas os mapas dinâmicos de paisagem de 1990, 2000 e 2011. A partir desses mapas foram gerados os seguintes dados no *software* Dinamica EGO: quantidade de células (*pixel*) por classe de elemento da paisagem para os anos de 1990, 2000 e 2011; quantidade de células que sofreram transição de uma classe para a outra para os períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011; e os percentuais de células que sofreram transição de uma classe para a outra para os períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011.

O processamento foi efetuado para cada par de *layers* ou período de análise, onde a plataforma de modelagem, a partir do modelo *Determine Transition Matrix*, gera duas matrizes de transição: Matrizes Simples (*Single Step*) e Múltiplas (*Multiple Step*).

A matriz de passo único (*Single Step*) corresponde a um período representado por um único passo de tempo, por sua vez, a matriz de passos múltiplos (*Multiple Step*) corresponde a um período representado por múltiplos passos de tempos, neste estudo, cada passo de tempo descrito representará um ano decorrido, Tabela 8.

Tabela 8 – Matrizes de transição geradas.

Mapas utilizados	Passos de tempo (anos)	Matrizes geradas
Paisagem - 1990 e 2000	1	Células por transição
	1	Passo único de tempo (%)
	10	Múltiplos passos de tempo (%)
Paisagem - 2000 e 2011	1	Células por transição
	1	Passo único de tempo (%)
	11	Múltiplos passos de tempo (%)

O modelo gera matrizes de transição, que determinam a quantidade líquida de mudanças, isto é, a porcentagem da superfície que se alterou para outro estado, sendo essas taxas adimensionais. Posteriormente essas taxas líquidas, foram convertidas em taxas brutas (unidades de área em km²) no *software* Excel.

Esse processo permite analisar a hierarquia em termos de área e percentual de cada elemento da paisagem para os anos de 1990, 2000 e 2011, tal como analisar as principais transições ocorridas nos períodos pré-determinados.

As transições, apurados a partir dos mapas dinâmicos para cada período, mais expressivas em termos de percentuais, serão utilizadas em todo o processo de modelagem dinâmica. Onde inicialmente, serão cruzadas com cada mapa estático ou variável espacial possivelmente explicativa de transição.

3.2.2 Simulação de processos de transição dos elementos da paisagem

O desenvolvimento de modelos espaço-temporais, nos quais o estado ou o atributo de certa localização geográfica muda com o passar do tempo em resposta a um conjunto de forças motoras apresenta-se como um pré-requisito crucial para a modelagem da dinâmica de paisagem e, portanto, abre uma vasta gama de possibilidades para a representação dos fenômenos dinâmicos, SOARES-FILHO *et al.* (2009).

Nesse contexto, o *software* Dinamica EGO é utilizado como uma plataforma de simulação para modelos de mudanças na paisagem, objetivando calibrar, executar e validar os modelos e, dessa forma, criar e estocar dados para a geração de cenários prognósticos futuros de alterações na paisagem.

Para tanto, executamos nove passos para completar a modelagem da paisagem da área de estudo nos períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011, Figura 12. Cada um desses passos foi executado em *functors* (modeladores) diferentes.

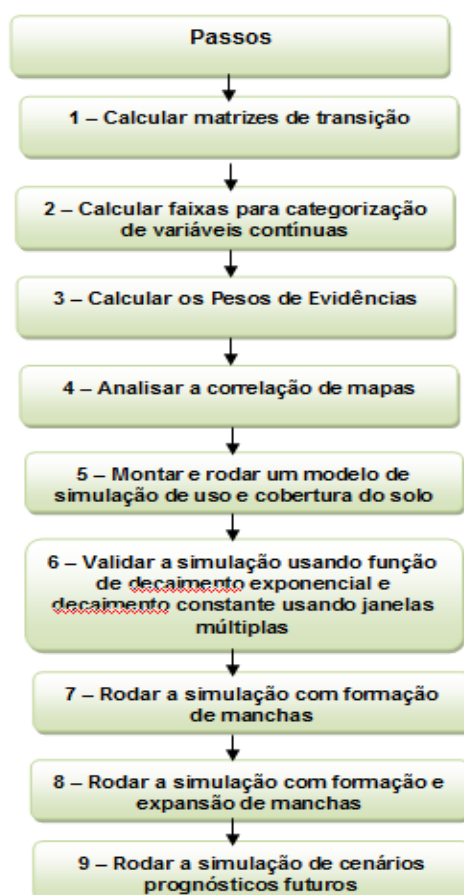


Figura 12 – Nove passos do modelo de simulação de mudanças dos elementos da paisagem desenvolvidos no Dinamica EGO. Fonte: Adaptado de SOARES-FILHO *et al.* (2009).

3.2.2.1 Cálculo de intervalos para categorização de variáveis contínuas

O método dos Pesos de Evidência adaptado de AGTERBERG & BONHAM-CARTER (1990, *apud* SOARES-FILHOS *et al.*, 2009) é aplicado no *software* Dinamica EGO para produzir um mapa de probabilidades de transição, o qual representa as áreas mais favoráveis para uma mudança de estado das classes de uso e cobertura do solo.

Para tanto, inicialmente utiliza-se o modelo *Determine Weights of Evidence Ranges*, este modelador calcula faixas de distância a partir das variáveis espaciais estáticas ou dinâmicas expressas em escalas contínuas de cinza para posterior derivação dos Pesos de Evidência. O modelador permite determinar o número de intervalos e altera o tamanho dos *buffers* pré-determinados tendo como objetivo preservar a estrutura dos dados de cada classe utilizada de uso e cobertura do solo. Neste trabalho foi determinado um incremento de 30 m para os *buffers*, compatível com a resolução espacial dos dados de entrada no modelador.

Em adição aos mapas de paisagem final e inicial para cada período, este modelador requer um cubo de dados *raster* composto por *layers*, criado através do *functor Create Cube Map*. Um cubo *raster* inclui um conjunto de *layers* co-registrados, conforme metodologia cita na seção 3.2.1.2 (preparação dos dados para a plataforma de modelagem dinâmica) em formato de arquivo *ER Mapper* (*ers*) único formato que suporta nomes para camadas, este é um formato *BIL* (*Band Interleaved*) com um arquivo *ASCII* separado para cabeçalho, SOARES-FILHO *et al.* (2009). Devido as diferenças na rede de transporte principal e áreas urbanizadas no período de estudo, produziu-se dois cubos *raster*, um para cada período de modelagem, Tabela 9.

Tabela 9 – Cubos *raster* produzidos.

Cubo raster	Layer	Classe	
Cubo raster_90_00.ers	d_planicie_inunda	Distância da planície de inundação do rio dos Sinos	
	declividade	Declividade: < 5%; 5 a 12%; 12 a 30%; 30 a 47% e > 47%	
	d_rio_princ	Distância do rio principal (Sinos)	
	d_rede_hidro	Distância da rede hidrográfica da bacia do rio dos Sinos	
	d_rede_trans_00	Distância da rede de transporte principal de 2000	
	d_APP_rede_hidro	Distância das áreas de preservação permanente (APP) da rede hidrográfica da bacia do rio dos Sinos	
	altitude	Altitude: 0 a 50 m; 50 a 150 m; 150 a 250 m e 250 a 443 m	
	d_areas_urb_90	Distância das áreas urbanizadas de 1990	
	Cubo raster_00_11.ers	d_planicie_inunda	Distância da planície de inundação do rio dos Sinos
		declividade	Declividade: < 5%; 5 a 12%; 12 a 30%; 30 a 47% e > 47%
d_rio_princ		Distância do rio principal (Sinos)	
d_rede_hidro		Distância da rede hidrográfica da bacia do rio dos Sinos	
d_rede_trans_11		Distância da rede de transporte principal de 2011	
d_APP_rede_hidro		Distância das áreas de preservação permanente (APP) da rede hidrográfica da bacia do rio dos Sinos	
altitude		Altitude: 0 a 50 m; 50 a 150 m; 150 a 250 m e 250 a 443 m	
d_areas_urb_00		Distância das áreas urbanizadas de 2000	

Como resultado, esse modelador gera um mapa de distâncias a partir das classes definidas, ou seja, um arquivo base (esqueleto), que é usado como entrada para o cálculo dos Pesos de Evidência, DIAS (2011).

3.2.2.2 Cálculo dos Pesos de Evidência

Para o cálculo dos Pesos de Evidência utilizou-se o modelador *Determine Weights of Evidence Coefficients*, que é semelhante ao modelo de geração de faixas, acrescido de mais um *functor* (*Calc Distance Map*) que permite incluir as mesmas variáveis dinâmicas utilizadas na geração de *ranges*.

Para tanto, foram definidos os seguintes parâmetros:

a) Parâmetros de entrada: mapa de paisagem inicial e final para cada período; mapa de variáveis estáticas (cubo *raster*); arquivo de faixas (esqueleto).

b) Parâmetros de saída: arquivo de coeficientes de Pesos de Evidência em tabela e gráficos.

Este modelo gera tabelas e gráficos demonstrando os coeficientes de transição para cada faixa de distância (*range*) de cada transição pré-determinada cruzada com todos os mapas estáticos do cubo *raster*.

Esta fase do processo de modelagem se caracteriza pela calibragem dos modelos, ou seja, avaliação dos índices e seleção das variáveis utilizadas nos cruzamentos de dados. Sendo assim, nesta fase todas as faixas com coeficientes de Pesos de Evidência com valor zero ou muito próximo a esse índice são excluídos, a fim de eliminar área sem relevância para a criação dos mapas de probabilidade de transição e reduzir o tempo de processamento de dados.

3.2.2.3 Análise de correlação dos mapas

Para a validação dos Pesos de Evidência, utilizou-se o modelo *Determine Weights of Evidence Correlation*. Este modelo executa o teste de *Cramer* e o *Joint Information Uncertainty* (Incerteza de Informação Conjunta), em pares de mapas estáticos utilizados para cada transição pré-determinada.

Nesta etapa foram utilizados no modelo os seguintes parâmetros:

- a) Parâmetros de entrada: mapa de paisagem inicial; mapa de variáveis estáticas e; arquivo de pesos de evidências;
- b) Parâmetros do modelador (*Determine Weights of Evidence Correlation*): cálculo do mapa de distância, com inserção do número de classes consideradas e; inserção de todas as transições ocorridas no período;
- c) Parâmetros de saída: tabela com o nome para o arquivo de correlação dos pesos de evidência.

Os índices gerados pelos modelos serão editados em uma planilha do *Excel*, o que possibilita a análise de todos os cruzamentos de variáveis executados pelo modelo e seus respectivos índices. Segundo SOARES-FILHO *et al.* (2009), não há concordância a respeito de qual limiar deve ser usado para excluir uma variável cruzada. Nesse trabalho utilizamos a metodologia sugerida por BONHAM-CARTER (1994, *apud* ALMEIDA, 2003), onde os valores inferiores a 0,5 para ambos os índices supracitados sugerem menos associação do que mais entre as variáveis. Dessa forma, os pares de variáveis com índices superiores a 0,5 serão recombinaados ou descartados.

3.2.2.4 Criação do modelo de simulação da paisagem

Uma vez definidos os Pesos de Evidência, procedeu-se com a criação do modelo de simulação para simples verificação, a qual indicou as possibilidades de modificações para os testes subsequentes de calibração. A execução do modelo propriamente dito requer a organização de um novo *container* denominado *Repeat*. Este é responsável por executar os seus operadores por iterações, correspondentes ao número de passos (anos) para cada período de simulação. Esta etapa compõe-se de algumas fases, para as quais são definidos parâmetros individuais, cujas caracterizações são descritas a seguir:

- Parâmetros de entrada: mapa de paisagem inicial; mapa de variáveis estáticas; arquivo da matriz de transição de múltiplos passos e; o arquivo de pesos de evidência.
- O *container* denominado *Repeat*, contém uma série de *functors* essenciais ao processo de simulação da paisagem:
 - *Mux Categorical Map*: esse *functor* permite uma atualização dinâmica do mapa de paisagem inicial;
 - *Calc Change Matrix*: esse *functor* recebe a matriz de transição, composta por taxas líquidas, e a utiliza para calcular taxas brutas de quantidade de células a serem alteradas multiplicando as taxas de transição pelo número de células disponíveis para uma mudança específica;
 - *Calc Distance Map*: usado para calcular o mapa de distâncias das variáveis dinâmicas;
 - *Modulate Change Matrix*: esse divide o número de células a serem alteradas por transição em duas matrizes;
 - *Expander*: algoritmo de transição, dedicado apenas à expansão ou retração de manchas já existentes de certa classe;
 - *Patcher*: algoritmo de transição, que gera novas manchas através de um mecanismo de semeadura, de acordo com suas probabilidades de transição;
- Inserção das transições consideradas na execução do *Calc. Weights of Evidence Probability Map*. Nessa fase foi inserido no modelo os parâmetros isométricos, que variam de 0 a 2, e influenciam na formação de uma variedade de tamanhos e formas das manchas de mudanças, tamanho médio das manchas e variância do tamanho médio. As manchas segundo SOARES-FILHO *et al.* (2009), assumem uma forma mais isométrica à medida que este número aumenta.

- Para a definição do tamanho médio das manchas e a variância do tamanho médio, foi utilizado o submodelo do *software* Dinamica EGO, denominado *Calc Mean Patch Sizes and Standard Deviations*.
- Parâmetros de saída: nome para a geração dos mapas de paisagem anual e; nome para a geração dos mapas de probabilidade de mudanças da paisagem anual.

Os mapas de probabilidade de transição para cada classe de uso e cobertura do solo foram analisados visualmente e os mapas de paisagem final, comparados visualmente com os mapas simulados, a fim de obter uma avaliação preliminar, complementada com a comparação quantitativa, obtida na seção seguinte.

3.2.2.5 Validação da simulação

A validação do modelo compreende o cálculo dos mapas de diferença e de similaridade. Os primeiros identificam as distinções entre os mapas de paisagem final e inicial (ambos reais) e entre os mapas de paisagem final simulado e inicial real, RODRIGUES *et al.* (2007). Os mapas de similaridade, por sua vez, com base na localização das células em si mesmas e das células que estão na vizinhança próxima, ou seja, por janelas de resolução espacial.

Essa etapa foi realizada a partir da medida de similaridade fuzzy proposta por Hagen (2003, *apud* SOARES-FILHO *et al.*, 2009) e adaptada por Rodrigues *et al.* (2007) para a implementação no Dinamica EGO. O teste de similaridade fuzzy está baseado no conceito de *fuzziness of location*, no qual a representação de uma célula é influenciada por si mesma e em menor extensão pelas células vizinhas.

O resultado deste teste varia de zero (0) a um (1); quanto mais próximo de um (1), mais similar estará à simulação da situação real. No espaço intermediário desse intervalo, as células da vizinhança mais próxima de cada transição, ou com valores próximos a 1, também serão consideradas similares, porém em menor grau, em decorrência da função de decaimento constante considerada pelo teste, TRENTIN & FREITAS (2010).

A medida de similaridade foi obtida a partir da função de decaimento constante, sendo definidos os seguintes parâmetros:

- Entrada no modelo: mapa de paisagem inicial; mapa final e; mapa simulado;
- Saída: tabelas de máxima e mínima similaridade entre os mapas para as janelas de 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11 células de resolução e os mapas de

similaridade, que demonstram os erros e acertos para os resultados simulados.

Após este processo de validação, realizado com relativos índices de aceitação, é possível efetuar simulações relativas ao período analisado pelo modelador.

3.2.2.6 Simulação com formação e expansão de manchas

Após ajustes do modelado criado e validação do mapa de paisagem, a próxima etapa é de ajustes dos *functors Patcher e Expander*, que formam, expandem e retraem as manchas. Para tanto, observou-se as médias de células por mancha, a variância de células e a isometria, alterando um parâmetro por vez e gerando diversos cenários de evolução da paisagem.

Esses cenários foram comparados com o mapa de paisagem final, tanto com relação à localização das mudanças, quanto à estrutura da paisagem. Essas verificações geraram testes de parâmetros até gerar similaridade de estrutura da paisagem, verificado de forma visual. Todos esses dados armazenados foram utilizados para a geração de um mapa prognóstico futuro da paisagem na área de estudo.

3.2.2.7 Obtenção dos cenários prognósticos

Para simular cenários prognósticos futuros foi utilizado o mesmo modelo citado na seção 3.2.2.6, acrescido de todos os ajustes efetuados através dos testes nas seções anteriores. As únicas modificações foram à paisagem inicial, que passa a ser o mapa de paisagem observada de 2011, devido a maior similaridade do modelo simulado para o período de 2000 a 2011 e o número de iterações ajustado para 5 anos (curto prazo, 2016) e 11 anos (médio prazo, 2022).

Os mapas resultantes para cada passo de tempo foram salvos, tal como as taxas de transição para fins de análise de alterações de áreas das classes de uso e cobertura do solo da paisagem simulada para os anos de 2000, 2011, 2016 e 2022.

4. RESULTADOS

Este capítulo está organizado em três seções. A seção 4.1 aborda os resultados obtidos no processo de quantificação dos elementos da paisagem e as mudanças ocorridas entre as classes nos períodos de 1990 a 2000 e de 2000 a 2011.

A seção 4.2 aborda os resultados da simulação de mudanças na paisagem entre 1990 a 2000 e 2000 a 2011 com o uso do *software* Dinamica EGO.

E por fim, a seção 4.3 apresenta os resultados obtidos da simulação de cenários prognósticos da paisagem em curto prazo (2016) e em médio prazo (2022), com base nos modelos de simulação da paisagem da seção anterior.

4.1 Quantificação e análise de alterações dos elementos da paisagem

Os mapas de paisagem obtidos com processo de classificação digital e vetorização de manchas de uso e cobertura do solo na escala 1:50.000, foram validados a partir de pontos de controle obtidos em campo, Tabela 5. Esses mapas permitiram analisar a estrutura e distribuição espacial das classes de elementos da paisagem, bem como quantificar a área das manchas e as transições ocorridas entre as classes nos períodos analisados.

O processo de quantificação de área das classes e obtenção de taxas de transição entre as mesmas foi efetuado na plataforma de modelagem espacial Dinamica EGO. Esta etapa constitui o passo inicial para o processo de modelagem, pois determina os percentuais de mudanças de estado de uma célula de determinada classe para a outra. Esses dados servem como base para todo o processo de modelagem e como ponto de partida para a compreensão da dinâmica espacial da área de estudo.

A análise da distribuição espacial dos elementos da paisagem observada nos anos de 1990, 2000 e 2011, Figuras 15, 16 e 17, permite inferir sobre algumas características que se mantiveram nesse intervalo de 21 anos.

A fragmentação das manchas, principalmente de cobertura vegetal (incluindo a mata ciliar), campos ou áreas agrícolas, maciços de silvicultura e solo exposto, representam uma característica marcante dessa paisagem. O aspecto geral é de uma paisagem desorganizada, fruto de práticas de uso do solo desregulamentadas pela falta de planejamento territorial e de fiscalização, por parte dos agentes governamentais, no que tange, principalmente, à legislação ambiental.

A explicação para tal fragmentação está no fato dessa área se enquadrar em um padrão de paisagens globalizadas. A área de estudo está inclusa quase que totalmente na Região Metropolitana de Porto Alegre, somado a esse fato, abrange os municípios com maior dinamismo econômico dessa região e grande crescimento populacional, principalmente nas áreas urbanas.

Segundo MARTINS *et al.* (2004), as paisagens globalizadas empregam tecnologia que depende da entrada de energia externa ao sistema para suprir as elevadas taxas de importação e exportação de matéria. Essa lógica provoca grande desequilíbrio no balanço de matéria e energia. Nesse caso, o balanço de energia é sempre positivo devido à elevada entrada de fontes externas à paisagem, como a utilização de combustíveis fósseis. Em relação à matéria, há uma tendência de balanço negativo onde os recursos naturais são explorados sem reposição necessária.

A exceção a essa fragmentação são as manchas de áreas urbanizadas, que se estendem de Canoas a Estância Velha, formando uma conurbação, Figura 13. Como exemplo, o mapa de 2011, demonstra um padrão de uso do solo, urbanizado, associado principalmente à rede de transporte, principalmente rodoviário. Essa rede foi e é, uma das principais forças motrizes do crescimento urbano dos municípios do baixo curso do rio dos Sinos nas últimas décadas. Desenvolveu-se associada à indústria de transformação que necessita de muita matéria-prima e gera grande volume de mercadorias escoadas principalmente por rodovias. Por concentrar parte importante da atividade industrial do Estado, a região serviu como polo de atração populacional de outras regiões do Estado e do Brasil. Esse contingente populacional gerou crescimento desordenado nas cercanias de vias rodoviárias como a BR 116.

Os talhões de rizicultura por irrigação, prática agrícola tradicional na região, também integram um eixo contínuo, porém nesse caso junto à planície de inundação do rio dos Sinos, que se estende da foz até o município de São Leopoldo, Figura 14. A partir do município de Sapucaia até Novo Hamburgo, observa-se uma área de cobertura vegetal contínua junto às áreas de banhado na planície de inundação observada nos mapas de paisagem dos anos de 1990, 2000 e 2011.

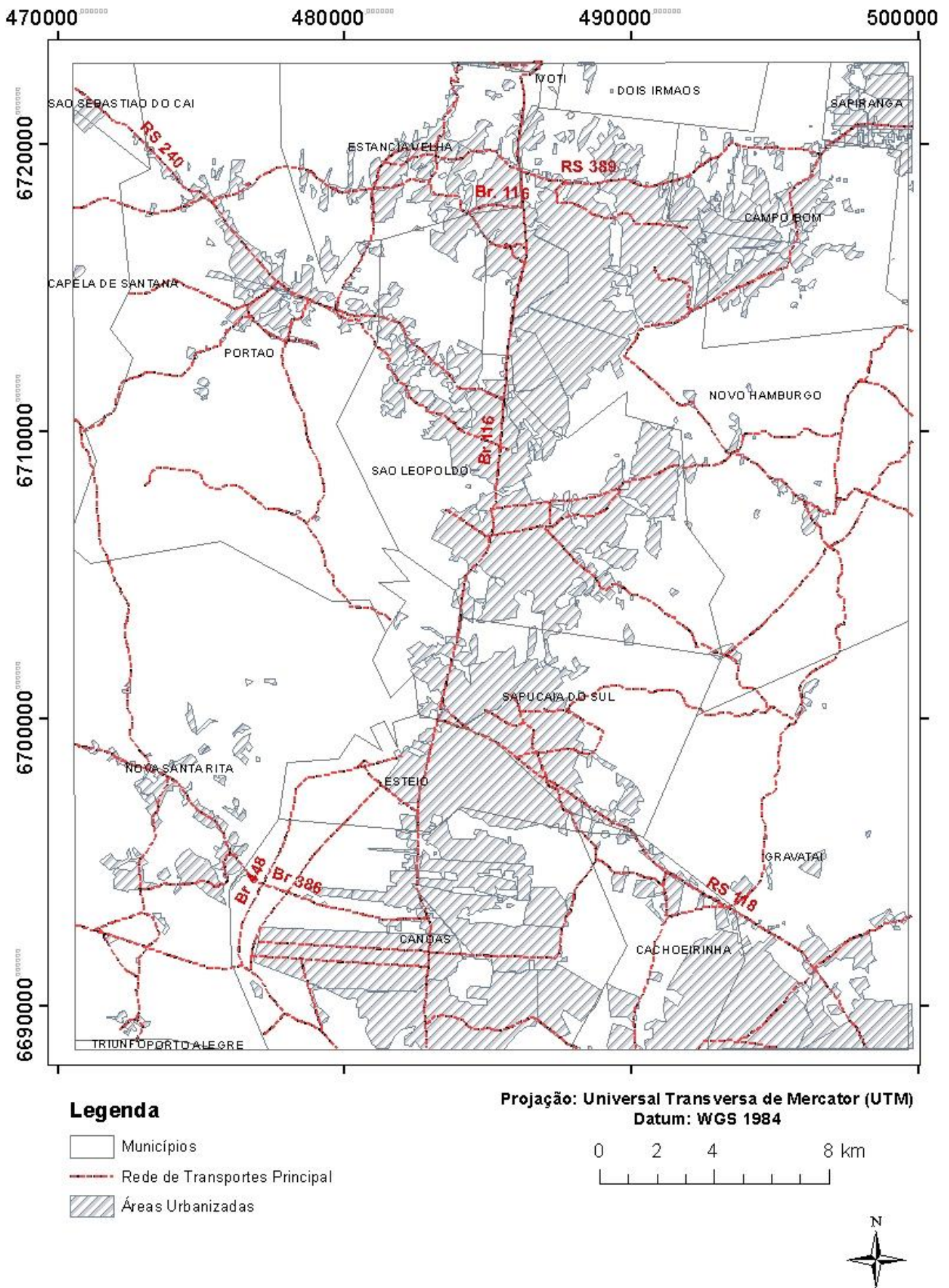
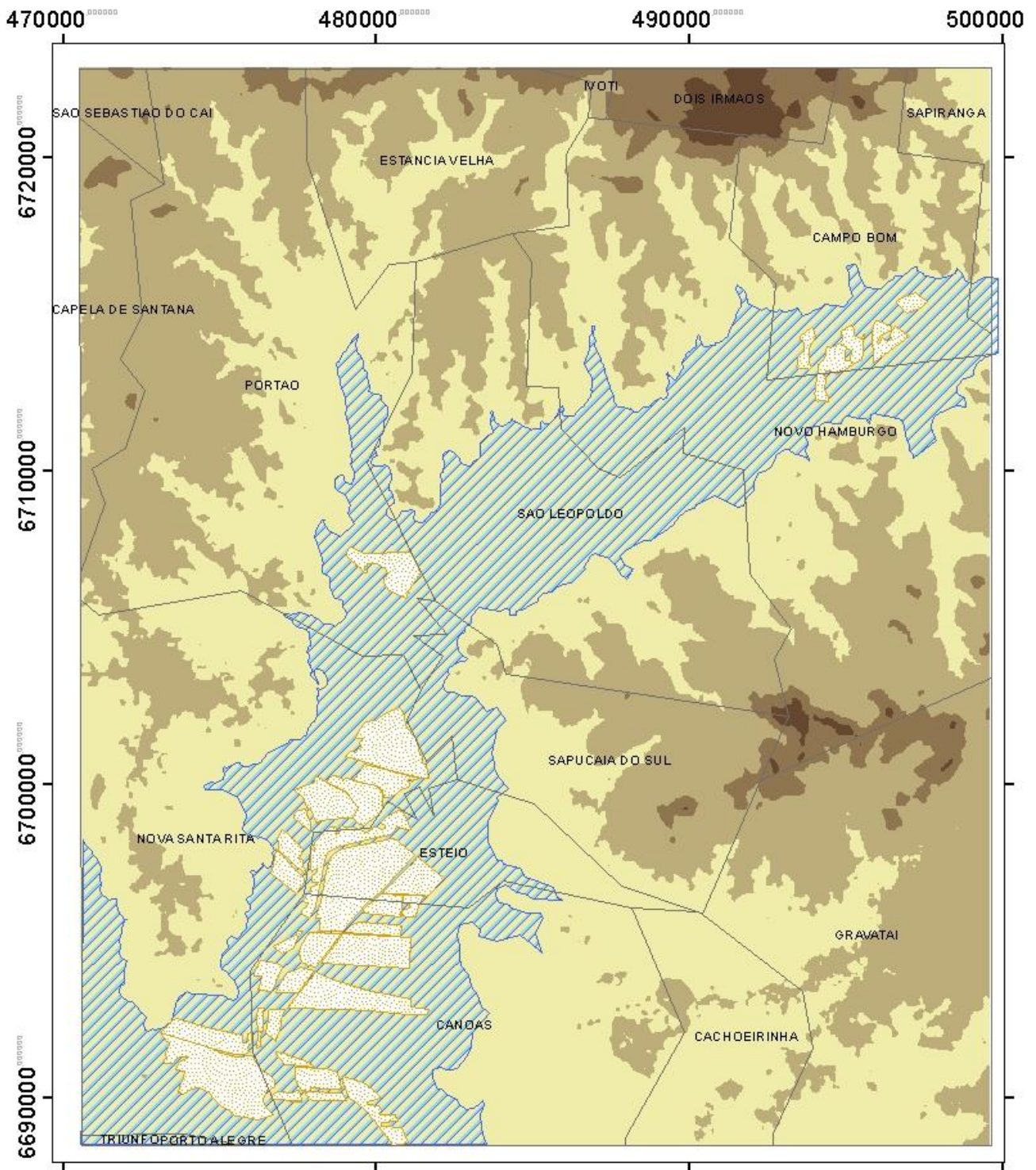


Figura 13 – Áreas urbanizadas associadas à rede de transporte principal em 2011.



Projeção: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum: WGS 1984

0 2 4 8 km

Legenda

Municípios	Altitude (m)	50 - 150
Arrozaís	Cotas	150 - 250
Planície de Inundação	15 - 50	250 - 435

N

Figura 14 – Arrozaís associados à planície de inundação do rio dos Sinos, em 2011.

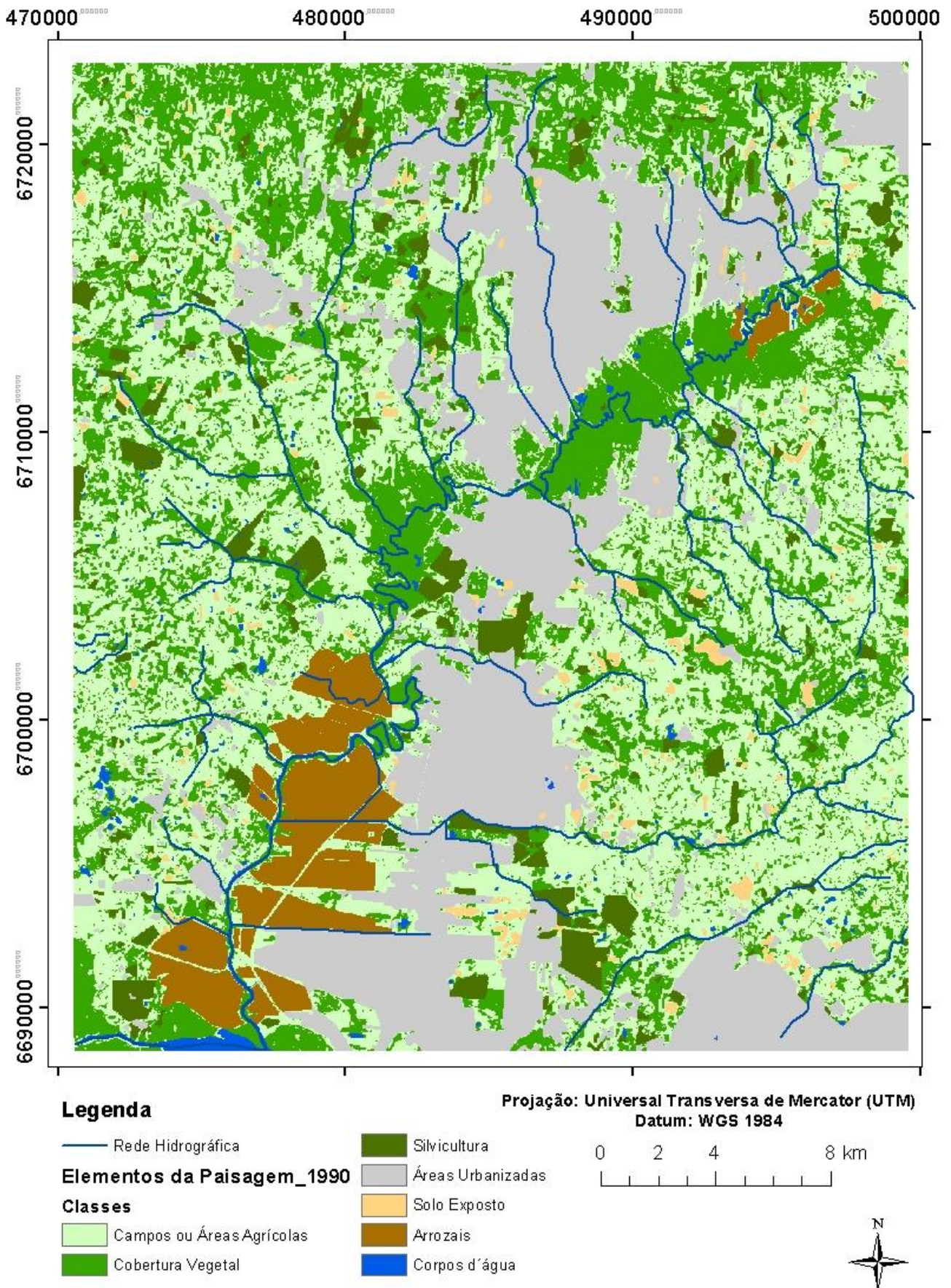


Figura 15 – Mapa dos elementos da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos - RS em 1990.

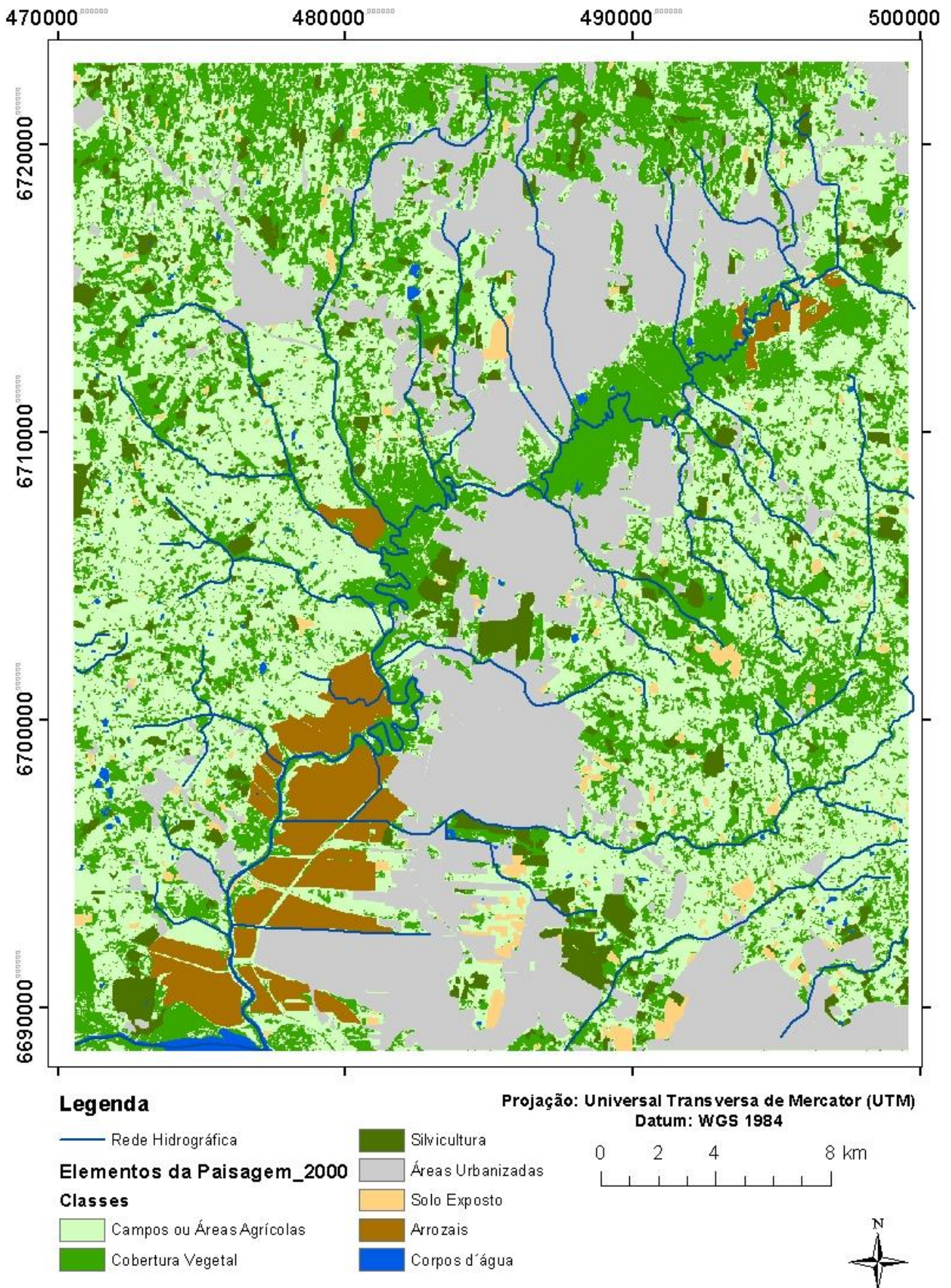


Figura 16 – Mapa dos elementos da paisagem do baixo curso do rio dos Sinóis - RS em 2000.

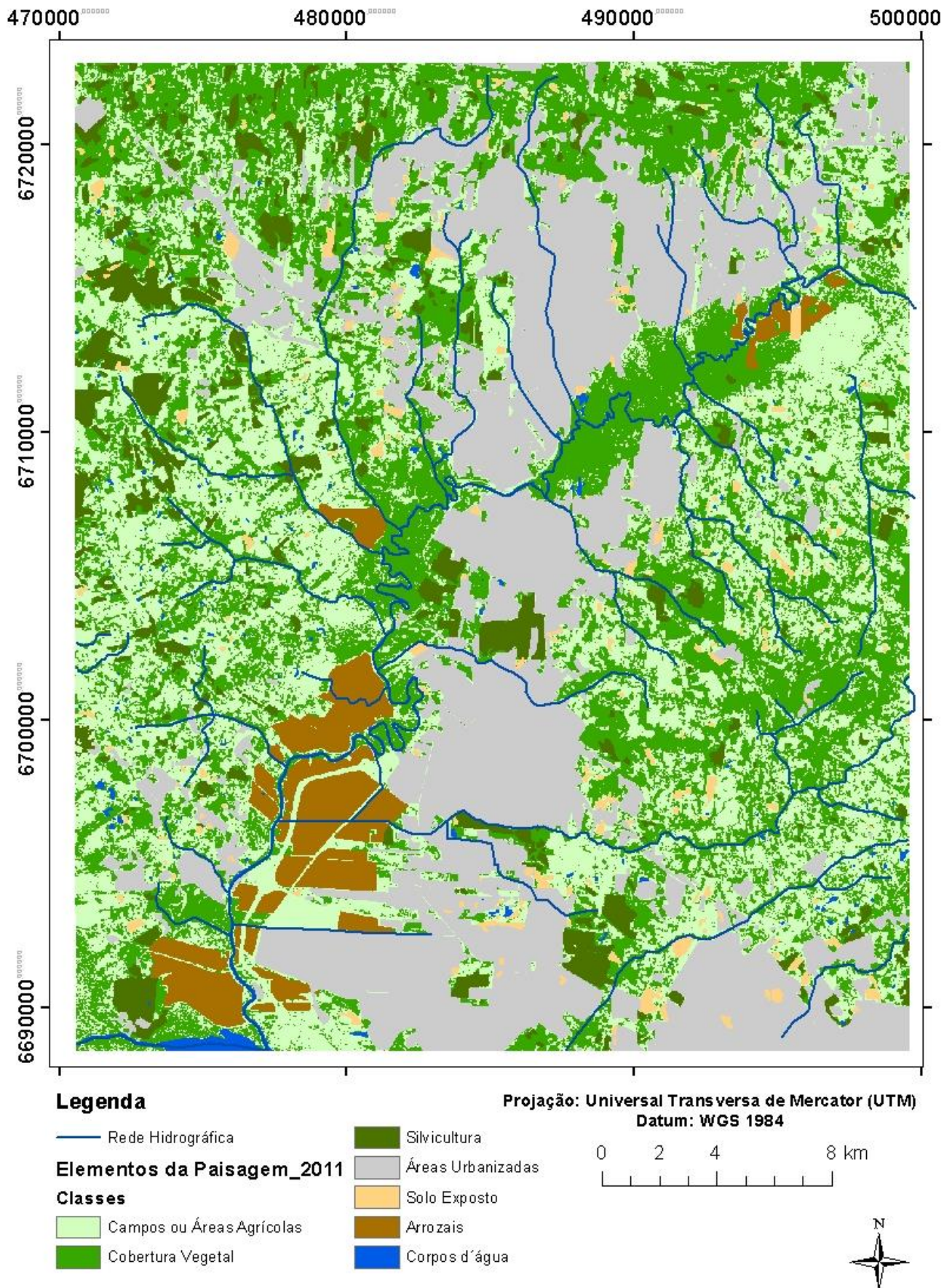


Figura 17 – Mapa dos elementos da paisagem do baixo curso do rio dos Sinóis - RS em 2011.

A análise dos dados obtidos no processo de quantificação das manchas dos elementos da paisagem nos anos de 1990, 2000 e 2011, Tabela 10, permite inferir outras características que se mantiveram nesses 21 anos.

Tabela 10 – Número de células por classe, área em km² e percentual (1990, 2000 e 2011).

Classes de elementos da paisagem	Nº de células	Área (km²)	(%)
1990			
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	437521	393,769	39,44
2 - Cobertura Vegetal	296596	266,936	26,74
3 - Silvicultura	47644	42,880	4,30
4 - Área Urbanizada	250743	225,669	22,61
5 - Solo Exposto	15122	13,609	1,36
6 - Arrozaís	48300	43,471	4,35
7 - Corpos d'água	13292	11,963	1,2
Total	1109218	998,296	100
2000			
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	430359	387,32	38,80
2 - Cobertura Vegetal	288662	259,79	26,02
3 - Silvicultura	47846	43,061	4,31
4 - Área Urbanizada	265525	238,97	23,94
5 - Solo Exposto	17111	15,400	1,54
6 - Arrozaís	48020	43,218	4,33
7 - Corpos d'água	11722	10,550	1,06
Total	1109245	998,321	100
2011			
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	340662	306,596	30,70
2 - Cobertura Vegetal	348249	313,424	31,38
3 - Silvicultura	60679	54,611	5,47
4 - Área Urbanizada	290335	261,302	26,16
5 - Solo Exposto	16524	14,872	1,49
6 - Arrozaís	41264	37,138	3,72
7 - Corpos d'água	11950	10,755	1,08
Total	1109663	998,697	100,00

As classes de campos ou áreas agrícolas e cobertura vegetal predominaram. Em 1990, os campos cobriam (39,44%), em 2000 (38,80%), e em 2011 (30,70%) dos 998 km² da área de estudo. A cobertura vegetal abrangia em 1990 (26,74%), em 2000 (26,02%) e em 2011 (31,38%), caracterizada por manchas remanescentes, junto aos corpos d'água e manchas de transição ou efêmeras, típicas de áreas abandonadas recentemente.

Apesar da redução da área dos campos ou áreas agrícolas e expansão da cobertura vegetal, no período de análise, a primeira compõe a matriz da estrutura dessa paisagem, principalmente no período de 1990 a 2000. Caracteriza-se dessa forma, não apenas pela dominância em área, mas também pela condição de controle sobre a dinâmica espacial, baseada em usos do solo difusos, tais como: especulação imobiliária, atividades agropecuárias, cinturões verdes agriculturas, sítios para lazer, etc.. Apresentando também elevado grau de conectividade entre as manchas, principalmente a jusante do baixo curso do rio dos Sinos.

As manchas de urbanização apresentam configuração retangular com grande extensão, introduzidas de forma espontânea pelos diversos agentes sociais envolvidos na dinâmica dessa paisagem. De acordo com os dados levantados, apresenta tendência a se expandir a partir dos eixos da rede de transporte e da periferia da malha urbana. Os dados levantados apontam que: em 1990, 22,61% da área de estudo eram urbanizadas, em 2000 passou a 23,94% e 2011, 26,16%. Essa expansão em área, somado ao crescimento populacional urbano, indicam que, essa classe se tornará a matriz da estrutura da paisagem do baixo curso do rio dos sinos, a longo prazo.

As manchas de silvicultura apresentaram expansão em área no período de análise, representando 4,30% da área em 1990, 4,31% em 2000 e 5,47% em 2011. Essas manchas são observadas em praticamente toda a área de estudo, com menor ocorrência junto as áreas urbanizadas. A sua distribuição é fragmentada, devido à tendência de alteração uso do solo do baixo curso do rio dos Sinos, observada nas últimas décadas. Onde, as antigas áreas agrícolas de policultura, abandonadas pelo êxodo rural e envelhecimento da população rural, estão sendo substituídas por chácaras de lazer e ou monoculturas de plantas exóticas, como o pinus, eucalipto, dentre outros.

As manchas de rizicultura introduzidas no início do século XX foram delimitadas de forma distinta das áreas agrícolas, por representar a principal atividade agrícola da região do Vale do rio dos Sinos. Porém, nas últimas décadas, esta cultura agrícola apresenta uma pequena retração da área de cultivo sendo substituída por áreas de especulação

imobiliária, principalmente nas cercanias da BR 448, concluída no final de 2013, Figura 18.

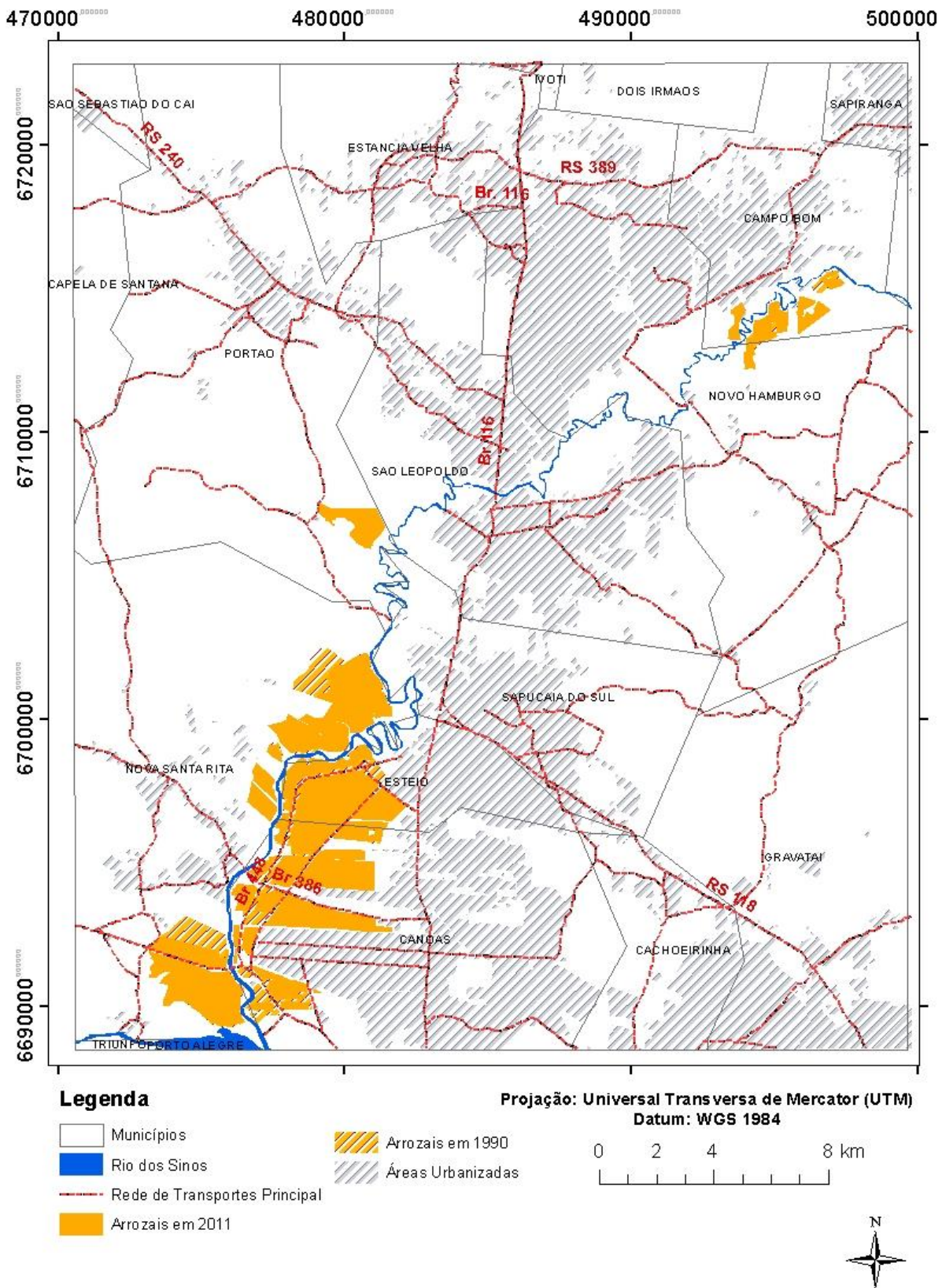


Figura 18 – Mapa da situação dos Arrozais no baixo curso do rio dos Sinos entre 1990 a 2011.

As manchas de solo exposto são típicas de pequenas perturbações dentro da matriz dessa paisagem, principalmente junto às manchas de áreas urbanizadas. São produzidas pela abertura de novos lotes, loteamentos, área de prospecção de rochas ornamentais e áreas agrícolas em pousio.

As manchas de corpos d'água, com exceção da rede hidrográfica, são efêmeras, na sua maioria, formadas por açudes e áreas alagadas. A área de estudo apresenta um pequeno número de açudes perenes.

As matrizes de transição, Tabelas 11 e 12 geradas na plataforma de modelagem do *software* DINAMICA, quantificam as transições ocorridas entre os elementos da paisagem para os períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011.

Tabela 11 – Matrizes de Transição dos elementos da paisagem entre 1990 a 2000.

Transições de passo único (km ²)							
De\Para	1–Campos ou Áreas Agrícolas	2–Cobertura Vegetal	3–Silvicultura	4–Área Urbanizada	5–Solo Exposto	6–Arrozais	7–Corpos d'água
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	0,000	73,884	6,318	24,145	7,874	3,691	1,025
2 - Cobertura Vegetal	74,300	0,000	12,636	7,303	2,751	1,984	1,809
3 - Silvicultura	7,229	10,716	0,000	1,603	0,266	0,010	0,038
4 - Área Urbanizada	15,414	4,712	0,612	0,000	1,316	0,095	0,167
5 - Solo Exposto	6,654	1,121	0,359	2,335	0,000	0,038	0,004
6 - Arrozais	5,045	1,020	0,053	0,012	0,029	0,000	0,022
7 - Corpos d'água	1,849	2,184	0,065	0,205	0,064	0,110	0,000
Transições de passo único (%)							
De\Para	1–Campos ou Áreas Agrícolas	2–Cobertura Vegetal	3–Silvicultura	4–Área Urbanizada	5–Solo Exposto	6–Arrozais	7–Corpos d'água
1- Campos ou Áreas Agrícolas	0,00	19,00	1,60	6,10	2,00	0,90	0,26
2-Cobertura Vegetal	28,00	0,00	4,70	2,70	1,00	0,70	0,70
3-Silvicultura	16,80	24,90	0,00	3,70	0,60	0,02	0,08
4-Área Urbanizada	6,80	2,10	0,30	0,00	0,60	0,04	0,07
5-Solo Exposto	48,80	8,20	2,60	17,20	0,00	0,30	0,02
6-Arrozais	11,60	2,30	0,10	0,02	0,60	0,00	0,05
7-Corpos d'água	15,40	18,20	0,50	1,70	0,50	0,90	0,00

Tabela 12 – Matrizes de Transição dos elementos da paisagem entre 2000 a 2011.

Transições de passo único (km²)							
De\Para	1–Campos ou Áreas Agrícolas	2–Cobertura Vegetal	3–Silvicultura	4–Área Urbanizada	5–Solo Exposto	6–Arrozais	7–Corpos d'água
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	0,000	115, 811	12,902	19,001	7,556	1,244	1,410
2 - Cobertura Vegetal	52,361	0,000	15,617	7,817	2,419	0,573	1,293
3 - Silvicultura	5,007	10,120	0,000	1,595	0,856	0,003	0,007
4 - Área Urbanizada	6,255	3,597	0,166	0,000	1,761	0,006	0,019
5 - Solo Exposto	5,486	1,980	0,390	5,392	0,000	0,025	0,025
6 - Arrozais	6,590	0,991	0,010	0,189	0,160	0,000	0,011
7 - Corpos d'água	1,291	1,053	0,042	0,130	0,017	0,019	0,000
Transições de passo único (%)							
De\Para	1–Campos ou Áreas Agrícolas	2–Cobertura Vegetal	3–Silvicultura	4–Área Urbanizada	5–Solo Exposto	6–Arrozais	7–Corpos d'água
1-Campos ou Áreas Agrícolas	0,00	29,90	3,30	4,90	1,90	0,32	0,36
2-Cobertura Vegetal	20,10	0,00	6,01	3,00	0,93	0,22	0,49
3-Silvicultura	11,62	23,50	0,00	3,70	1,98	0,01	0,02
4-Área Urbanizada	2,61	1,50	0,07	0,00	0,73	0,00	0,01
5-Solo Exposto	35,62	12,85	2,53	35,01	0,00	0,16	0,16
6-Arrozais	15,24	2,29	0,02	0,43	0,37	0,00	0,02
7-Corpos d'água	12,23	9,98	0,40	1,31	0,16	0,17	0,00

Porém, esse método de geração de dados precisa ser refinado pelo analista, a fim de visualizar as principais transições que expliquem parcialmente a dinâmica dessa paisagem e auxiliem na tomada de decisões no processo de modelagem, Tabela 13 e 14.

Tabela 13 – Maiores taxas de transição de passo único dos elementos da paisagem (1990 a 2000).

Classes de transição	Notação	Transição (%)
Campos ou Áreas Agrícolas para Cobertura Vegetal	1 – 2	19, 00
Campos ou Áreas Agrícolas para Áreas Urbanizadas	1 – 4	6,10
Cobertura Vegetal para Campos ou Áreas Agrícolas	2 – 1	28,00
Cobertura Vegetal para Silvicultura	2 – 3	4,70
Cobertura Vegetal para Áreas Urbanizadas	2 – 4	2,70
Silvicultura para Cobertura Vegetal	3 – 2	24,90
Silvicultura para Campos ou Áreas Agrícolas	3 – 1	16,80
Silvicultura para Áreas Urbanizadas	3 – 4	3,70
Solo Exposto para Áreas Urbanizadas	5 – 4	17,20
Solo Exposto para Cobertura Vegetal	5 – 2	8,20
Arrozais para Campos ou Áreas Agrícolas	6 – 1	11,60

No período entre 1990 a 2000, com relação à área das machas de campos ou área agrícolas, o que se observa é que a principal transição ocorreu para manchas de cobertura vegetal (19% da área), indicando abandono de áreas agrícolas. Porém, nesse mesmo período, ocorreram mudanças ainda maiores de manchas de cobertura vegetal para campos ou áreas agrícolas (28%). Essas duas classes apresentaram os maiores percentuais de alterações. Tal fato pode ser explicado, pela natureza meramente quantitativa e não espacial dos dados e em menor grau por erros no geoprocessamento, não eliminados pelo processo de validação dos mapas em verificações de campo.

Por outro lado, tais mudanças associadas a verificações proximais de variáveis espaciais explicativas podem revelar a localização do fenômeno na área de estudo. Na transição entre as cotas de altitude de 50 a 150 m para 150 a 250 m, as mudanças estão localizadas nas porções Norte dos municípios de Campo Bom, Portão e Novo Hamburgo e; Sul de São Sebastião do Caí, Ivoti e Dois Irmãos, Figuras 15 e 16. Observa-se intensa fragmentação da vegetação e o surgimento de áreas agrícolas ou de campos. Porém, a espacialização da expansão das manchas de vegetação não é possível nessa escala de análise e contexto de intensa fragmentação.

Com relação às transições das manchas de campos ou áreas agrícolas e cobertura vegetal para áreas urbanizadas, solo exposto e silvicultura, as mesmas revelam a tendência socioeconômica da região, de expansão urbana e substituição de atividades agrícolas pela produção de madeira para a indústria moveleira e de papel e celulose, principalmente. A expansão urbana sobre as outras classes de uso e cobertura do solo é uma tendência na área de estudo e será discutida quando da sua espacialização para os 21 anos de análise.

As transições ocorridas, no mesmo período, das manchas de arrozais para campos ou áreas agrícolas relevam o abandono parcial, dessa atividade agrícola em parte da área de estudo. Observa-se esse fato em função de novos usos do solo, de caráter urbano, principalmente nos municípios de Nova Santa Rita, Esteio e Canoas, nestes últimos, junto a Br 448.

Atualmente, existe uma tendência de substituição dessa atividade agrícola, por condomínios fechados principalmente no município de Canoas. Essa tendência é corroborada em parte, pelas informações obtidas em trabalho de campo em 21/06/2012, junto ao grupo de gestão ambiental da obra da BR 448. Onde os mesmos afirmaram, que boa parte das terras que margeavam o empreendimento, utilizadas até então para o cultivo de arroz, já haviam sido compradas por incorporadoras ligadas a construção civil.

Em análises de campo, efetuadas entre os dias 06 e 07 de julho de 2013, observou-se também grandes áreas de plantio de arroz em pleno abandono, Figura 19.



Figura 19 – Campos as margens da BR 386, indicando abandono de atividade agrícola (rizicultura), 06/07/2013.

Tabela 14 – Maiores taxas de transição de passo único dos elementos da paisagem (2000 a 2011).

Transição de Classes	Notação	Transição (%)
Campos ou Áreas Agrícolas para Cobertura Vegetal	1 – 2	29,90
Campos ou Áreas Agrícolas para Áreas Urbanizadas	1 – 4	4,90
Campos ou Áreas Agrícolas para Silvicultura	1 – 3	3,30
Cobertura Vegetal para Campos ou Áreas Agrícolas	2 – 1	20,10
Cobertura Vegetal para Silvicultura	2 – 3	6,01
Cobertura Vegetal para Áreas Urbanizadas	2 – 4	3,00
Silvicultura para Cobertura Vegetal	3 – 2	23,50
Silvicultura para Campos ou Áreas Agrícolas	3 – 1	11,62
Silvicultura para Áreas Urbanizadas	3 – 4	3,70
Solo Exposto para Áreas Urbanizadas	5 – 4	35,01
Solo Exposto para Cobertura Vegetal	5 – 2	12,85
Solo Exposto para Silvicultura	5 – 3	2,53
Arrozais para Campos ou Áreas Agrícolas	6 – 1	15,24
Arrozais para Cobertura Vegetal	6 – 2	2,29

No período entre 2000 a 2011, as principais transições ocorreram entre as classes de campos ou áreas agrícolas e cobertura vegetal, tal como no período de análise anterior. Porém, neste período, predominaram as transições para cobertura vegetal entre as de altitudes de 50 a 150 m para 150 a 250 m, localizadas nas porções Norte dos municípios de Campo Bom, Portão e Novo Hamburgo e; Sul de São Sebastião do Caí, Ivoti e Dois Irmãos. Caracterizando uma inversão de tendência, com relação ao período anterior. A porção Leste de Sapucaia do Sul e São Leopoldo e; Oeste de Gravataí são áreas novas de expansão da cobertura vegetal.

As transições das classes de campos ou áreas agrícolas e cobertura vegetal para áreas urbanizadas, solo exposto e silvicultura, mantém a tendência de plena expansão urbana e substituição de atividades agrícolas, observada no período anterior. A Figura 20 demonstra a expansão urbana sobre as demais classes nos últimos 21 anos.

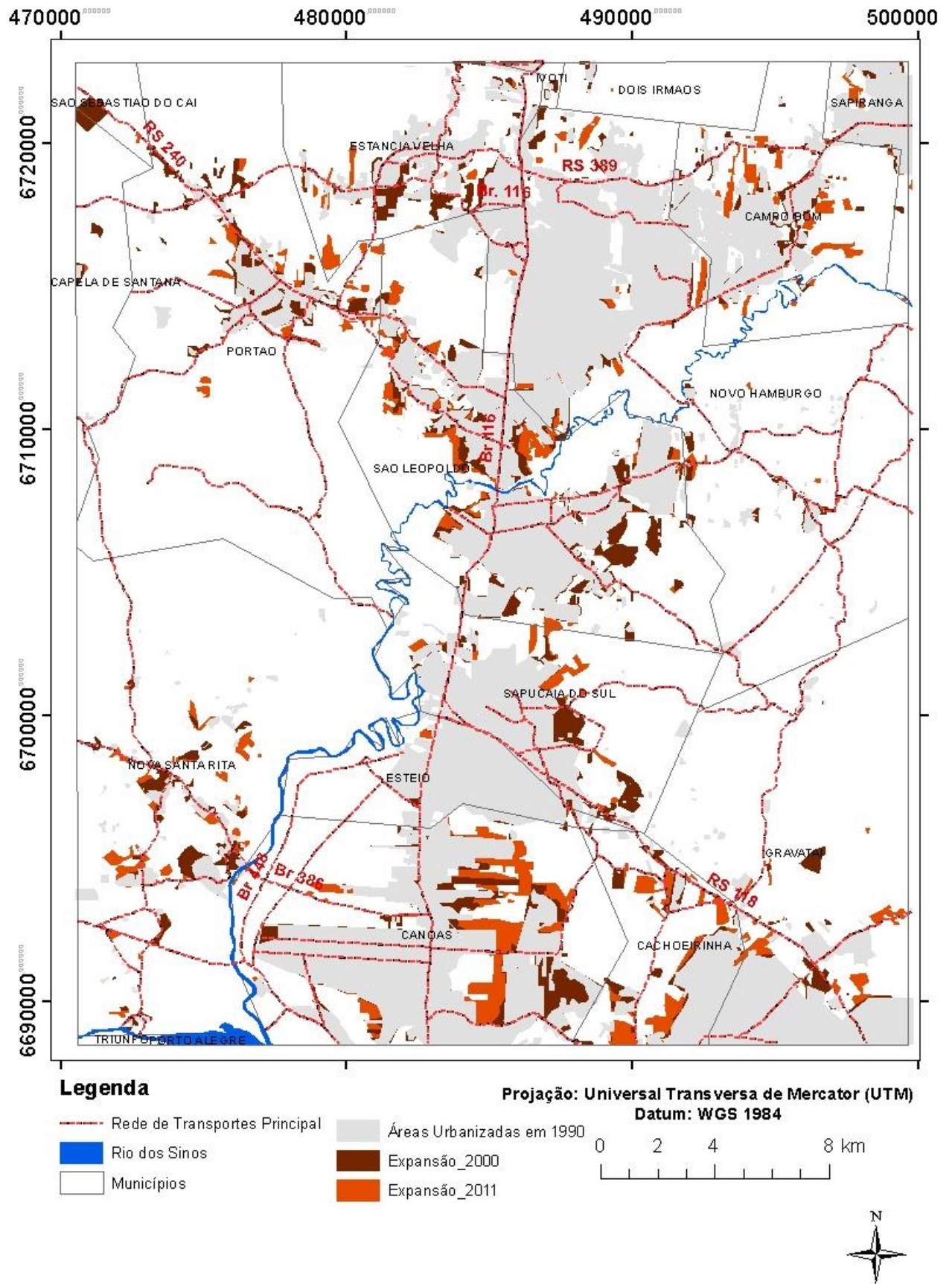


Figura 20 – Expansão das áreas urbanizadas no baixo curso do rio dos Sinos no período de 1990 a 2011.

A análise da Figura 20 permite inferir que: a) todos os municípios apresentaram expansão das áreas urbanizadas; b) a expansão urbana ocorreu principalmente junto a malha rodoviária, como demonstra também a Figura 13 e; c) os municípios maiores e mais desenvolvidos apresentaram grande crescimento nas áreas periféricas da mancha urbana. Áreas associadas a condomínios fechados, afastados das grandes avenidas e rodovias, como por exemplo, Canoas, Sapucaia do Sul, São Leopoldo e Novo Hamburgo.

A classe de silvicultura manteve a tendência de expansão em área, porém a uma taxa maior que o período anterior, aja visto que em 1990 representava 4,30% da área total, em 2000 passou para 4,31% e em 2011, 5,47%. Essa expansão se deu de forma pulverizada, na forma de pequenas manchas nas áreas rurais de praticamente todos os municípios da área de estudo.

Mudanças significativas, também ocorreram nas transições de solo exposto para áreas urbanizadas. No período anterior a taxa foi de 17,20% e entre 2000 a 2011 passou para 35,01%. Este aumento na taxa de transições está relacionado ao crescimento do setor de construção civil, um dos destaques econômicos no Brasil nesta última década. A expansão do crédito imobiliário gerou, mesmo que de forma insuficiente, uma redução do déficit habitacional metropolitano. Estes fatos geram uma dinâmica de abertura de loteamentos (solo exposto) e posterior construção de infraestrutura urbana e habitações de diversos padrões.

De uma forma geral, percebe-se que o baixo curso do rio dos Sinos, apresentou nesses 21 anos de análise, tendência a urbanização do uso do solo gerando reflexos na estrutura dessa paisagem. Tais reflexos estão explícitos pelo aumento contínuo da área urbanizada, mas também pela expansão da cobertura vegetal de forma fragmentada, expansão da silvicultura, retração dos talhões de arrozais, retração dos campos ou áreas agrícolas e substituição do solo exposto por mancha urbana. Mudanças essas, relacionadas ao domínio do modo de vida urbano/industrial que subordina o campo à área de lazer e produção de renda para a subsistência nas cidades que necessitam cada vez mais de novas áreas.

4.2 Simulação de alterações na paisagem

Nesta seção são descritos os principais resultados obtidos no processo de simulação da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos, para os períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011, desenvolvido no *software* Dinamica EGO. Esses resultados foram divididos em duas etapas: calibração dos modelos de simulação da paisagem final para os anos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011; e validação dos modelos simulados junto aos mapas de paisagem final real de 2000 e 2011.

4.2.1 Calibração dos modelos de simulação da paisagem

Na seção anterior apresentaram-se os resultados obtidos com a quantificação dos elementos da paisagem a partir das matrizes de transição de passo único entre as classes, calculadas por meio de tabulação cruzada no *software* Dinamica EGO. Essas matrizes, juntamente com as matrizes de múltiplos passos, constituem dados de entrada para diversas etapas no processo de modelagem dinâmica.

O segundo passo no processo de modelagem, pois o primeiro consiste em gerar matrizes de transição, se refere à geração de faixas de distância (*ranges*), definidas, a partir dos atributos espaciais das variáveis estáticas contínuas e categóricas (citadas assim, pois não sofrem alterações durante o processo de modelagem dinâmica) contidas nos cubos de arquivos *raster* de 2000 e 2011, em relação às principais transições previamente determinadas. Essas faixas de distância foram determinadas de acordo com a resolução espacial do *pixel* dos *layers*, sendo, portanto, alocadas em intervalos iniciais de 30 metros. Esses intervalos são alterados pelo modelador, em alguns casos, em função da estrutura dos dados relacionados (variáveis estáticas e transição pré-determinadas). O objetivo desse passo é criar um arquivo de faixas (esqueleto) para as quais serão atribuídos pesos de evidência.

O terceiro passo consiste na aplicação do método dos Pesos de Evidência. Nessa fase, são calculados os pesos evidência ($W+$) atribuídos à cada faixa de distância gerada. O valor calculado para o peso de evidência em cada faixa de distância em relação à dada variável permite inferir sobre sua contribuição na ocorrência de uma transição. Pesos positivos de evidência favorecem a ocorrência da transição e pesos negativos, por sua vez, a repelem. Valores de pesos nulos (iguais à zero) podem ser desconsiderados, uma vez que não constituem variáveis explicativas para o modelo, SOARES-FILHO *et al.*

(2009). A análise dos pesos de evidência deve ser feita de forma individual para cada transição. Desse modo, sua influência pode ser visualizada com relação à distância para cada variável, BENEDETTI (2010).

O quarto passo, consiste na seleção das variáveis espaciais estáticas que permanecem no processo de modelagem dinâmica. Para cada período efetuou-se testes no *software* Dinamica EGO, que verifica a eventual dependência espacial entre as variáveis com base nos índices de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U). Tais índices operam com valores de áreas de sobreposição entre as variáveis espaciais utilizadas, visando avaliar a presença de associação ou dependência espacial entre ambos.

A decisão quanto à exclusão de variáveis correlacionadas do modelo foi baseada principalmente no índice Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) superior 0,5, conforme, SOARES-FILHO *et al.* (2009). Os pares de variáveis estáticas (distância da rede hidrográfica e distância das áreas de APP da rede hidrográfica) e (altitude e declividade), apresentaram índices superiores a (0,5), ou seja, elevada correlação espacial com relação a todas as transições de classes de uso e cobertura do solo associadas nos dois períodos de análise. Dessa forma, optou-se pela exclusão da variável distância das áreas de APP da rede hidrográfica e altitude do processo de modelagem.

Após a análise da correlação dos mapas estáticos, passamos para a análise dos índices de probabilidade de transição (Pesos de Evidência) entre as classes de uso e cobertura do solo para cada faixa de distância com relação às variáveis estáticas. Nessa ocasião efetuou-se a eliminação das faixas com índices iguais a zero, a fim de, reduzir o processamento de dados nas fases posteriores de simulação da paisagem.

Com relação aos períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011, efetuou-se análise dos coeficientes de Pesos de Evidência para cada uma das principais transições entre as classes de uso e cobertura do solo (Tabelas 13 e 14) e feito cruzamentos com todas as variáveis estáticas. Com tal análise foram identificadas as variáveis estáticas de maior influência nas transições ocorridas entre as classes de uso e cobertura do solo, pré-determinadas.

As Tabelas 15 e 16 apresentam, apenas, as faixas de distância das variáveis estáticas que geraram coeficientes de Pesos de Evidência favoráveis (positivos) às principais transições ocorridas nos períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011.

As demais faixas de distância das variáveis estáticas para todas as transições apresentaram índices desfavoráveis (coeficientes de Pesos de Evidência negativos) ou muito variáveis, ou seja, alternado coeficientes negativos e positivos cada faixa de distância.

Tabela 15 – Variáveis proximais com coeficientes de Pesos de Evidência positivos (1990 a 2000).

Transição	Variável estática proximal	Faixas de distância
Campos ou Áreas Agrícolas para Cobertura Vegetal	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 200 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 200 m
	Distância do rio principal	0 a 1500 m
	Entre as declividades	entre 5 a 47%
Campos ou Áreas Agrícolas para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 330 m
	Distância da rede de transporte em 1990	0 a 630 m
Campos ou Áreas Agrícolas para Silvicultura	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 300 m
	Distância da rede hidrográfica	800 a 9.000 m
	Entre as declividades	entre 5 a 30 %
Cobertura Vegetal para Campos ou Áreas Agrícolas	Distância de áreas urbanizadas em 1990	3.000 a 5.000 m
	Distância da planície de inundação	30 a 4.000 m
	Distância da rede de transporte em 1990	0 a 1.800 m
	Distância do rio principal	Acima dos 2.000 m
Cobertura Vegetal para Silvicultura	Distância de áreas urbanizadas em 1990	principalmente acima dos 3.000m
	Distância da rede hidrográfica	acima dos 850 m
	Distância da rede de transporte em 1990	0 a 350 m
Cobertura Vegetal para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 300 m
	Distância da rede de transporte em 1990	0 a 450 m
Silvicultura para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 300 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 500 m
	Distância da rede de transporte em 1990	0 a 400 m
Solo Exposto para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 100 m
	Distância da planície de inundação	0 a 1.500 m
	Distância da rede hidrográfica	a partir dos 2.000 m

Solo Exposto para Cobertura Vegetal	Distância de áreas urbanizadas em 1990	a partir dos 1.000 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 200 m
	Entre as declividades	entre 5 a 47 %
Arrozais para Campos ou Áreas Agrícolas	Distância de áreas urbanizadas em 1990	0 a 150 m
	Distância da planície de inundação	0 a 60 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 1.000 m
	Distância da rede de transporte em 1990	0 a 150 m
	Distância do rio principal	0 180 m
	Entre as declividades	entre 5 a 12 %

Tabela 16 – Variáveis proximais com coeficientes de Pesos de Evidência positivos (2000 a 2011).

Transição	Variável estática proximal	Faixas de distância
Campos ou Áreas Agrícolas para Cobertura Vegetal	Distância de áreas urbanizadas em 2000	60 a 90 m
	Distância da planície de inundação	30 a 11.500 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 150 m
	Distância do rio principal	0 a 1.320 m
Campos ou Áreas Agrícolas para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 2000	0 a 540 m
	Distância do rio principal	240 a 2.700 m
	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 240 m
Campos ou Áreas Agrícolas para Silvicultura	Distância da rede hidrográfica	480 a 5.640 m
	Entre as declividades	Entre 5 a 30 %
Cobertura Vegetal para Campos ou Áreas Agrícolas	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 360 m
	Distância de áreas urbanizadas em 2000	0 a 90 m
Cobertura Vegetal para Silvicultura	Distância de áreas urbanizadas em 2000	A partir dos 700 m
	Distância da rede hidrográfica	A partir dos 450 m
Cobertura Vegetal para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 2000	0 a 420 m
	Distância da planície de inundação	0 a 1.770 m
	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 1.170 m
Silvicultura para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 2000	0 a 630 m

	Distância da rede hidrográfica	0 a 850 m
	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 1.000 m
Solo Exposto para Áreas Urbanizadas	Distância de áreas urbanizadas em 2000	0 a 450 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 150 m
Solo Exposto para Cobertura Vegetal	Distância da rede hidrográfica	0 a 240 m
	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 200 m
	Distância do rio principal	0 a 120 m
Arrozais para Campos ou Áreas Agrícolas	Distância de áreas urbanizadas em 2000	0 a 1.250 m
	Distância da rede hidrográfica	0 a 1.100 m
	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 630 m
	Distância do rio principal	0 a 180 m
Arrozais para Cobertura Vegetal	Distância do rio principal	0 a 450 m
	Distância da rede de transporte em 2011	0 a 700 m

Os resultados obtidos com a geração de Pesos de Evidência para as transições ocorridas nos períodos de 1990 a 2000 e 2000 a 2011, foram semelhantes e indicaram que as variáveis estáticas, distância da planície de inundação e declividade são as que menos contribuíram para a ocorrência de mudanças na paisagem. Por outro lado, as variáveis estáticas, distância das áreas urbanizadas e da rede de transportes apresentaram coeficientes positivos mais constantes a partir das faixas iniciais, demonstrando uma contribuição maior para as mudanças ocorridas nos dois períodos.

A etapa final do processo de calibração dos modelos de simulação da paisagem consiste em gerar, com base nos processos anteriores, um mapa final simulado a partir de um mapa inicial e das demais variáveis relevantes ao modelo.

O processo de simulação da paisagem no *software* Dinamica EGO é determinado pelos algoritmos de transição *expander* e *patcher*. O primeiro é responsável pela expansão e contração de manchas de células de uma determinada classe, já o segundo é responsável pelo surgimento de novas manchas.

Tais algoritmos são diretamente responsáveis pela alocação das classes no mapa simulado, e é de fundamental importância a calibração de seus parâmetros, que compreendem: tamanho médio de manchas, variância das manchas e grau de isometria.

Os dois primeiros são dados em unidade de área (ha) e podem ser calculados através da média aritmética simples e do cálculo da variância entre o total de manchas (polígonos) de uma determinada classe. O índice de isometria representa um valor numérico a ser multiplicado pelo valor de probabilidade das oito células de uma dada janela de vizinhança (dimensão 3x3 células), utilizada pelos algoritmos *expander* e *patcher*, antes da aplicação da regra de transição. A elevação desse índice define manchas mais compactas, em contrapartida, um índice próximo à zero ocasiona maior fragmentação. Deve-se, portanto, buscar um equilíbrio entre a compactação e fragmentação das mesmas, utilizando um índice de (1,5), SOARES-FILHO *et al.* (2009).

A Tabela 17 mostra os valores calibrados para os algoritmos *expander* e *patcher* para os modelos de simulação referentes aos dois períodos analisados. Os valores relativos ao tamanho médio e variância das manchas das classes foram determinados em parte por uma série de modelos projetados no *software* Dinamica EGO para calcular a métrica da paisagem. Esse conjunto de modelos agrupados em um container calcula o tamanho de cada polígono do *layer*, o tamanho médio dos polígonos por classe e o desvio padrão do tamanho dos polígonos por classe.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados para calibrar os algoritmos *expand* e *patcher* nos modelos de simulação da paisagem de 2000 e 2011.

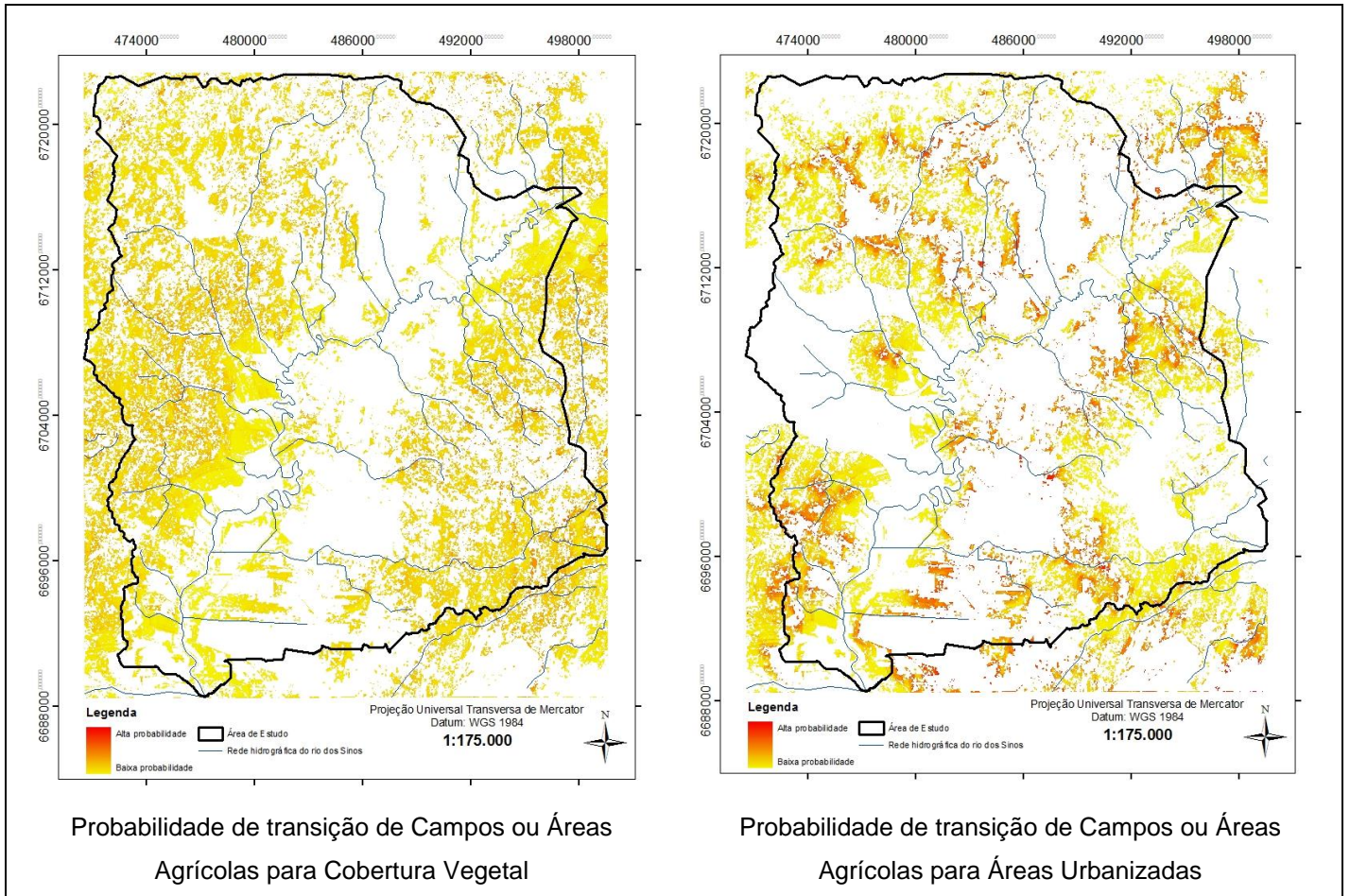
Período de simulação 1990 a 2000					
Manchas resultantes	<i>Expand</i>		<i>Patcher</i>		Isometria
	Média (ha)	Variância (ha)	Média (ha)	Variância (ha)	
Campos ou Áreas agrícolas	10	265	10	265	1,5
Cobertura Vegetal	4	52	4	52	1,5
Silvicultura	10	25	10	25	1,5
Áreas Urbanizadas	189	1.248	189	1.248	1,5
Arrozais	6	12	6	12	1,5
Solo Exposto	216	225	216	225	1,5
Corpos d'água	6	52	6	52	1,5
Período de simulação 2000 a 2011					
Manchas resultantes	<i>Expand</i>		<i>Patcher</i>		Isometria
	Média (ha)	Variância (ha)	Média (ha)	Variância (ha)	
Campos ou Áreas agrícolas	5	128	5	128	1,5
Cobertura Vegetal	5	120	5	120	1,5
Silvicultura	14	32	14	32	1,5
Áreas Urbanizadas	127	983	127	983	1,5
Arrozais	6	7	6	7	1,5
Solo Exposto	148	171	148	171	1,5
Corpos d'água	5	48	5	48	1,5

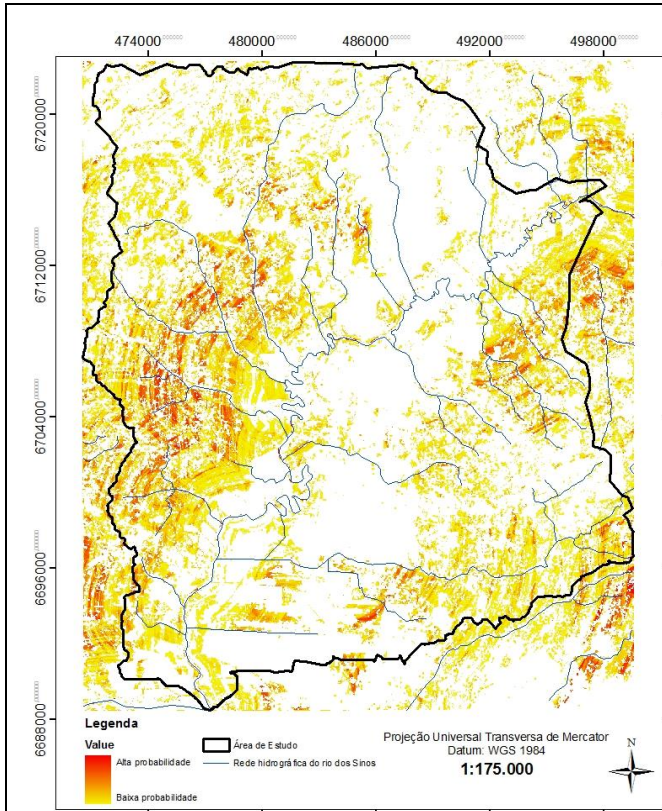
Para a definição de tais parâmetros, considerou-se também a análise visual comparativa entre mapa final simulado e o mapa final real para os dois períodos. Optando-se pela alteração de alguns dos parâmetros (em hectares) obtidos junto aos modelos supracitados, tanto para *expand* quanto para *patcher*, em função dos índices obtidos a partir dos testes de validação dos modelos de simulação da paisagem pelos valores de similaridade *fuzzy*, descrito na seção a seguir.

Além dos algoritmos de expansão, retração e formação de manchas, o modelo de simulação da paisagem do software Dinamica EGO contém em seu *container* um operador (*Calc Weights of Evidence Probability Map*), que gera mapas de probabilidade de transição de células a partir da aplicação do método de Pesos de Evidência.

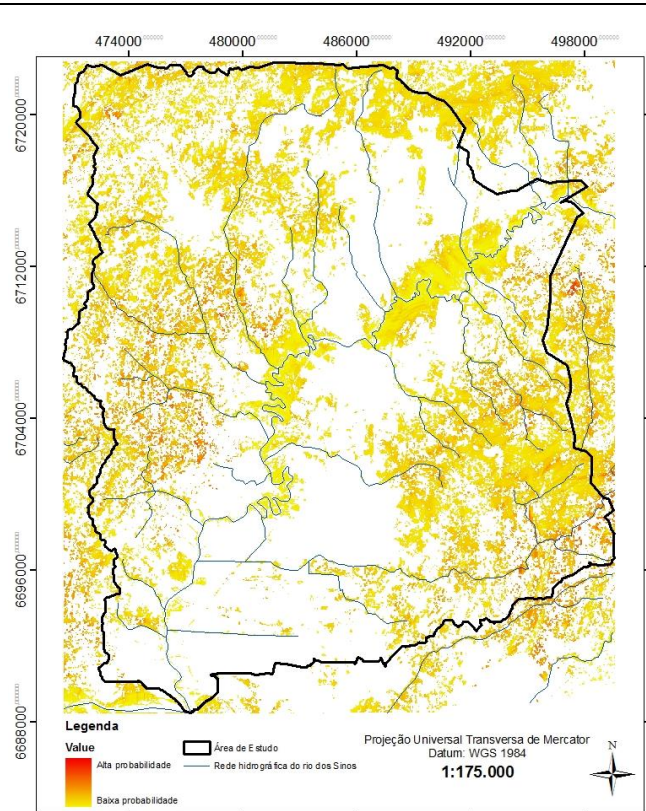
Dessa forma, um dos resultados do processo de simulação da paisagem de 2011, foram mapas de probabilidade de transição entre as classes de uso e cobertura do solo, Figura 21. Nesses mapas, cujas taxas de transição são as maiores para o período simulado (2000 a 2011), destacam-se em vermelho as áreas com alta probabilidade de

transição, em amarelo baixa e sem cores nenhuma probabilidade de transição entre as classes de uso e cobertura do solo.

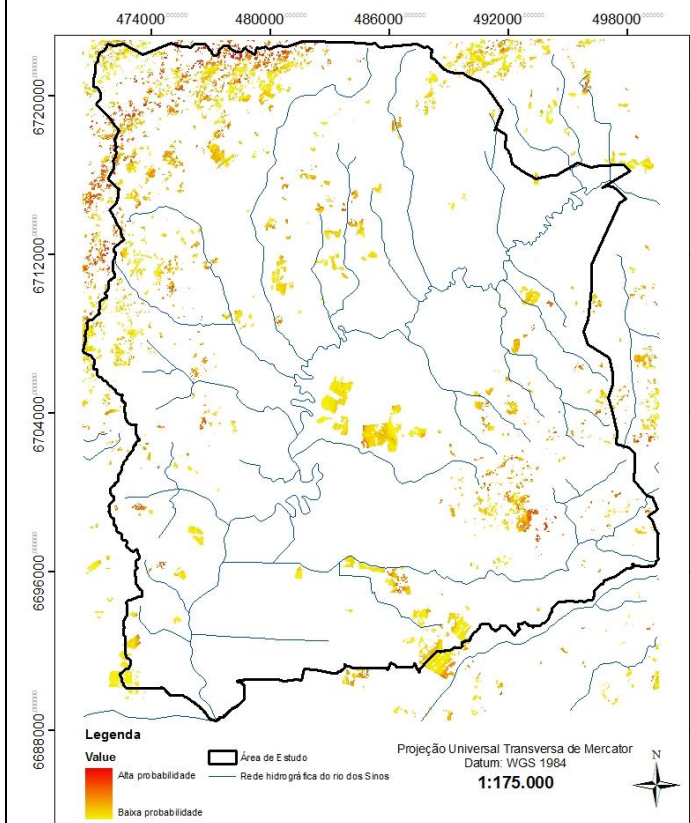




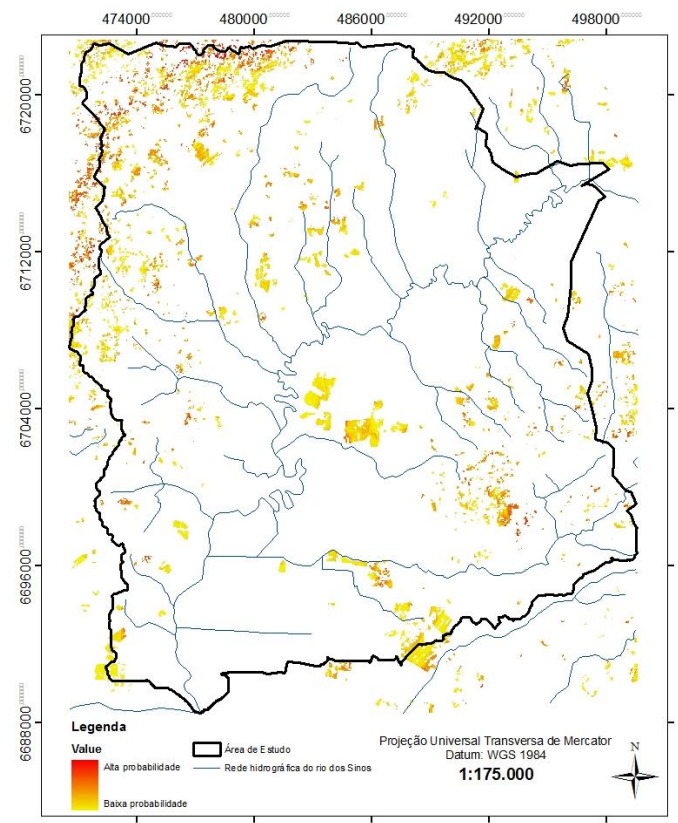
Probabilidade de transição de Cobertura Vegetal para Campos ou Áreas Agrícolas



Probabilidade de transição de Cobertura Vegetal para Silvicultura



Probabilidade de transição de Silvicultura para Campos



Probabilidade de transição de Silvicultura para

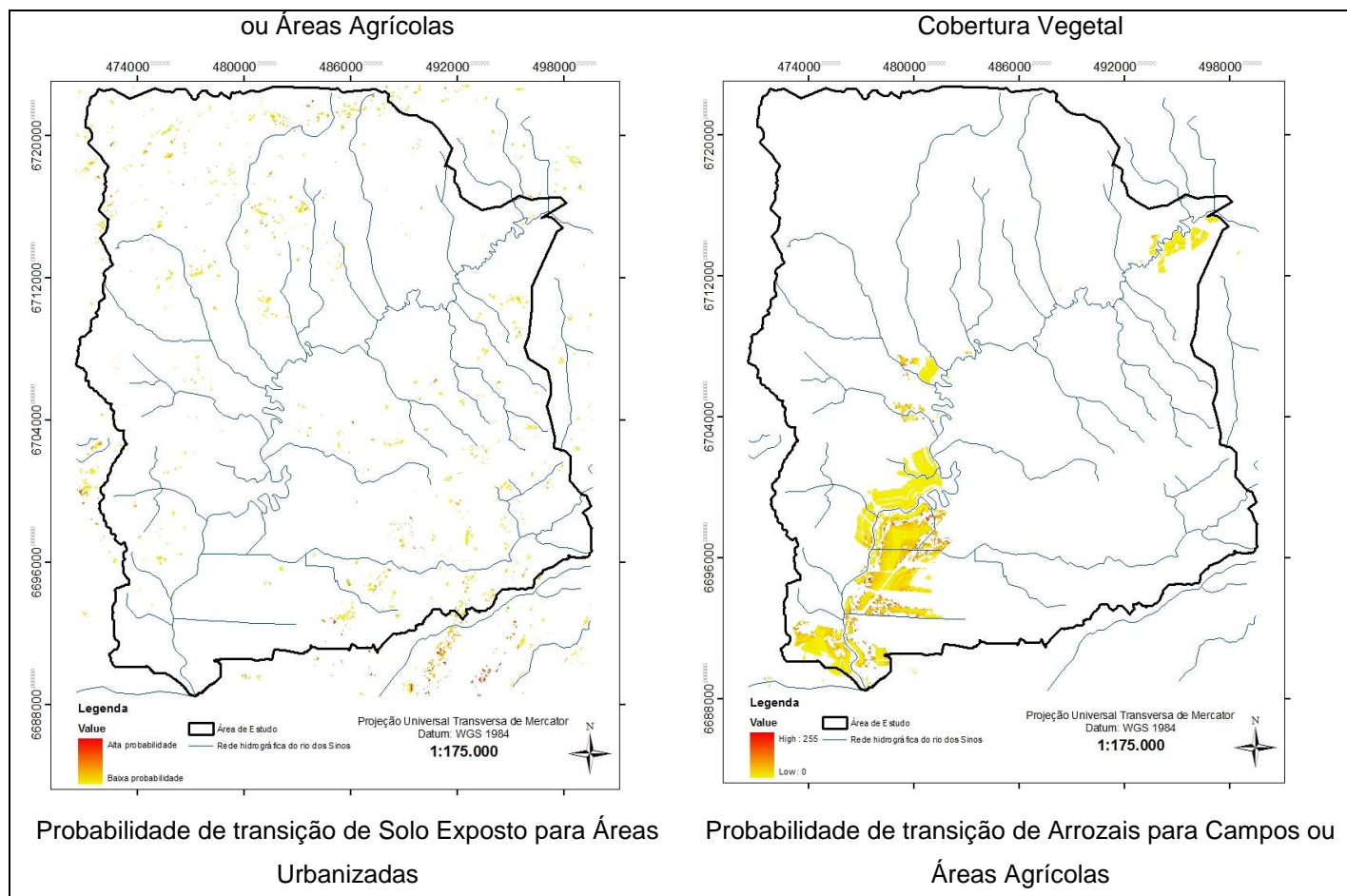
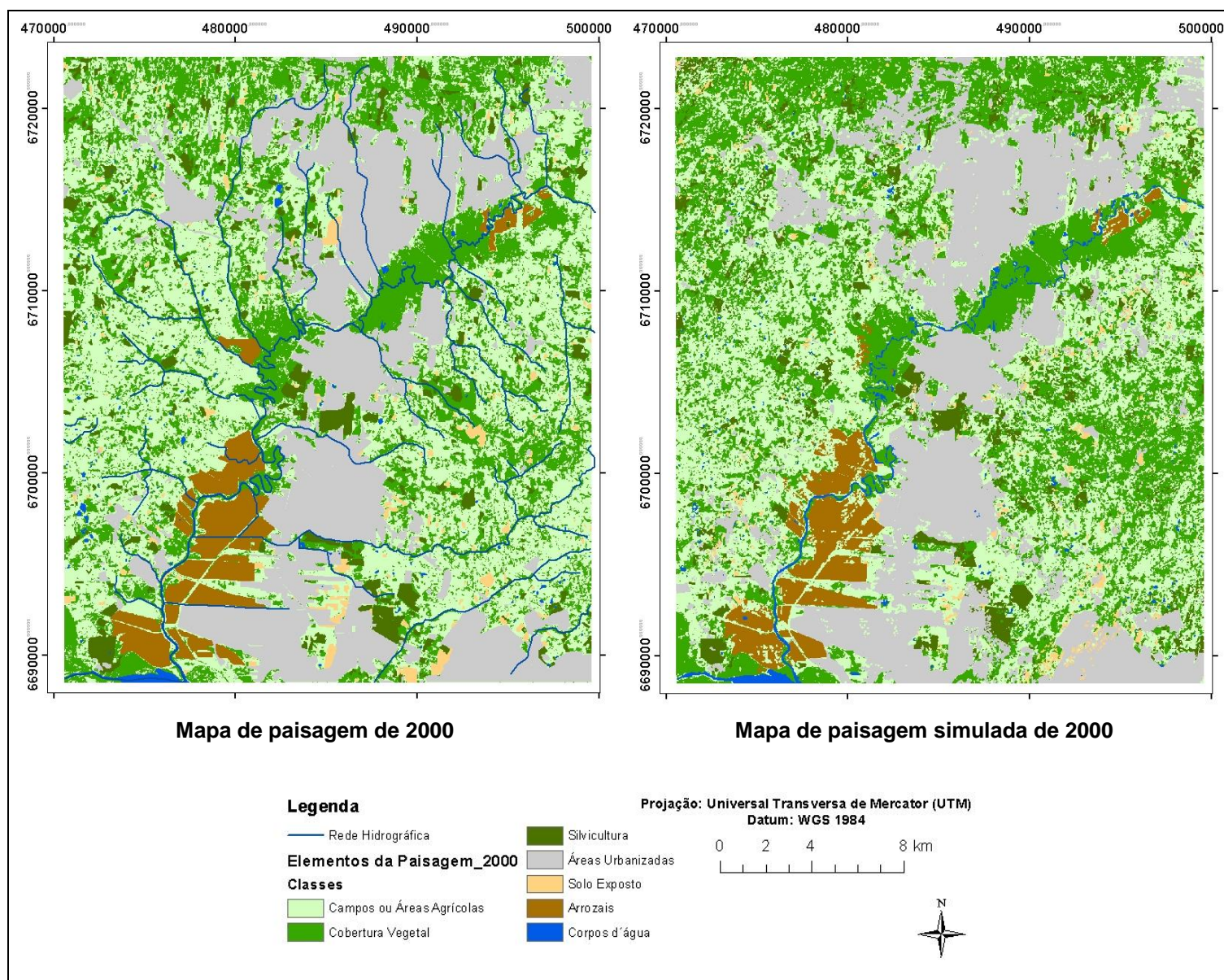


Figura 21 – Mapas de probabilidade de transição entre classes de uso de cobertura do solo para o período de simulação da paisagem entre 2000 a 2011.

Os mapas de probabilidade de transição espacializam dados calibrados no modelo de simulação da paisagem, como, por exemplo, os Pesos de Evidência. Tal informação permite inferir que: junto às áreas urbanizadas existe maior probabilidade de transição de campos ou áreas agrícolas para cobertura vegetal e de solo exposto para áreas urbanizadas; nas áreas afastadas da mancha urbana existe maior probabilidade, porém dispersa, de cobertura vegetal para campos ou áreas agrícolas; junto às manchas de arrozais existe uma maior probabilidade de transição para a classe de campos ou áreas agrícolas. DIAS (2011), também destaca a importância dos mapas de probabilidade, como ferramenta de análise, pois permitem espacializar transições específicas e de interesse da pesquisa em questão.

Como resultado final das etapas de calibração, simulação e validação dos modelos de simulação da paisagem, foram obtidos mapas simulados da paisagem para os anos de 2000 e 2011, apresentados na Figura 22 de forma comparativa com os mapas de paisagem real de 2000 e 2011.

A análise visual dos mapas simulados permite concluir de forma dedutiva o que os índices apurados com a validação dos mesmos comprovam na seção a seguir. A simulação da paisagem para o período de 1990 a 2000 gerou manchas dispersas e em excesso para algumas classes (como, por exemplo, a cobertura vegetal), omitiu a expansão e a formação de novas manchas (como, por exemplo, as áreas urbanizadas) e extinguiu manchas (como, por exemplo, as de silvicultura). Esses equívocos também aparecem na simulação para o período de 2000 a 2011, porém com menor intensidade. Tais discordâncias entre o real e o simulado, são inerentes ao método de simulação espacial, ALMEIDA (2003). Na seção posterior, são espacializadas essas discordâncias, através dos mapas de comissão de manchas para cada classe (manchas em excesso) e omissão para os dois períodos simulados.



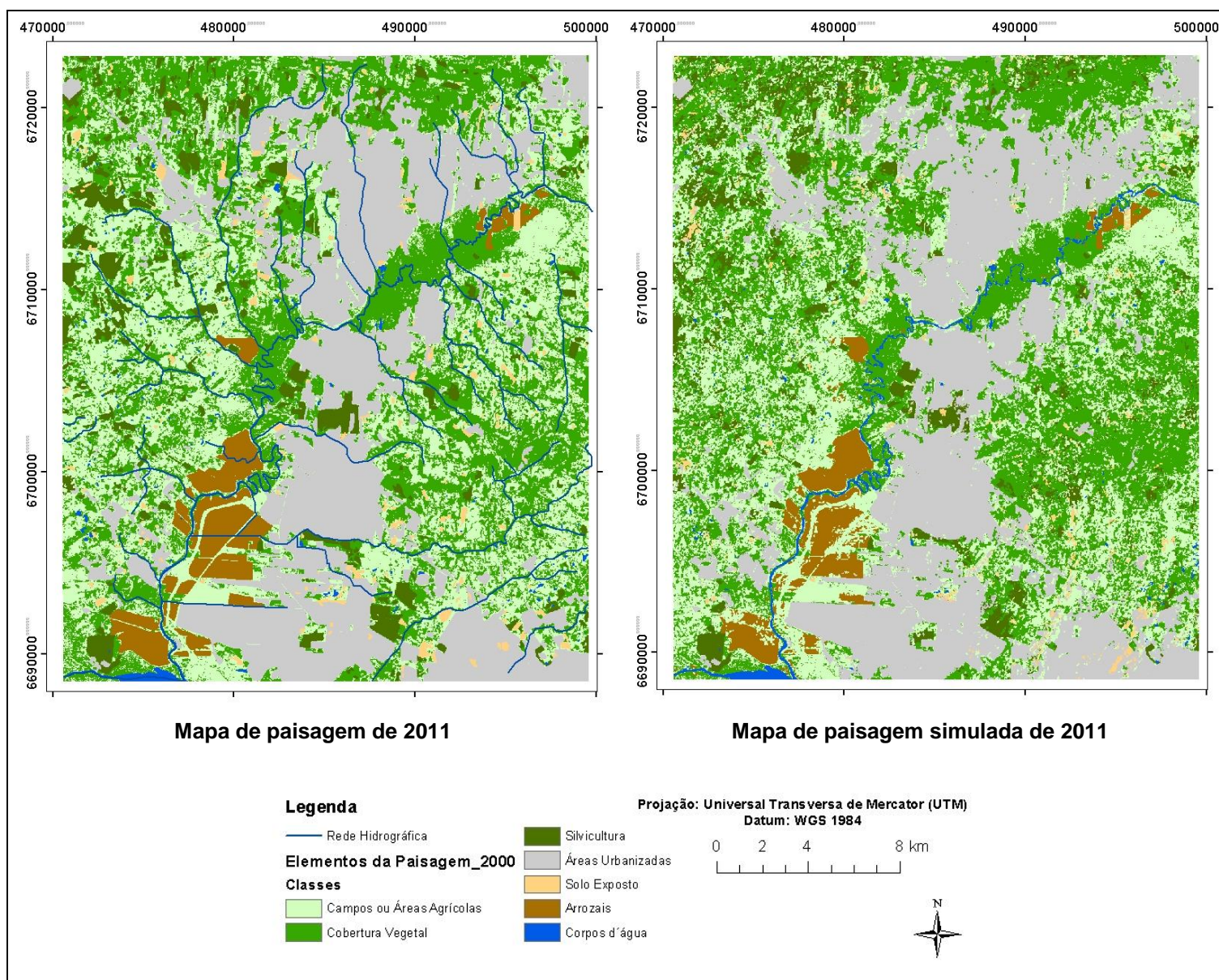


Figura 22 – Mapas de paisagem de 2000 e 2011 e de paisagem simulada de 2000 e 2011.

4.2.2 Validação dos modelos de simulação da paisagem

Os mapas de paisagem simulada de 2000 e 2011 foram avaliados com base nos testes de similaridade *fuzzy* executados na plataforma de modelagem do *software* Dinamica EGO. O resultado deste teste varia de zero (0) a um (1); quanto mais próximo de um (1), mais similar estará a simulação da situação real. Na Tabela 18, estão relacionados os índices de similaridade *fuzzy* calculados através das funções de decaimento constante para diferentes tamanhos de janelas (resolução espacial), obtidos a partir da avaliação de similaridade mínima. As alterações simuladas são comparadas com as alterações ocorridas no período, avaliado assim, erros relacionados a manchas não

criadas. E similaridade máxima, onde as alterações ocorridas no período são comparadas com as simuladas, avaliando dessa forma, os erros de formação de manchas em excesso.

Tabela 18 – Índices de similaridade *fuzzy* calculados para os mapas simulados de 2000 e 2011 através das funções de decaimento constante.

Período de simulação	Janelas (<i>pixels</i>)	Índice de similaridade <i>fuzzy</i>	
		Mínima	Máxima
1990 a 2000	3 x 3	0,36	0,52
	5 x 5	0,44	0,65
	7 x 7	0,51	0,74
	9 x 9	0,56	0,80
	11 x 11	0,61	0,84
2000 a 2011	3 x 3	0,47	0,56
	5 x 5	0,56	0,69
	7 x 7	0,63	0,78
	9 x 9	0,69	0,83
	11 x 11	0,74	0,87

Como resultado secundário do processo de validação dos mapas de paisagem final simulados, o modelo calcula, também, mapas de similaridades mínimas e máximas. A Figura 23 demonstra os mapas de similaridade mínima e máxima para os dois períodos de simulação da paisagem. As áreas em vermelho ilustram total similaridade (índice = 1) entre as células de transição, as áreas sem cores ilustram células idênticas entre o mapa inicial e final, portanto estáticas no período e as áreas em amarelo ilustram células de transição com baixa ou nenhuma similaridade.

Mesmo a partir de uma análise visual, podemos inferir que os mapas de similaridade mínima e máxima para o período entre 2000 a 2011, apresentam um número maior de áreas simuladas similares às alterações corridas. Porém ainda ocorre um número grande de manchas amarelas junto às áreas urbanizadas e de arrozais, tanto para a similaridade mínima, quanto para a máxima. Esse indicativo de erros de omissão e comissão revela que um grande número de manchas para essas duas classes principalmente não foram criadas ou expandidas, ou sofreram retração. Com relação às demais áreas, o que se observa é uma distribuição difusa dos erros, condizentes com a aleatoriedade das transições entre as classes de campos ou áreas agrícolas e cobertura vegetal, principalmente.

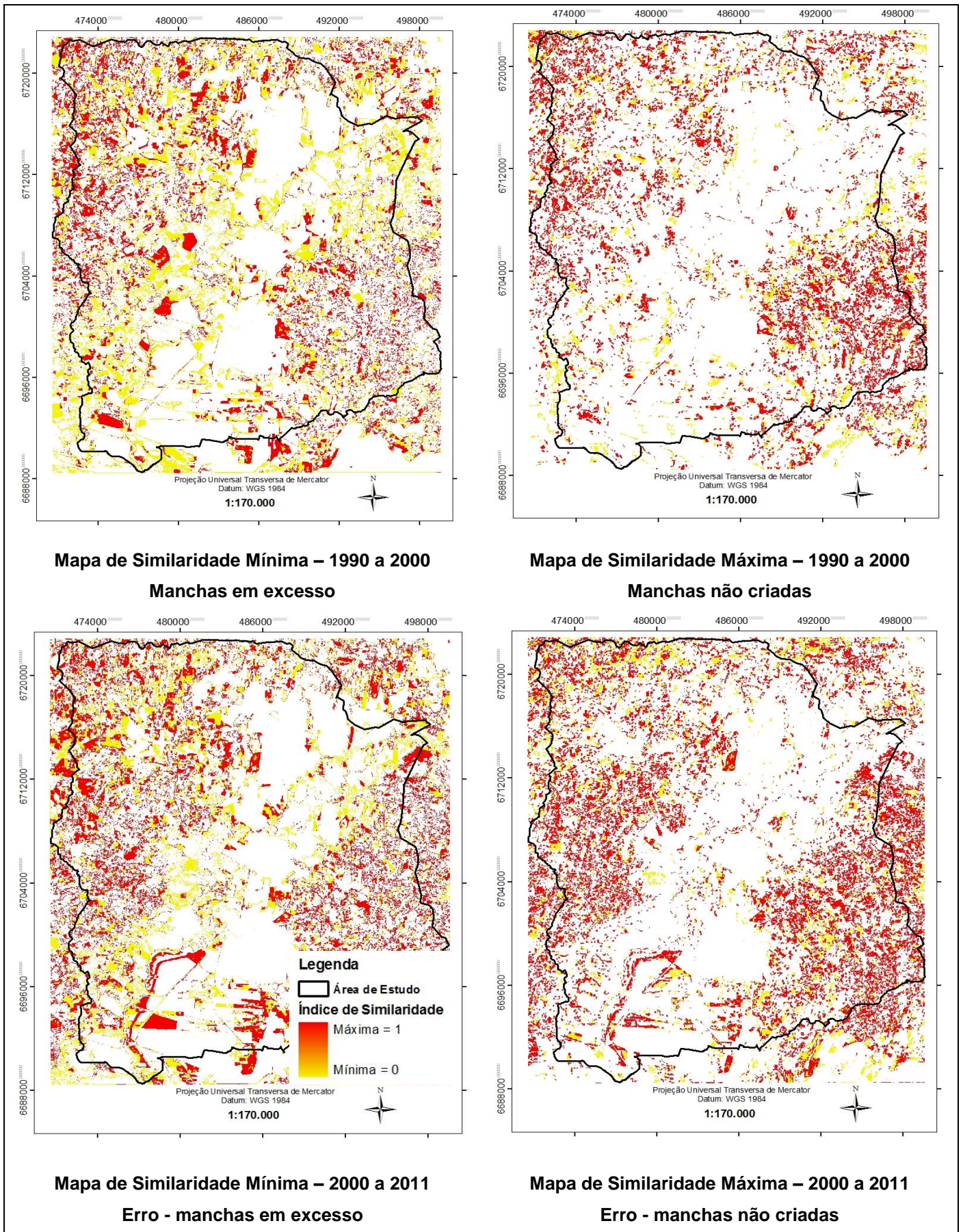


Figura 23 – Mapas de similaridade mínima e máxima de paisagem simulada (2000 e 2011).

Esse método não se baseia no ajuste pixel a pixel, mas sim no ajuste por múltiplas resoluções, no qual um pixel de mudança não alocado exatamente no mesmo local do pixel de mudança observado é considerado correto ao se encontrar nos limites da vizinhança, LIMA *et al.* (2013). A vizinhança por sua vez é determinada por janelas de tamanho variável, sendo neste estudo o tamanho analisado entre três a onze pixels. Segundo FERRARI (2008), os índices tendem a ser maior quanto maior forem as janelas de amostragem. Assim sendo, em resoluções de janelas acima de 11 ou 13 pixels, é comum ocorrer a saturação, conferindo ineficiência ao modelo para avaliar o ajuste entre o mapa real e o mapa simulado.

O uso de índices de concordância por múltiplas resoluções para avaliação da qualidade de modelos de simulação dinâmicos justifica-se pela impossibilidade de reproduzir situações de constantes mudanças com total exatidão espacial, devido à aleatoriedade presente nos processos de mudanças da paisagem, BENEDETTI (2010).

TRENTIN & FREITAS (2010), encontraram valores de similaridades *fuzzy* entre 0,30 a 0,43 para diferentes resoluções com relação à avaliação do processo de modelagem dinâmica espacial do uso do solo do município de Americana - SP ao longo do período de 1962 a 2005. DIAS (2011) ao avaliar a similaridade dos modelos de simulação espacial do uso do solo da bacia do Lago Paranoá em Brasília ao longo do período de 1984 a 2009, encontrou índices entre 0,39 a 0,65 para diferentes resoluções. BENEDETTI (2010), ao analisar a conversões nos padrões de uso da terra, devido à incorporação de áreas florestais nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional, no Rio Grande do Sul ao longo do período de 2000, 2004 e 2008, encontrou índices de similaridade por múltiplas resoluções entre 0,64 a 0,99. Ao analisar a dinâmica espacial do uso e cobertura da terra na Quarta Colônia no Rio Grande do Sul no período de 1988, 2002 e 2008, e gerar cenários prognósticos para 2018, FERRARI (2008) encontrou similaridades para os mapas simulados entre 0,44 a 0,84 para diferentes resoluções.

Sendo assim, de acordo com a literatura, os resultados obtidos para os dois períodos são considerados satisfatórios, Tabela 18. Porém devido aos índices de similaridade mais elevados, apenas os dados do período de 2000 a 2011 são utilizados para a simulação de cenários futuros citados na próxima seção. Contudo, vale salientar que o objetivo da modelagem dinâmica não se vincula à reprodução fiel da realidade, mas somente à verificação das principais tendências e padrões que se processam no espaço, como as mudanças de uso e cobertura do solo, ALMEIDA (2003).

4.3 Simulação de cenários prognósticos futuros

Recentemente, os modelos espaciais têm se tornado importantes ferramentas de auxílio no planejamento territorial, pois não há como desvincular o fator temporal de qualquer estratégia de ordenamento. Dessa forma, os modelos de simulação que reproduzem o padrão das mudanças no espaço podem ser considerados requisitos para o entendimento e avaliação de questões complexas do meio ambiente nas diferentes escalas espaciais, SOARES-FILHO *et al.* (2003).

Em vista dessa contribuição da modelagem ao planejamento territorial, foram elaborados cenários prognósticos futuros, que partem da calibração e validação alcançada para o modelo de simulação da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos de 2011. Os parâmetros utilizados são mantidos inalterados, modificando-se somente o número de iterações, o qual foi extrapolado de forma a representar a paisagem para o curto prazo (2016) e médio prazo (2022).

De acordo com Almeida (2003), é inadequado lidar com prognósticos de longo prazo, uma vez que mudanças de uso do solo de longo prazo são dificilmente previsíveis, ficando sujeitas a erros, em razão de alterações inesperadas na esfera macroeconômica, e conseqüentemente no comportamento do uso do solo. Além disso, conforme a autora, para o planejamento territorial estratégico, somente o curto e médio prazo são relevantes para a definição de prioridades, alocação de recursos e processos de tomada de decisão.

A Figura 24 ilustra a projeção de cenários prognósticos futuros para 2016 e 2022 a partir dos dados calibrados e validados do período de simulação da paisagem entre 2000 a 2011.

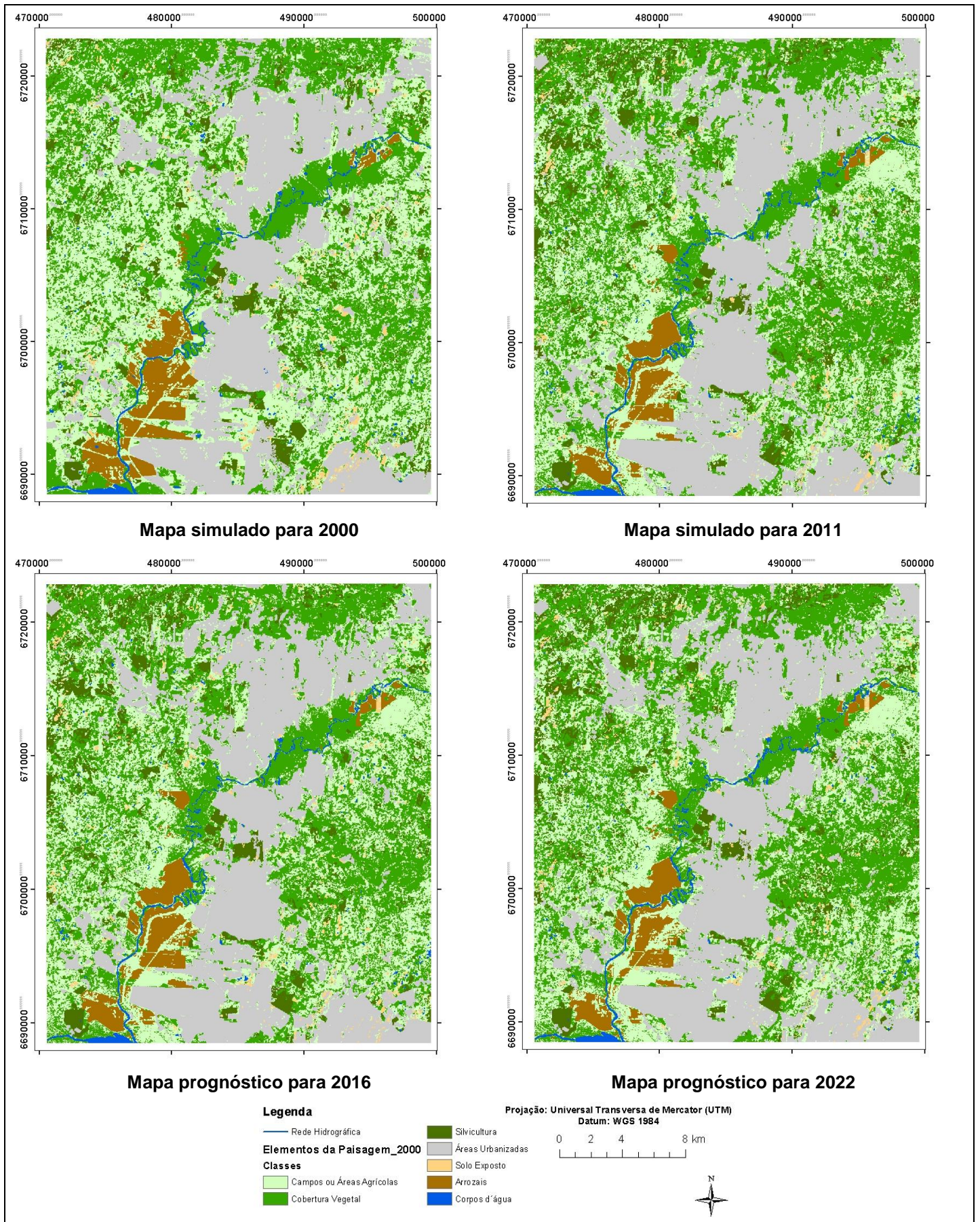


Figura 24 – Mapas de paisagem simulada para 2000 e 2011 e de prognósticos para 2016 e 2022.

A produção de mapas simulados da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos para os anos de 2016 e 2022 permite quantificar as áreas para cada classe, e avaliar os processos de expansão e redução de forma comparativa com os anos de 1990, 2000 e 2011. Com base nos dados das Tabelas 19, 20 e 21 e na Figura 25, pode-se inferir que as manchas das classes de Campos ou Áreas Agrícolas e Arrozaais sofreram retração de área. Isso foi constante durante o período mapeado e simulado (1990 a 2011) e no prognóstico para 2016 e 2022, conferindo assim eficácia da aplicação do método, desconsiderando-se mudanças socioeconômicas que alterem essa tendência.

As classes de Cobertura Vegetal, Silvicultura e Áreas urbanizadas apresentaram expansão da área das manchas durante o período mapeado e simulado (1990 a 2011), e no prognóstico para 2016 e 2022.

As manchas da classe de Cobertura Vegetal, diferentemente das demais citadas, não apresentaram expansão constante durante o período mapeado e simulado (1990 a 2011), e sim uma pequena retração durante o mapeamento e simulação entre 1990 a 2000. Como os prognósticos foram efetuados, a partir dos dados calibrados de 2000 a 2011, os mesmos apresentam eficácia em simular a tendência dos dados de entrada.

As manchas das classes de Solo Exposto e Corpos d'água apresentaram pequena oscilação entre expansão e retração de área durante os períodos mapeados, simulados e de prognósticos (1990 a 2022), não revelando tendências na área de estudo.

Tabela 19 – Área em km² e transição entre 1990 a 2022 por classes.

Classes de elementos da paisagem	1990	2000	2011	2016	2022	Transição entre 1990 a 2022 (km²)
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	393,76	387,32	306,59	286,68	270,25	-123,51
2 - Cobertura Vegetal	266,93	259,79	313,42	323,47	329,49	62,56
3 - Silvicultura	42,88	43,061	54,61	58,51	62,11	19,23
4 - Áreas Urbanizadas	225,66	238,97	261,30	270,26	280,28	54,62
5 - Solo Exposto	13,60	15,40	14,87	14,48	14,11	0,51
6 - Arrozaais	43,47	43,21	37,13	34,44	31,51	-11,96
7 - Corpos d'água	11,96	10,55	10,75	10,84	10,92	-1,04
Total	998,29	998,32	998,69	998,68	998,67	

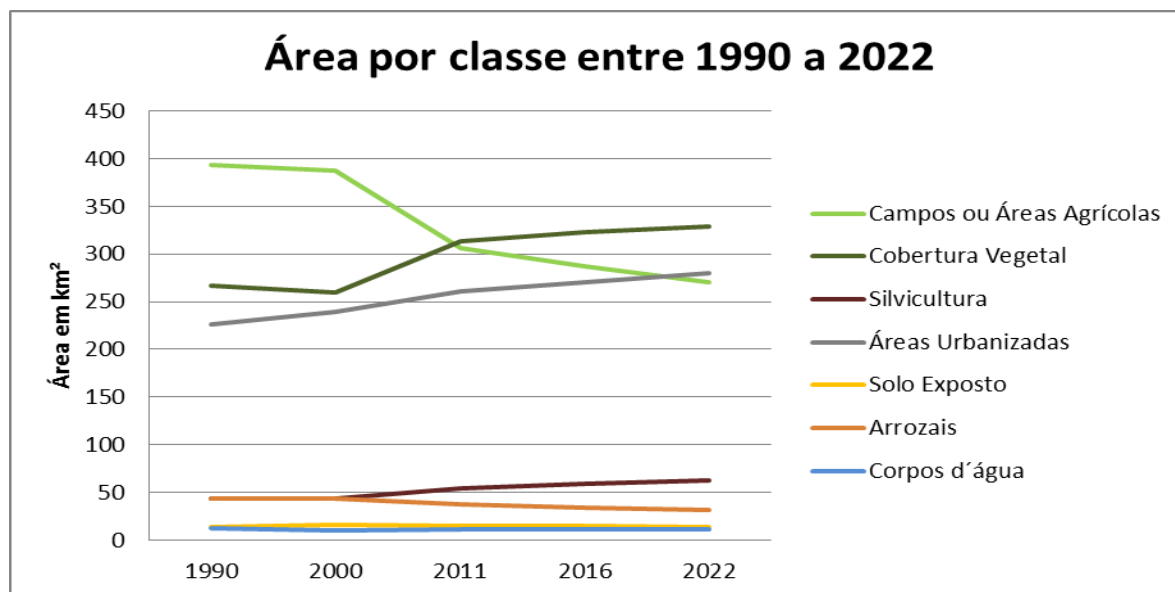


Figura 25 – Variação da área por classe de uso e cobertura do solo entre 1990 a 2022.

Tabela 20 – Matriz de Transição dos elementos da paisagem entre 2011 a 2016.

Transições de passo único (km²)

De/Para	1–Campos ou Áreas Agrícolas	2–Cobertura Vegetal	3–Silvicultura	4–Área Urbanizada	5–Solo Exposto	6–Arrozais	7–Corpos d'água
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	0,000	50,010	4,199	6,275	4,630	0,452	0,417
2 - Cobertura Vegetal	31,816	0,000	10,105	3,893	1,481	0,343	0,776
3 - Silvicultura	2,795	6,087	0,000	0,772	0,927	0,000	0,000
4 - Área Urbanizada	3,232	1,364	0,000	0,000	0,936	0,000	0,000
5 - Solo Exposto	4,074	0,652	0,176	3,506	0,000	0,005	0,004
6 - Arrozais	3,451	0,000	0,000	0,005	0,045	0,000	0,000
7 - Corpos d'água	0,700	0,348	0,000	0,047	0,008	0,005	0,000

Tabela 21 – Matriz de Transição dos elementos da paisagem entre 2011 a 2022.

Transição de passo único (km²)

De/Para	1–Campos ou Áreas Agrícolas	2–Cobertura Vegetal	3–Silvicultura	4–Área Urbanizada	5–Solo Exposto	6–Arrozais	7–Corpos d'água
1 - Campos ou Áreas Agrícolas	0,000	78,138	8,267	13,627	55,048	0,660	0,664
2 - Cobertura Vegetal	47,158	0,000	16,573	8,537	2,447	0,683	1,469
3 - Silvicultura	4,904	9,644	0,000	2,012	1,163	0,000	0,008
4 - Área Urbanizada	5,810	3,002	0,033	0,000	1,337	0,000	0,018
5 - Solo Exposto	4,549	1,571	0,340	4,842	0,000	0,010	0,004
6 - Arrozais	6,868	0,023	0,000	0,067	0,023	0,000	0,000
7 - Corpos d'água	1,270	0,555	0,025	0,095	0,040	0,009	0,000

Os prognósticos simulados para a região do baixo curso do rio dos Sinos de expansão das áreas urbanizadas vêm de encontro com os mapeamentos realizados e com o crescimento populacional urbano também apurado nesse estudo, principalmente na periferia das áreas pré-existentes e nas margens da rede de transporte rodoviário.

Com relação à expansão da área de cobertura vegetal, podemos inferir que essa tendência vem de encontro com o fato de que as áreas de preservação permanente (APP) representaram regeneração da cobertura vegetal nesses últimos 21 anos, devido aos avanços na legislação ambiental, no processo de fiscalização e conscientização da sociedade por parte dos órgãos ambientais competentes, ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL (2013); RIO GRANDE DO SUL (2001). Porém, a grande fragmentação da cobertura vegetal apurada pelo mapeamento nas demais áreas, revelam um caráter de regeneração por abandono dos imóveis rurais, fato que pode estar relacionado ao envelhecimento populacional no campo, aumento de propriedade rurais utilizadas como sítios de lazer e especulação imobiliária relacionada a criação de futuros condomínios fechados suburbanos nas zonas rurais dos municípios.

Esses fatos também estão relacionados a retração da área das classes de Campos ou Áreas Agrícolas e Arrozais, demonstrado pelas matrizes de transição entre períodos de 1990 a 2000, 2000 a 2011, 2011 a 2016 e 2011 a 2022. A transição dessas classes ocorreu principalmente para as classes de Cobertura Vegetal, Áreas Urbanizadas e Silvicultura. A expansão da Silvicultura está relacionada a incorporação de monoculturas de Eucalipto, dentre outras, em áreas rurais tradicionalmente de agricultura familiar, como observado nas atividades de campo inerente a esse estudo.

5. CONCLUSÃO

Com a elaboração de dois modelos estocásticos de simulação espacial de mudanças na paisagem do baixo curso do rio dos Sinos - RS para os períodos de 1990-2000 e 2000-2011 e posterior simulação de cenários prognósticas de uso do solo para os anos de 2016 e 2022, cumpriu-se com o objetivo central desse trabalho.

Como principal resultado, obtivemos mapas simulados para os anos de 2000 e 2011 com similaridades (mínima) entre 36 a 61% e 47 a 74%, respectivamente, quando comparados aos mapas de paisagem produzidos, considerando-se diferentes janelas de resoluções nos testes. Estes percentuais de acertos são considerados satisfatórios para o método empregado, segundo a literatura revisada. Citamos como resultado principal, pois, o mesmo permitiu a geração de cenários simulados futuros a curto (2016) e em médio prazo (2022), com bases nos dados estocados durante o processo de modelagem dinâmica espacial.

O *software* Dinamica EGO utiliza no processo de simulação de cenários futuros, apenas dados de simulação da paisagem de um período efetuado. Sendo assim, utilizamos o período de simulação (2000 a 2011), cuja similaridade com a paisagem observada foi superior a do período anterior. Demonstrando assim, que análises pretéritas de alterações na paisagem, superiores há dez anos, são desnecessárias para o método empregado.

Essa constatação converge com a literatura revisada que, apesar de citar períodos de simulações de vinte até quarenta anos, utilizaram apenas os últimos cinco ou no máximo dez anos de simulação para a geração de cenários prognósticos futuros.

A maior parte dos elementos da paisagem pré-definidos para o processo de modelagem dinâmica espacial da área de estudo, desempenharam de forma satisfatória a função de variável explicativa estática e dinâmica das mudanças na paisagem, aja visto os resultados apurados. Ressaltando-se apenas, a importância de se avaliar a pertinência socioeconômica e ambiental das variáveis explicativas pré-determinadas e a independência espacial das mesmas na dinâmica da paisagem estudada, a fim de, evitar-se o descarte das mesmas durante o processo de modelagem.

A quantificação da área das classes de uso e cobertura do solo, tanto para os mapeamentos, quanto para os modelos simulados para 2016 e 2022, permitiram inferir tendências de mudanças durante o período simulado que se mantiveram nos prognósticos futuros, demonstrando claramente a sua eficácia. Porém, vale ressaltar

novamente que, o método emprego não prevê mudanças nas tendências, dessa forma, o seu acerto dependerá da continuidade do padrão observado.

Esse processo revelou tendências, tais como: A) diminuição da área de campos ou áreas agrícolas e arrozais; B) expansão da área de cobertura vegetal, áreas urbanizadas e silvicultura e; C) inexpressivas alterações de áreas das classes de solo exposto e corpos d'água.

Com relação a essas tendências, cabe-nos ressaltar a expressiva diminuição da área de campos ou áreas agrícolas e aumento da cobertura vegetal no período de 2000 a 2011, simuladas de forma menos intensa nos cenários futuros de 2016 e 2022. As demais classes apresentaram alterações praticamente constantes durante os períodos simulados

Nesse estudo especulou-se sobre as possíveis causas de tais alterações, em função de nossos objetivos específicos. Ressaltando-se assim, a necessidade de estudos complementares na área de estudo, no que se refere: A) as causas socioeconômicas da redução e possível eliminação da cultura do arroz; B) as causas e reflexos socioeconômicos da expansão urbana em detrimento do uso do solo para a agricultura; C) a relação entre a expansão da cobertura vegetal, legislação ambiental/fiscalização e o abandono de áreas tradicionalmente agrícolas; D) as causas e os impactos socioambientais da expansão dos maciços de silvicultura; E) possíveis relações entre a gestão pública dos municípios e as tendências de alterações observadas e simuladas do território.

A plataforma de modelagem dinâmica utilizada se mostrou satisfatório no cumprimento dos objetivos desse trabalho, por comportar uma estrutura aberta e flexível, que atendeu às especificidades da complexidade da área de estudo.

Ressalta-se que, para simulação de paisagens com as características do baixo curso do rio dos Sinos - RS no *software* utilizado seria mais conveniente e eficaz, utilizar uma resolução espacial menor, em torno de 150 a 250 m, a fim de gerar um número menor de *ranges* no arquivo esqueleto que serve como base para os Pesos de Evidência e; generalizar mais as classes de uso e cobertura do solo, a fim de, reduzir o número de cruzamentos entre as classes de uso do solo e as variáveis espaciais explicativas. Reduzindo assim, o tempo e os dados envolvidos no processo, que nesse trabalho praticamente extrapolaram a nossa capacidade de manipular dados fora da plataforma de modelagem e processamento dos microcomputadores empregados.

6. REFERÊNCIAS

AGUIAR, A.P.D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade inter-regional**. 2012. 206 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2006.

ALMEIDA, C.M. de. **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), Brasil**. 2003. 323f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ALMEIDA, C.M.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V.; SOARES-FILHO, B.S.; CERQUEIRA, G.C. **Modelos Celulares de Dinâmicas Espaço-Temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos**. In: MEIRELLES, Margareth S. Penello; CAMARA, Gilberto; ALMEIDA, Cláudia M. de. (Editores técnicos). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília, DF: Embrapa informações tecnológicas, 2007. 593 p.

ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas/atlas.asp?menu=548>>. Acessado em: 07/02/2013.

BACA, J.F.M.; NETTO, A.L.C.; MENZES, P.M.L. **Modelagem da Dinâmica da Paisagem com Processos de Markov**. In: MEIRELLES, Margareth S. Penello; CAMARA, Gilberto; ALMEIDA, Cláudia M. de. (Editores técnicos). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília, DF: Embrapa informações tecnológicas, 2007. 593 p.

BARCELLOS, T.M. **Região Metropolitana de Porto Alegre: Expansão Urbana e Dinâmica Imobiliária nos Anos 90**. In: Indicadores Econômicos FEE, Vol.32, Nº 1 (2004).

BAZZAN, T. **Mapeamento das áreas com risco de inundação do rio dos Sinos no município de São Leopoldo, RS**. 135 f. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: UFRGS/PPGea, 2011.

BENEDETTI, A.C.P. **Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul - 2010**. 166 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2010.

BERTRAND, G. **Paisagem e Geografia Física Global**. Caderno de Ciências da Terra, 13. São Paulo: 1971 27p.

BIODIVERSIDADE RS. Disponível em: <http://www.biodiversidade.rs.gov.br/portal/index.php?acao=secoes_portal&id=26&submenu=14>. Acessado em 19/10/2012.

BRASIL. **Lei nº 4.771 de 15 de Setembro de 1965, que Institui o Novo Código Florestal, Revogada pela Lei nº 12.651 de 2012.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm>. Acessado em 02/11/2013.

CARVALHO, M.V.A.; DI MAIO, A.C. **Proposta para a difusão de dados e informações geoespaciais disponíveis gratuitamente na Internet junto aos graduandos e professores da educação básica.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2009, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. P.3351-3358. DVD, On-line. ISBN 9788517000. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0612.pdf>>. Acesso em: 16/08/2012.

COMITESINOS. Disponível em: <<http://www.comitesinos.com.br>>. Acessado em 23 de Agosto de 2012.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Mapas geológicos estaduais.** Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>. Acessado em: 06/02/2013.

DE BIASI, M. **A carta clinográfica: Os Métodos de Representação e sua Confecção.** Revista do Departamento de Geografia da USP, n.6. São Paulo; 1992, 45-53p. Disponível em: <http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/247>. Acessado em: 10/11-13.

DIAS, L.T. **Modelagem Dinâmica Espacial do Uso e Ocupação do Solo na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá – DF: 1998-2020.** Dissertação (Universidade de Brasília – Instituto de Geociências). Brasília-DF, 2011.

DORNELES, T.F. **Análise da Alteração do Uso do Solo em Bacias. Hidrográficas.** Dissertação disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/>>. Acessado em 12/01/2011. UFRGS, Porto Alegre, 2003.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. **Brasil em Relevo.** Disponível em:<<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>. Acessado em: 06/02/2013.

FERRARI, R. **Modelagem Dinâmica do Uso e Cobertura da Terra da Quarta Colônia, RS.** Dissertação (Universidade Federal de Santa Maria – Programa de Pós-Graduação em Geomática). Santa Maria, RS, 2008.

FIGUEIRÓ, A.S. **Evolução do Conceito de Paisagem: uma breve revisão.** Revista Geo Sul, Vol. 13 nº26, p. 40 a 52, editora UFSC. Florianópolis, 1998.

FORMAN, R.T.T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. New York, John Wiley & Sons, 1986. 619p.

GRIGIO, A.M. **Evolução da paisagem do baixo curso do rio Piranhas-Assú (1988-2024): uso de autômatos celulares em modelo dinâmico espacial para simulação de cenários futuros**. Tese (UFRN – Centro de Ciências Exatas e da Terra). Natal/RN, 2008.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.). **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000**. Porto Alegre, UFRGS-IB-Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).

IBGE. **Levantamento de Recursos Naturais**. Secretaria de Planejamento da Presidência da República. Rio de Janeiro: RJ, 1986, Volume 33. 796p.

_____. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação do IBGE. Diretoria de Geociências – Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Série Manuais Técnicos em Geociências, Número 1. Rio de Janeiro: RJ, 1992, 83p.

_____. Cidades, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=432000>>. Acessado em 11/12/2012.

_____. **Censo Demográfico de 2000 e 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=432000>>. Acessado em 13/12/2012.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acessado 10 de Agosto de 2012.

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

LIMBERGER, L. **Abordagem Sistêmica e Complexidade na Geografia**. Geografia - v. 15, n. 2, jul./dez. 2006. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/geografia>.

LIMA, E.C. **Análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo da bacia do rio dos Sinos/RS**. Trabalho de Graduação, Departamento de Geografia, UFRGS. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/38238>>.

LIMA, C.M.G. **Modelagem de transição florestal na Mata Atlântica**. Dissertação - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2012.

LIMA, T.C.; LIMA C. M.; OLIVEIRA, M. S.; SOAREA-FILHO, B. **Dinamica EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazônia brasileira: análise comparativa.** In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013, INPE. P. 6.379.

MARTINS, É. S. *et al.* **Ecologia de paisagem: conceitos e aplicações potenciais no Brasil.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004, 1^o edição. 35p.

MASSEY, D.B. **Pelo espaço: uma nova política da espacialidade.** Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2009. 312p.

MONTE-MÓR, R.I.M. **A relação urbano-rural no Brasil contemporâneo.** In: RANDOLPH, R.; SOUTHERN, B. (orgs.). Expansão metropolitana e transformação das interfaces entre cidade, campo e região na América Latina. São Paulo: Max Limonad, 2011, p.221-239.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Editora Blucher, 2008.

PORTO, M.L.; MENEGAT, R. **Ecologia de Paisagem: Um Novo Enfoque na Gestão dos Sistemas da Terra e do Homem.** In: Desenvolvimento Sustentável e Gestão Ambiental nas Cidades: Estratégias a Partir de Porto Alegre. Rualdo Menegat e Gerson Almeida *et. al.* (organizadores). Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

PEDROSA, B.M.; CAMARA, G. **Modelagem Dinâmica e Sistemas de Informações Geográficas.** In: MEIRELLES, Margareth S. Penello; CAMARA, Gilberto; ALMEIDA, Cláudia M. de. (Editores técnicos). **Geomática: modelos e aplicações ambientais.** Brasília, DF: Embrapa informações tecnológicas, 2007. 593 p.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado, Secretaria do Meio Ambiente. **Inventário Florestal Contínuo.** Disponível em: <<http://coralx.ufsm.br/ifcrs/index.php>>. Acesso em: 12/02/2014. 2010.

RODRIGUES, H.O.; SOARES-FILHO, B.S.; COSTA, W.L.S. **Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. P. 3089-3096.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto.** UFU. 7 ed. Uberlândia, 2009, Brasil.

ROSSETTI, L.A.F.G.; ALMEIDA, C.M.; PINTO, S.A.F. **Modelagem dinâmica de mudanças no uso da terra da cidade de Rio Claro, SP.** In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011, INPE. P. 6.703.

SANTOS, M. **Por uma Geografia Nova: Da Crítica da Geografia a uma Geografia Crítica**. 6ª edição, São Paulo: Edusp, 2004.

_____. **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção**. 4ª edição – São Paulo: Editora Edusp, 2006.

SOARES-FILHO, B.S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/csr/publicacoes/tese/tese.html>>, acessado em 20/04/2012.

_____. **Análise de Paisagem: Fragmentação e Mudanças**. 1998b. 88f. Departamento de Cartografia, Centro de Sensoriamento Remoto – Instituto de Geociências – UFMG, Belo Horizonte.

_____. 2013. **Dinamica project**. Disponível em <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>> Acesso em 3 Janeiro de 2013.

SOARES-FILHO B.S.; CERQUEIRA G.C.; ARAUJO, W.L.; VOLL E. **Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular**. In: Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais. Albernaz A.L., Silva J.M.C. da, Valeriano, D.(editores) Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003. P.1-16. Acessado em: 06/01/2012. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>>.

SOARES-FILHO, B.S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W.L. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinâmica EGO**. Tradução: Letícia Santos de Lima. Centro de Sensoriamento Remoto/UFMG. Belo Horizonte: MG, 2009. Acessado em: 05/01/2012. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>>.

SUERTEGARAY, D.M.A.; GUASSELLI, L.A. **Paisagens (imagens e representações) do Rio Grande do Sul**. In: Rio Grande do Sul Paisagens e Territórios em Transformação. VERSUM, Roberto; BASSO, Luis A.; SUERTEGARAY, Maria A. (organizadores). Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2ªEd., 2012.

SUERTEGARAY, D.M.A.; MOURA, N.S.V. **Morfogênese do relevo do Estado do Rio Grande do Sul**. In: Rio Grande do Sul Paisagens e Territórios em Transformação. VERSUM, Roberto; BASSO, Luis A.; SUERTEGARAY, Maria A. (organizadores). Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2ªEd., 2012.

TABACOW, J.W.; SILVA, J.X.S. **Geoprocessamento Aplicado à Análise da Fragmentação da Paisagem na Ilha de Santa Catarina (SC)**. In: SILVA, J.X.; ZAIDAN, R.T. (Org.). Geoprocessamento & Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 328p.

TRENTIN, G.; FREITAS, M.I.C. **Modelagem da Dinâmica espacial urbana: modelo autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP**. Revista Brasileira de Cartografia nº 62, edição especial 01, 2010.

TRICART, J. **El Análises de Sistemas y El Estudio Integrado Del Médio Natural**. In: MENDOZA, J. G.; JIMÉNEZ, J.M. e CANTERO, N. O. **El Pensamiento Geográfico: Estúdio Interpretativo y antologia de textos (De Humboldt a las tendencias radicales)**. Segunda ed. Alianza Editorial. Madrid, 1988.

TURNER, M.G. **Spatial simulation of landscape changes in Georgia: A comparison of 3 transition models**. Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, GA 30602, USA. In: Landscape Ecology vol. 1, p. 29-36, (1987). Disponível em: <<http://www.springerlink.com>>. Acessado em 09/08/2012.

VERDUM, R. **Perceber e Conceber Paisagem**. In: Paisagem: leituras, significados e transformações. VERDUM, R. *et. al.* (organizadores). Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012.

VERDUM, R.; FONTOURA, L.F.M. **Temáticas Rurais: do Local ao Regional**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil - UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica - Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. - Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

VICENTE, L. E.; PEREZ FILHO, A. **Abordagem Sistêmica e Geografia**. Revista Geografia, Rio Claro-SP, v.28, nº 03, 323-344p., 2003.