



Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
**Centro de Tecnologia e Ciência**  
**Faculdade de Engenharia**

Luis Iván Ortiz Valencia

**Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do  
uso do solo**

Rio de Janeiro

2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/CTC/B

V152 Valencia, Luis Iván Ortiz.  
Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo. / Luis Iván Ortiz Valencia. – 2008.  
104f.

Orientador: Margareth Simões Penello Meirelles.  
Co-orientador: Lucieta Guerreiro Martorano.  
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Solo – Uso. 2. Solo – Mudanças. I. Meirelles, Margareth Simões Penello. II. Martorano, Lucieta Guerreiro. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 332.3

Luis Iván Ortiz Valencia

**Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo**

Dissertação submetida ao corpo docente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Computação.

Aprovado em: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Margareth Simões Penello Meirelles, D.Sc. UERJ.

\_\_\_\_\_  
Lucieta Guerreiro Martorano, D.Sc. Embrapa Solos

\_\_\_\_\_  
Roberto de Andrade Medronho, D.Sc. UFRJ.

\_\_\_\_\_  
Oswaldo Luiz Humbert Fonseca, D.Sc. BNDES

Rio de Janeiro

2008

## **DEDICATÓRIA**

A minha esposa Letícia com muito amor.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa Letícia, por sua compreensão e amor em todos os momentos.

Aos meus pais, Alejandro e Luz Marina, pelo amor e apoio sempre presente.

As minhas orientadoras Margareth e Lucieta, pela grande amizade, confiança e valiosas orientações compartilhadas.

Agradeço aos meus professores do curso da Geomática (UERJ), turma 2006, pela amizade e os ensinamentos compartilhados.

Aos meus colegas do Curso de Mestrado em Geomática (UERJ) pelo companheirismo e a amizade. Especialmente, a Leila Sheila e Mônica.

À FAPERJ pela ajuda financeira.

A Embrapa Solos pela oportunidade de participar de projetos de pesquisas.

VALENCIA, Luis Iván Ortiz. Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo, 2008. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

O atual nível das mudanças uso do solo causa impactos nas mudanças ambientais globais. Os processos de mudanças do uso e cobertura do solo são processos complexos e não acontecem ao acaso sobre uma região. Geralmente estas mudanças são determinadas localmente, regionalmente ou globalmente por fatores geográficos, ambientais, sociais, econômicos e políticos interagindo em diversas escalas temporais e espaciais. Parte desta complexidade é capturada por modelos de simulação de mudanças do uso e cobertura do solo. Uma etapa do processo de simulação do modelo CLUE-S é a quantificação da influência local dos impulsores de mudança sobre a probabilidade de ocorrência de uma classe de uso do solo. Esta influência local é obtida ajustando um modelo de regressão logística. Um modelo de regressão espacial é proposto como alternativa para selecionar os impulsores de mudanças. Este modelo incorpora a informação da vizinhança espacial existente nos dados que não é considerada na regressão logística. Baseado em um cenário de tendência linear para a demanda agregada do uso do solo, simulações da mudança do uso do solo para a microbacia do Coxim, Mato Grosso do Sul, foram geradas, comparadas e analisadas usando o modelo CLUE-S sob os enfoques da regressão logística e espacial para o período de 2001 a 2011. Ambos os enfoques apresentaram simulações com muito boa concordância, medidas de acurácia global e Kappa altos, com o uso do solo para o ano de referência de 2004. A diferença entre os enfoques foi observada na distribuição espacial da simulação do uso do solo para o ano 2011, sendo o enfoque da regressão espacial que teve a simulação com menor discrepância com a demanda do uso do solo para esse ano.

Palavras chave: Modelos de mudança do uso e cobertura do solo. CLUE-S. regressão logística. regressão espacial com defasagem. simulação.

## ABSTRACT

Present state of land use changes impacts global environmental changes. Land use and cover changes are complex processes and do not occur at random pattern in an area. In general, they are determined locally, regionally and globally by geographic, environmental, social, economic and political factors interacting at diverse temporal and spatial scales. Part of this complexity can be modeled by land use and cover change simulation models. An important step of simulation process in CLUE-S model is local influence of driving forces over the occurrence of a land use type. This influence is obtained by logistic regression model. A spatial lag regression model is proposed to select driving forces. This model incorporates spatial neighborhood information which is ignored by logistic regression. Based on a lineal trend scenario of land use demand, simulations of land use changes for Coxim microbasin, Mato Grosso do Sul, were generated, analyzed and compared using CLUE-S model under logistic and spatial regression approaches. The period of simulations was 2001-2011. Both approaches revealed elevated concordance, high global accuracy and Kappa index, to land use for 2004 reference year. Differences were observed for spatial distribution for land use simulations for 2011. Spatial lag regression simulation for 2011 reached less discrepancy to land use demand for that year.

Key-words: Land use and cover change models. CLUE-S. logistic regression. spatial lag regression model. simulation.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CLUE - Conversion of Land Use and its Effects

CLUE-S - Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent

LUCC - Land Use and Cover Change

ONU - Organização das Nações Unidas

SIG - Sistema de Informação Geográfica

AIA - American Institute for Global Change Research

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

UTM - Universal Transverse Mercator

PC - Plano celular

ROC - Receiver Operating Characteristic

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Relações entre o uso e a cobertura do solo. . . . .	9
Tabela 2 -	Arquivos utilizados na simulação no CLUE-S. . . . .	34
Tabela 3 -	Descrição do arquivo principal de parâmetros main.1. . . . .	35
Tabela 4 -	Estrutura do arquivo de resultados da regressão. . . . .	37
Tabela 5 -	Planos de informações (P.I.) utilizados da BAT. . . . .	47
Tabela 6 -	Classes de declividade. . . . .	49
Tabela 7 -	Planos celulares calculados para a BAT. . . . .	51
Tabela 8 -	Número de células por classe de uso do solo para o período 2001-2004, microbacia de Coxim. . . . .	54
Tabela 9 -	Número de células para cada classe do uso de solo para o período 2001-2004 reclassificado, microbacia de Coxim. . . . .	55
Tabela 10 -	Cenário da demanda agregada para a classe do uso do solo em hectares. Período 2001 – 2010, microbacia de Coxim. . . . .	56
Tabela 11 -	Estatísticas descritivas dos impulsores de mudanças para a microbacia de Coxim. . . . .	57
Tabela 12 -	Modelo ajustado de regressão logística para a classe Agricultura. . . . .	62
Tabela 13 -	Classificação do modelo ajustado de regressão logística para a classe Agricultura. . . . .	62
Tabela 14 -	Modelo ajustado de regressão logística para a classe Pastagem. . . . .	62
Tabela 15 -	Classificação do modelo ajustado de regressão logística para a classe Pastagem. . . . .	63
Tabela 16 -	Modelo ajustado de regressão logística para a classe Cerrado. . . . .	63
Tabela 17 -	Classificação do modelo ajustado de regressão logística para a classe Cerrado. . . . .	63
Tabela 18 -	Modelo ajustado de regressão da regressão espacial com defasagem para a classe Agricultura. . . . .	65
Tabela 19 -	Modelo ajustado de regressão da regressão espacial com defasagem para a classe Pastagem. . . . .	65
Tabela 20 -	Modelo ajustado de regressão da regressão espacial com defasagem para a classe Cerrado. . . . .	65
Tabela 21 -	Códigos das classes de uso do solo. . . . .	70
Tabela 22 -	Lista de arquivos de impulsores de mudanças. . . . .	70
Tabela 23 -	Comparação da simulação CLUE-S usando a regressão logística com respeito ao ano de referência 2004. . . . .	72
Tabela 24 -	Comparação da simulação gerada pelo CLUE-S usando a regressão espacial com respeito ao ano de referência 2004 . . . . .	72

Tabela 25 - Número de células para as classes de uso do solo obtido da simulação CLUE-S .....	73
---	----

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais mudanças ambientais globais geradas por pressão antrópica Adaptado de Vitousek <i>et al.</i> , (1997). . . . .	1
Figura 2 - Relações no sistema homem-ambiente. Adaptado de ONU, (2005b). . . . .	8
Figura 3 - Registro das mudanças do uso do solo para América Latina. Adaptado de Briassoulis, (2000). . . . .	11
Figura 4 - Relações entre impulsores de mudanças e o uso e cobertura do solo. Adaptado de Briassoulis, (2000). . . . .	12
Figura 5 - Cenários do preço mundial do petróleo para o período 2006-2025. Adaptado de Kuhlman, (2008). . . . .	13
Figura 6 - Configuração de dados espaciais. Adaptado de Rohuani e Myers, (1990). . . . .	14
Figura 7 - Configuração de dados temporais. Adaptado de Rohuani e Myers, (1990). . . . .	15
Figura 8 - Domínio espaço-temporal da análise espacial. . . . .	16
Figura 9 - Discretização da área de estudo no plano celular. . . . .	18
Figura 10 - Escala espacial de aplicação do modelo CLUE-S. Adaptado de Verburg <i>et al.</i> , (2002). . . . .	19
Figura 11 - Estrutura do modelo CLUE-S. . . . .	20
Figura 12 - Exemplo de seqüências de transições das mudanças do uso do solo. Adaptado de Verburg (2008). . . . .	22
Figura 13 - Exemplo de uma matriz de transição entre classes de uso do solo. . . . .	22
Figura 14 - Parâmetros usados no modelo CLUE-S. Adaptado de Verburg <i>et al.</i> (2002). . . . .	23
Figura 15 - Processo de alocação espacial do CLUE-S. Adaptado de Verburg (2008). . . . .	25
Figura 16 - Enfoque do modelo de regressão logística no CLUE-S. . . . .	26
Figura 17 - Modelos estatísticos espaciais. . . . .	28
Figura 18 - Exemplos de padrões de correlação espacial: (a) autocorrelação positiva (b) aleatório (c) autocorrelação negativa. Adaptado de Overmars, (2003). . . . .	29
Figura 19 - Fases preliminares da regressão espacial. . . . .	29
Figura 20 - Métodos para definir vizinhos: Contigüidade (a) e Distância (b). . . . .	30
Figura 21 - Enfoque da regressão espacial. . . . .	31
Figura 22 - Preenchimento do plano celular. . . . .	32
Figura 23 - Interface principal do Dyna-CLUE. . . . .	34
Figura 24 - Exemplo de matriz de conversão. . . . .	38
Figura 25 - Exemplos de áreas com restrição espacial. Adaptado de Verburg (2008). . . . .	39
Figura 26 - Exemplo de cenário de demanda agregada do uso do solo. Adaptado de Verburg (2008). . . . .	39
Figura 27 - Fluxograma da metodologia. . . . .	41
Figura 28 - Interface do módulo Preenchimento Celular. . . . .	42

Figura 29 - Interface principal do programa R. ....	42
Figura 30 - Interface do programa GEODA. ....	43
Figura 31 - Site do CLUE-S. Acessado em 10/08/2008. ....	44
Figura 32 - Relações entre os programas usados na metodologia. ....	44
Figura 33 - Localização da Bacia do Alto Taquari (BAT), MS. ....	45
Figura 34 - Microbacias hidrográficas que compõem a BAT. ....	46
Figura 35 - Classificação do uso do solo para os anos 2001, 2002, 2003 e 2004 para a BAT. ....	48
Figura 36 - Classes de declividade e altitude para a BAT. ....	49
Figura 37 - Redes hidrográficas para a BAT. ....	49
Figura 38 - Centros urbanos ligados a BAT. ....	50
Figura 39 - Rede rodoviária para a BAT. ....	50
Figura 40 - Plano celular com células de 500m x 500m para a BAT. ....	51
Figura 41 - Planos celulares da distancia mínima a rio duplo e simples. ....	52
Figura 42 - Planos celulares da distância mínima para os centros urbanos e as rodoviárias. ....	52
Figura 43 - Plano celular para as classes de declividade do uso do solo. ....	53
Figura 44 - Planos celulares para a precipitação pluvial, trimestre mais e menos chuvosa e média anual. ....	53
Figura 45 - Planos celulares topotêrmico máximo, médio e mínimo para a BAT. ....	54
Figura 46 - Classificação do uso do solo para a microbacia do Coxim, anos 2001 e 2004. ....	55
Figura 47 - Cenário da demanda agregada para as classes do uso do solo para o período 2001 - 2011, microbacia de Coxim. ....	56
Figura 48 - Histogramas da distância mínima a centro urbano e a rodovia, microbacia de Coxim. ....	57
Figura 49 - Histogramas da distância mínima a rio duplo e a rio simples, microbacia de Coxim. ....	57
Figura 50 - Histograma da altitude da área de estudo, microbacia de Coxim. ....	58
Figura 51 - Histogramas da variável topotêrmico mínima e máxima, microbacia de Coxim. ....	58
Figura 52 - Histogramas da precipitação mínima e máxima, microbacia de Coxim. ....	58
Figura 53 - Distribuição espacial do logaritmo da distancia mínima a centro urbano e rodovia, microbacia do Coxim. ....	59
Figura 54 - Distribuição espacial do logaritmo da distancia mínima a rio simples e duplo, microbacia do Coxim. ....	59
Figura 55 - Distribuição espacial do logaritmo da altitude, microbacia do Coxim. ....	60
Figura 56 - Distribuição espacial do logaritmo topotêrmico mínima e máxima, microbacia do Coxim. ....	60

Figura 57 - Distribuição espacial do logaritmo da precipitação mínima e máxima, microbacia do Coxim. ....	61
Figura 58 - Curva ROC para o modelo ajustado da regressão logística para a classe Agricultura. ....	62
Figura 59 - Curva ROC para o modelo ajustado da regressão logística para a classe Cerrado. ....	63
Figura 60 - Curva ROC para o modelo ajustado da regressão logística para a classe Cerrado. ....	64
Figura 61 - Matriz de vizinhança estimada usando método de contigüidade ....	64
Figura 62 - Restrição espacial para a mecanização da cana de açúcar, microbacia de Coxim. ....	66
Figura 63 - Arquivos de parâmetros principais, main.1, microbacia do Coxim. ....	67
Figura 64 - Arquivo de parâmetros da regressão logística, microbacia de Coxim. ....	68
Figura 65 - Arquivo de parâmetros da saída da regressão espacial, microbacia de Coxim. ....	68
Figura 66 - Arquivo da demanda agregada do uso do solo, microbacia do Coxim. ....	68
Figura 67 - Arquivo da matriz de conversão entre as classes de uso do solo, microbacia do Coxim. ....	69
Figura 68 - Probabilidade para a classe de uso do solo agricultura usando o modelo de regressão logística, microbacia do Coxim. ....	69
Figura 69 - Probabilidade para a classe de uso do solo pastagem usando o modelo de regressão logística, microbacia do Coxim. ....	70
Figura 70 - Probabilidade para a classe de uso do solo cerrado usando o modelo de regressão logística, microbacia do Coxim. ....	70
Figura 71 - Probabilidade para a classe de uso do solo agricultura do modelo de regressão espacial, microbacia do Coxim. ....	71
Figura 72 - Probabilidade para a classe de uso do solo pastagem do modelo de regressão espacial, microbacia do Coxim. ....	71
Figura 73 - Probabilidade para a classe de uso do solo cerrado do modelo de regressão espacial, microbacia do Coxim. ....	72
Figura 74 - Uso do solo para o ano 2001 e simulação do CLUE-S usando regressão logística para o ano 2002, microbacia do Coxim. ....	72
Figura 75 - Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2003 e 2004, microbacia do Coxim. ....	73
Figura 76 - Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2005 e 2006, microbacia do Coxim. ....	73
Figura 77 - Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2007 e 2008, microbacia do Coxim. ....	74
Figura 78 - Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2009 e 2010, microbacia do Coxim. ....	74

Figura 79 - Simulação do CLUE-S usando regressão logística para o ano 2011, microbacia do Coxim. ....	75
Figura 80 - Uso do solo para o ano 2001 e simulação do CLUE-S usando regressão espacial para o ano 2002, microbacia do Coxim. ....	75
Figura 81 - Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2003 e 2004, microbacia do Coxim.. ....	76
Figura 82 - Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2005 e 2006, microbacia do Coxim. ....	76
Figura 83 - Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2007 e 2008, microbacia do Coxim. ....	77
Figura 84 - Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2009 e 2010, microbacia do Coxim. ....	77
Figura 85 - Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para o ano 2011, microbacia do Coxim. ....	78
Figura 86 - Comparação da distribuição espacial das simulações CLUE-S utilizando o enfoque da regressão logística e regressão espacial para o ano 2011. ....	79

## SUMÁRIO

### INTRODUÇÃO

Motivação. ....	1
Objetivos. ....	4
Hipótese. ....	4
Projetos relacionados. ....	5
Organização. ....	6

### 1 MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DO SOLO

1.1 Contexto geral. ....	7
1.2 Caracterização das mudanças do uso e cobertura do solo. ....	9
1.3 Impulsores de mudanças do uso e cobertura do solo. ....	11
1.4 Cenários. ....	12
1.5 Conceitualização dos modelos de simulação das mudanças do uso e cobertura do solo. ....	14

### 2 MODELO CLUE-S

2.1 Introdução. ....	18
2.2 Estrutura do modelo CLUE-S. ....	20
2.3 Simulação no CLUE-S. ....	21
2.4 Processo de alocação espacial. ....	24

### 3 ENFOQUE DA REGRESSÃO ESPACIAL

3.1 Introdução. ....	26
3.2 Enfoque da regressão espacial. ....	28

### 4 METODOLOGIA

4.1 Descrição da metodologia. ....	32
4.2 Programas. ....	41

### 5 ESTUDO DE CASO

5.1 Descrição do estudo de caso. ....	45
5.2 Resultados. ....	46

### 6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros. ....	81
--	----

REFERÊNCIAS. ....	83
-------------------	----

APÊNDICE. Programas usados no R. ....	87
---------------------------------------	----

## INTRODUÇÃO

### Motivação

Desde a antiguidade, a Humanidade tem usado e modificado o solo para seu próprio benefício e sustentação. Através de atividades agrícolas, industriais, agropecuárias, urbanização, mineração, recreação, entre outras, o solo tem sido ocupado e modificado satisfazendo as principais necessidades das populações humanas, porém, transformando a cobertura do solo e deteriorando os ecossistemas.

O crescimento populacional e o aumento da demanda por alimentos e recursos energéticos são reconhecidos impulsores dos elevados patamares das atuais taxas, intensidades e extensões da mudança do uso e cobertura do solo. Esta mudança é considerada como uma das mais importantes alterações ambientais causadas por atividades humanas com efeitos diretos sobre as mudanças climáticas globais e perda de diversidade biológica. A Figura 1 apresenta as principais mudanças ambientais globais geradas por atividade antrópica, Vitousek *et al.* (1997).

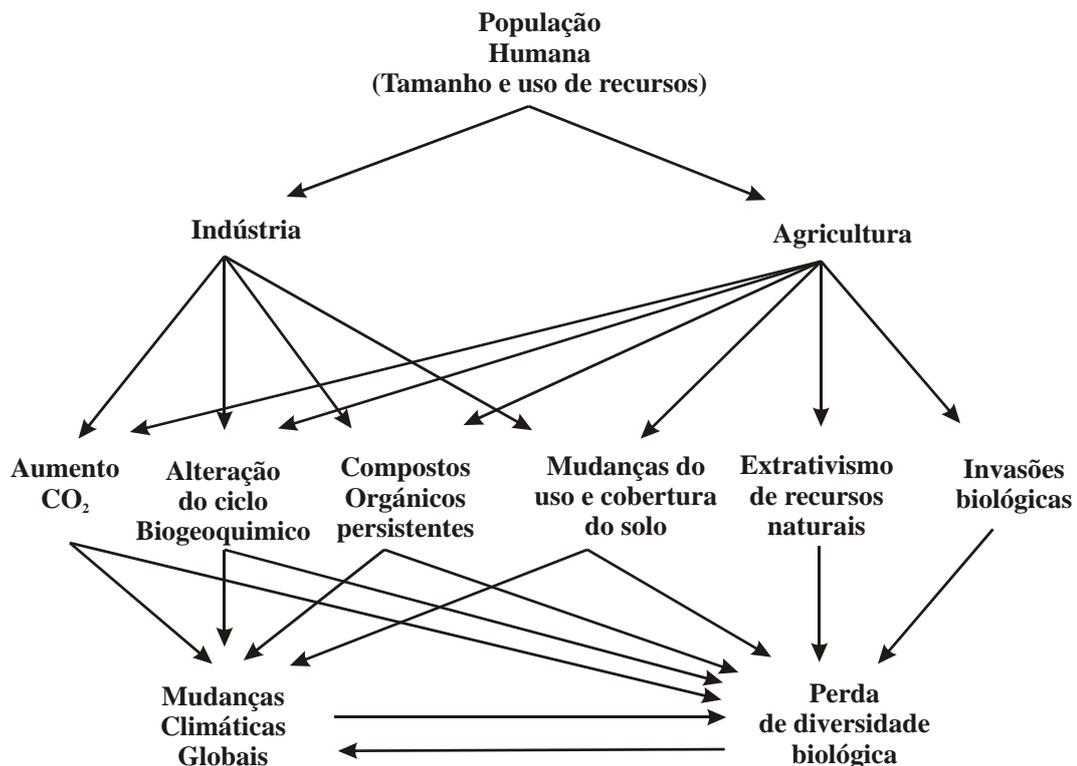


Figura 1. Principais mudanças ambientais globais geradas por pressão antrópica. Adaptado de Vitousek *et al.*, (1997).

Globalmente, cerca de 1,2 milhões de km<sup>2</sup> de florestas e 5,6 milhões km<sup>2</sup> de pastagens foram convertidas a outros tipos de uso do solo, nos últimos trezentos anos. No mesmo período, as áreas de cultivo têm aumentado em 12 milhões de km<sup>2</sup>, Ramankutty e Foley (1999). Segundo Vitousek *et al.* (1997), grande parte das mudanças do uso do solo corresponde a áreas dedicadas a agricultura, áreas urbanas, indústria e agropecuária.

Com a finalidade de diminuir os impactos e alterações ambientais, vários programas e projetos foram desenvolvidos com abrangência global, por exemplo, a Agenda 21, ONU, (2005a). A Agenda 21 é um dos principais documentos da conferência Eco92, ocorrida no Rio de Janeiro, Brasil, em 1992. Este documento estabelece um plano de ações a serem tomadas no nível global, nacional, regional e local por governos, organizações, empresas e todos os setores da sociedade no estudo de soluções para os problemas socioambientais.

Esta dissertação trata sobre a modelagem dinâmica das mudanças do uso e cobertura do solo, Lesschen *et al.* (2005), Veldkamp e Lambin, (2001). A finalidade desta modelagem é gerar simulações de cenários alternativos do uso do solo para um futuro próximo. Estas simulações configuram importante fonte de informação para auxiliar a gestão ambiental e planejar do uso do solo, portanto, subsidiar as políticas públicas.

A modelagem dinâmica se fundamenta em métodos matemáticos, estatísticos e computacionais com o intuito de modelar a evolução temporal de processos espaciais, Pedrosa e Camara (2007). Atualmente, esta é uma área de grande desenvolvimento na Geomática, tendo em vista as novas capacidades de análises que podem ser adicionadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Meirelles *et al.* (2007). A análise espacial no ambiente SIG é espacialmente estática, isto é, as operações e análises são essencialmente espaciais ou não consideram a componente temporal dos processos. Estes conceitos e outros elementos da modelagem das mudanças do uso e cobertura do solo são introduzidos no Capítulo 2.

Um dos modelos de mudança do uso e cobertura do solo em destaque atualmente é o Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent ou CLUE-S (VERBURG *et al.*, 2002). Este modelo tem sido aplicado em escalas continentais, regionais e locais. O enfoque atual do CLUE-S utiliza a regressão logística binária para quantificar ao nível da unidade espacial do estudo a influência dos impulsores de mudanças, sobre a probabilidade de ocorrência de cada classe de uso do solo. Este enfoque não considera a autocorrelação *espacial* presente nos processos espaciais das mudanças do uso do solo. Por exemplo, as

percentagens de desmatamento e de queimadas se distribuem de acordo com padrões, influenciados por condicionantes locais em uma determinada área, gerando focos de queimadas ou desmatamento.

Visando trazer uma alternativa para a solução deste problema, nesta dissertação será estabelecida uma comparação entre dois enfoques: uso da regressão logística e uso da regressão espacial para a modelagem da dinâmica do uso do solo. Desta forma, pretende-se avaliar a melhor representatividade da influência dos impulsores de mudanças locais sobre a probabilidade da ocorrência de uma classe de uso do solo.

Para tanto, serão avaliadas as mudanças do uso do solo na microbacia do Coxim, pertencente à Bacia do Alto Taquari, Mato Grosso do Sul. Através da geração de simulações anuais da mudança de uso para o período 2001-2011, considerando-se um conjunto de impulsores de mudanças e um cenário de tendência obtido através das análises de imagens multitemporais de satélite.

## **Objetivos**

### **• Objetivo Geral**

Desenvolver uma metodologia para aprimorar a aplicação do modelo CLUE-S considerando um enfoque que empregue a dependência espacial dos processos envolvidos nas mudanças do uso e cobertura do solo.

### **• Objetivos Específicos**

- a) Revisar e avaliar conceitos e pressupostos dos modelos de mudança do uso e cobertura do solo, com destaque aos modelos de simulação dinâmica, com maior enfoque ao modelo CLUE-S.
- b) Aplicar o modelo CLUE-S na bacia do Coxim, Mato Grosso do Sul, procurando desenvolver uma metodologia que permita modelar a dinâmica da mudança do uso e cobertura do solo em outras regiões.
- c) Realizar uma comparação dos resultados e desempenho do CLUE-S usando a regressão logística e a regressão espacial.

## **Hipótese**

“A inserção da correlação espacial na simulação dinâmica das mudanças de uso do solo nos modelos CLUE-S geram simulações mais realísticas às condições observadas a campo na Bacia do Coxim”.

## Projetos relacionados

O desenvolvimento desta dissertação está inserido nos seguintes projetos de pesquisa:

- a) **“Sustainability Impact Assessment: Tools for Environmental, Social and Economic Effects of Multifunctional Land Use in European Regions - EXTENSION”**. Denominado de SENSOR EXTENSION ou SENSOR Targeted Third Countries (TTC), (<http://www.sensor-ip.org>). O projeto SENSOR EXTENSION ou TTC busca a cooperação internacional para adaptar o modelo Europeu de avaliação do impacto da sustentabilidade com respeito às mudanças do uso do solo (HELMING *et al.* 2008). A denominação deste sistema em inglês é Sustainability Impact Assessment Tools ou SIAT. Atualmente, China, Brasil, Argentina e Uruguai participam do SENSOR TTC onde existe grande dinamismo da mudança do uso e cobertura solo.
- b) **“Land use change in the Rio de la Plata Basin: Linking biophysical and human factors to predict trends, assess impacts, and support viable strategies for the future”** (<http://platabasin.unsl.edu.ar>). Este projeto é auspiciado pela Inter-American Institute for Global Change Research, AIA (<http://www.iai.int/>). Este projeto visa estudar a problemática das mudanças do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio de La Plata. O projeto é desenvolvido por pesquisadores brasileiros em conjunto com parceiros da Argentina, Uruguai e Paraguai e possui os seguintes objetivos:
- Caracterizar padrões e impulsores de mudanças do uso do solo.
  - Avaliar as conseqüências das mudanças do uso do solo.
  - Explorar processos de retro-alimentação das mudanças do uso do solo e cenários plausíveis.
  - Vincular interesses de mercado e ambientais para o planejamento do uso do solo.

## **Organização**

A presente dissertação está dividida em sete capítulos:

- O Capítulo 1 aborda os principais conceitos sobre as mudanças do uso e cobertura do solo. A importância da escala, o uso de cenários, a determinação de impulsores de mudanças e enfoques de modelos de simulação dinâmica do uso e cobertura do solo são apresentados neste capítulo.
- O Capítulo 2 apresenta o enfoque do modelo de mudanças do uso e cobertura do solo CLUE-S. Este capítulo descreve a formulação, estrutura e funcionamento deste enfoque.
- O Capítulo 3 introduz a abordagem da regressão espacial.
- O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta nesta dissertação.
- O Capítulo 5 especifica o estudo de caso e fornece os resultados das análises e simulações.
- O Capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais da dissertação.

# 1 MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DO SOLO

## 1.1 Contexto geral

Nesta seção descreve-se o contexto do qual fazem parte as mudanças do uso e cobertura do solo no sistema homem-ambiente. Esta descrição fornece as bases para a modelagem das mudanças do uso e cobertura do solo.

As relações entre os ecossistemas e os sistemas humanos sempre existiram. Desde o ponto de vista sistêmico, estas relações envolvem três elementos: o bem-estar humano, os impulsores de mudanças e os serviços ecossistêmicos. De acordo com a Avaliação do Milênio dos Ecossistemas, ONU (2005b), descrevem-se estes elementos:

- a) O bem-estar humano se consegue com a obtenção de bens materiais suficientes, liberdade de escolha e ação, boa saúde, boas relações sociais, liberdade e segurança.
- b) Os impulsores de mudanças são os que alteram algum aspecto dos ecossistemas. Estes podem ser diretos ou indiretos. Um impulsor direto modifica alguma parte de um processo do ecossistema e pode ser mensurado. As mudanças do uso e cobertura do solo são impulsores diretos de mudanças dos serviços dos ecossistemas. Um impulsor indireto atua mais difusamente podendo alterar alguns impulsores diretos. Por exemplo, fatores demográficos (crescimento e migração populacional), econômicos (aumento do preço do petróleo) e sociopolíticos (leis ambientais).
- c) Os serviços ecossistêmicos são os benefícios que as pessoas recebem dos ecossistemas. Estes serviços podem ser agrupados nas seguintes categorias:
  - **Abastecimento.** Corresponde aos produtos obtidos dos ecossistemas tais como água doce, alimentos e fibras, combustível, recursos genéticos, entre outros.
  - **Regulação.** Referem-se aos benefícios obtidos da regulação dos processos atuantes nos ecossistemas: regulação do clima, regulação da água, regulação das enfermidades, polinização, entre outros.
  - **Culturais.** Trata-se de serviços intangíveis que se obtêm dos ecossistemas. Por exemplo: recreação e ecoturismo, relações sociais entre comunidades, diversidade cultural, entre outros.
  - **Apoio.** Correspondem aos serviços necessários para a produção dos outros serviços dos ecossistemas. Seus impactos são indiretos e acontecem em um longo período. Por

exemplo, ciclo hidrológico, formação do solo, produção de oxigênio (fotossínteses), entre outros.

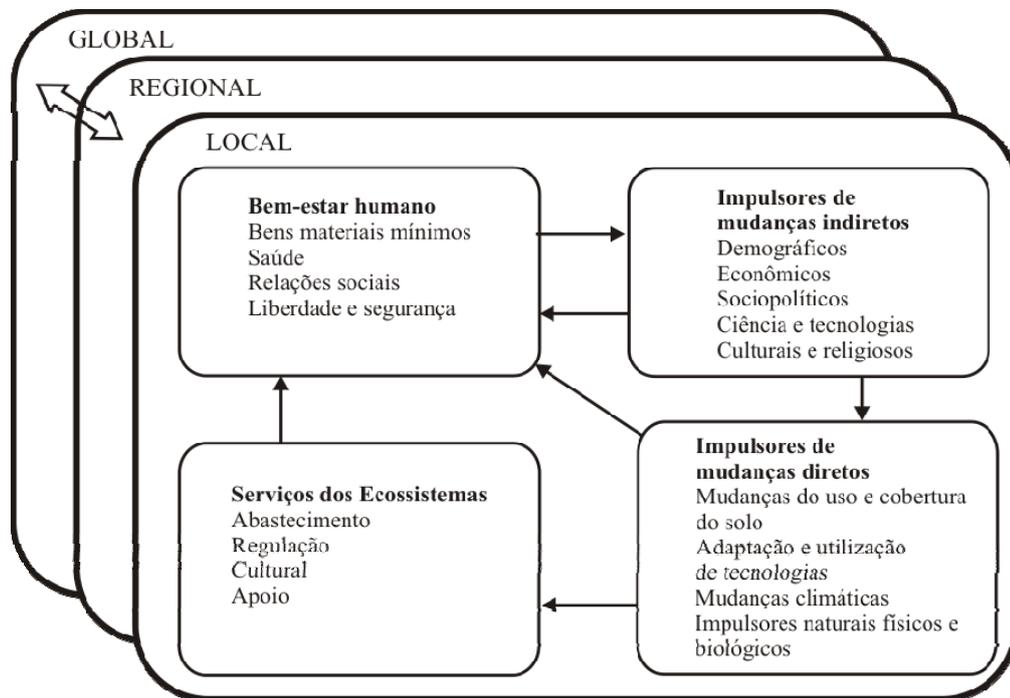


Figura 2. Relações no sistema homem-ambiente.  
Adaptado de ONU, (2005b).

A humanidade depende dos serviços que obtém dos ecossistemas para alcançar o bem-estar. Os serviços dos ecossistemas são influenciados pelos impulsores de mudanças diretos variando em tipo e intensidade de acordo com a escala espacial, podendo a escala ser local, regional e global.

Atualmente, as influências dos impulsores indiretos vêm aumentando sobre os impulsores diretos colocando em risco a sustentabilidade dos serviços que o homem obtém dos ecossistemas. A conservação e sustentabilidade dos ecossistemas dependem da sua gestão por demandas. Medidas para reverter os problemas de degradação dos ecossistemas e de seus serviços incluem a adoção de políticas públicas e intervenções em vários níveis organizacionais. Saber quando e como atuar requer o entendimento dos elementos e da suas interações dentro do sistema homem-ambiente, mostrado na Figura 2.

## 1.2 Caracterização das mudanças do uso e cobertura do solo

Na seção anterior foi focalizado de forma geral o problema da sustentabilidade do sistema homem-ambiente. Uns dos principais fatores que incidem sobre a vulnerabilidade do sistema homem-ambiente é a mudança do uso e cobertura do solo. O solo pode ser identificado como a região espacial de interação entre os sistemas naturais e humanos. O solo possui uma dupla caracterização, pode ser considerado como o local da realização das atividades humanas, bem como a fonte dos recursos necessários para a realização destas atividades. Vários conceitos importantes surgem nesta seção e são definidos a continuação:

- a) **Cobertura do solo.** A cobertura do solo pode ser definida como a composição biofísica da superfície terrestre, FAO (1998). Isto é, a cobertura do solo é composta por características físicas, químicas, ecológicas ou biológicas da superfície terrestre. Por exemplo: florestas, bosques, corpos de água, áreas urbanas e outros.
- b) **Uso do solo.** A finalidade do uso dos recursos da cobertura do solo define o conceito “uso do solo”. Este concerne os produtos e benefícios obtidos do uso do solo como também das ações do planejamento do solo para alcançar estes produtos e benefícios. De acordo com FAO (1998), o uso do solo é caracterizado por planejamentos, atividades e insumos que as pessoas executam em uma cobertura de solo para produzi-lo, mudá-lo ou mantê-lo. O uso do solo e a cobertura do solo não são sinônimos. Uma mesma cobertura pode ter diferentes usos, como é mostrado na Tabela 1. Como também, o mesmo uso do solo pode acontecer em diferentes coberturas do solo. Por exemplo, áreas de recreação podem acontecer em florestas ou em áreas urbanas.

Tabela 1. Relações entre o uso e a cobertura do solo.

Cobertura do solo	Uso do solo
Florestas	Florestas Naturais; Produção de madeira e recreação.
Pastagens	Pastagens naturais; Recreação e criação de gado
Áreas agrícolas	Culturas perenes e anuais.
Áreas urbanas	Cidades; Áreas industriais e transporte

Adaptado de Briassoulis, (2000).

- c) **Mudanças do uso e cobertura do solo.** O enfoque mais simples usado para mensurar as mudanças do uso e cobertura do solo quantifica o aumento ou diminuição da área correspondente a uma classe de uso ou cobertura do solo. Neste caso, quanto maior é a resolução espacial, as mudanças do uso e cobertura do solo são detectadas com maior precisão. O uso do solo pode ser a causa da mudança da cobertura em uma região, ainda

assim, a cobertura do solo pode mudar mesmo se mantendo inalterado seu uso. O uso do solo pode modificar a cobertura do solo de três formas (BRIASSOULIS, 2000):

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

Similarmente, para a mudança do uso do solo definem-se os seguintes tipos:

- **Conversão.** Consiste na mudança de um tipo de uso para outro. Por exemplo, áreas de pastagens naturais para áreas de criação de gado.
- **Modificação.** Modificações do uso do solo podem envolver variações na intensidade do uso e alterações nas características e atributos. Por exemplo, áreas urbanas de nível socioeconômico alto para um nível baixo.

Meyer (1994) aponta que a mudança da cobertura do solo causada por seu uso não necessariamente implica em degradação do solo. Também, em estudos de impacto ambiental, a cobertura do solo é a que tem um significado físico no mecanismo das mudanças ambientais e não o seu uso. Neste sentido, Graetz (1994), estabelece que no estudo da interação entre as áreas de pastagem e os processos físicos do impacto ambiental, os atributos ecológicos (estrutura e composição vegetal) são os que possuem relação com os processos físicos das mudanças ambientais, e não seu principal uso (criação de gado).

Através do monitoramento e estudos da cobertura do solo é possível estimar o padrão da dinâmica temporal de cada tipo de cobertura do solo. Por exemplo, na América Latina, as áreas de pastagens e agricultura apresentaram altas taxas de crescimento em detrimento das áreas de florestas a partir da metade do século XX (Figura 3).

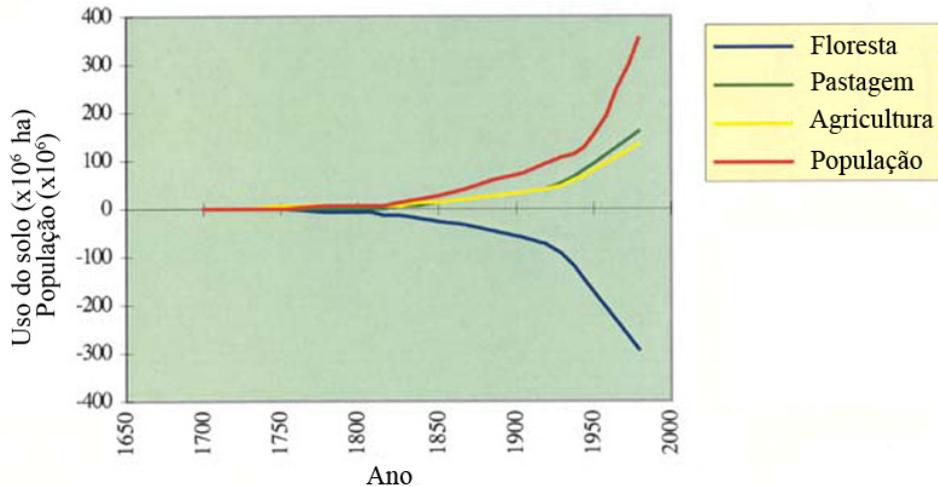


Figura 3. Registro das mudanças do uso do solo para América Latina. Adaptado de Briassoulis, (2000).

### 1.3 Impulsores de mudanças do uso e cobertura do solo

As mudanças do uso e cobertura do solo não acontecem ao acaso em uma região. Estas mudanças estão em constante dinamismo e podem ser determinadas principalmente por dois tipos de impulsores:

- a) **Socioeconômicos.** Estes impulsores abrangem sistemas humanos. Por exemplo: fatores demográficos, políticos, sociais, econômicos e institucionais. Em especial, o crescimento e migração populacional são relevantes na maioria dos casos.
- b) **Biofísicos.** Consideram impulsores com características ambientais. Por exemplo: temperatura do ar, precipitação pluvial, altitude, declividade, tipos de solo, rede fluvial, entre outros.

Tanto os impulsores socioeconômicos e biofísicos atuam em escalas espaciais locais, regionais e globais. O entendimento da influência de cada impulsor de mudança sobre a dinâmica das mudanças de uso e cobertura do solo e de seus impactos é uma questão científica multidisciplinar e interdisciplinar.

De acordo com Kuhlman (2008), um impulsor de mudança, em inglês *driving force*, deve apresentar variação significativa na escala temporal ou espacial dentro da região de estudo. Dois tipos de impulsores de mudanças do uso do solo são considerados em função da sua variação no período da simulação:

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

b) **Impulsores de mudanças estáveis.** São impulsores que variam tão pouco no período da simulação que podem ser considerados estáveis. Por exemplo, declividade, altitude, rede hidrográfica, entre outros.

A classificação de um impulsor de mudança como dinâmico ou estável é relativo, pois depende da escala espacial e temporal do estudo.

Os fatores biofísicos não causam diretamente as mudanças do uso e cobertura do solo. As mudanças do uso do solo representam o resultado da ação de agentes tomadores de decisões atuando em vários níveis organizacionais no âmbito local, regional ou global sob a influência de fatores socioeconômicos, políticos e ambientais. O efeito imediato do uso do solo incide sobre a mudança da cobertura do solo (Figura 4).

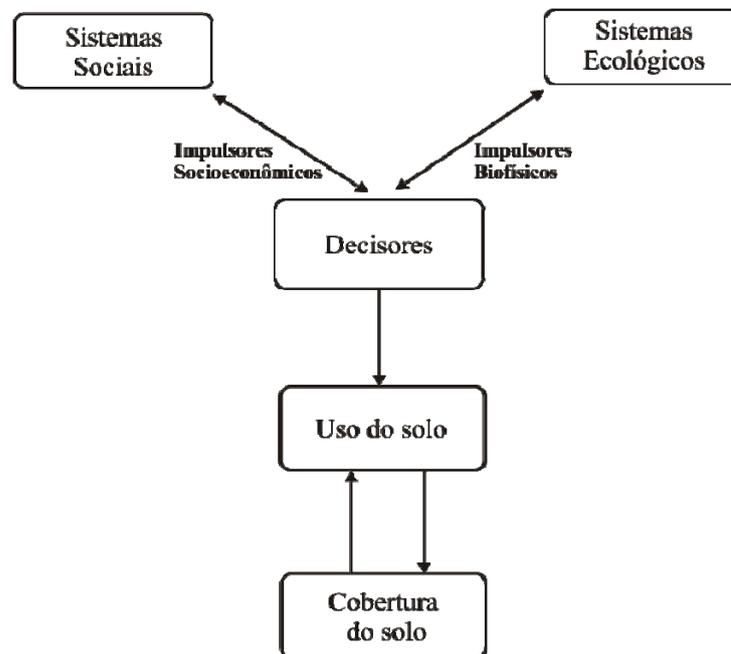


Figura 4. Relações entre impulsores de mudanças e o uso e cobertura do solo.  
Adaptado de Briassoulis, (2000).

#### 1.4 Cenários

A gestão e o planejamento ambiental não só precisam de informações do estado atual e do passado dos ecossistemas e sistemas humanos. Uma boa gestão e um bom planejamento devem considerar os cenários atuais e os possíveis de acontecer em um futuro próximo. Para esta finalidade, a geração e análise de cenários a curto e longo prazo é essencial.

De acordo com ONU (2005b), um cenário é uma descrição plausível do que pode vir a acontecer no futuro em função de um conjunto de premissas coerentes e consistentes. Um

cenário não deve ser interpretado e usado como uma previsão ou prognóstico, mas como uma componente da análise de cenários. A análise de cenários consiste no processo de gerar e analisar possíveis evoluções temporais ou simulações considerando cenários alternativos.

De acordo com Kuhlman, (2008) alguns métodos para construir cenários são:

- a) **Extrapolação de cenários.** É baseado em extrapolações dos padrões de tendência existentes e assume-se que o padrão de tendência não se altera. Estes cenários devem ser interpretados como a continuação das tendências atuais no futuro e possuem pouca confiabilidade de predição do cenário mais realista.
- b) **Conhecimento especialista.** Este enfoque é baseado na opinião de especialistas. Os cenários possíveis de cada tipo de uso do solo são concebidos por especialistas. Apresenta maior confiabilidade de predição que o enfoque anterior.
- c) **Enfoque Inclusivo.** Consiste na elaboração de um conjunto de mundos possíveis com o intuito de capturar o mundo “real” dentro deste conjunto. Um espaço multidimensional é concebido pela variação temporal dos parâmetros escolhidos. O espaço multidimensional é reduzido pela variação mais provável dos principais parâmetros. Este método é usado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC (2007).

Uma estratégia para gerar cenários sobre uma variável consiste em considerar um cenário de referencia e dois cenários extremos ou contrastantes. Desta forma é configurado um intervalo de variação da evolução mais provável da variável. A análise dos cenários não deve descartar os cenários contrastantes na modelagem, pois estes possuem informação significativa da dinâmica das mudanças. A Figura 5 mostra um exemplo de cenários para o preço do petróleo.

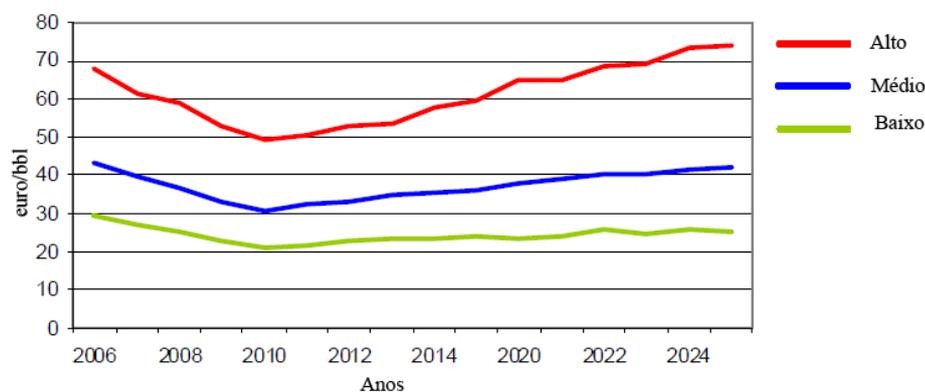


Figura 5. Cenários do preço mundial do petróleo para o período 2006-2025. Adaptado de Kuhlman, (2008).

### 1.5 Conceitualização dos modelos de simulação das mudanças do uso e cobertura do solo

Métodos da estatística espacial são cada vez mais usados e integrados em sistemas de informação geográfico ou SIG, Bailey e Gattrel (1995), Meirelles *et al.* (2007). A aplicação de métodos análise espacial disponíveis em SIG depende da configuração espacial dos dados.

Grande parte dos métodos usados em SIG é desenvolvida sobre a dimensão espacial. Nestas aplicações, os dados são mais densos na dimensão espacial que na dimensão temporal. A Figura 6 apresenta uma variável  $Z$  cuja distribuição espacial é mensurada em três tempos  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$ . Um problema comum é a interpolação espacial a qual consiste em estimar a distribuição espacial de  $Z$  a partir de uma amostra de tamanho  $n$ . Métodos Geoestatísticos são comumente utilizados neste caso, (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

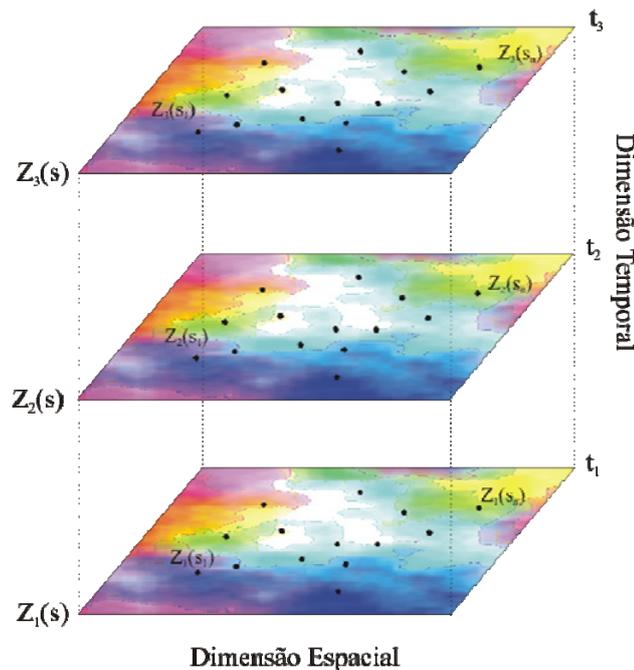


Figura 6. Configuração de dados espaciais. Adaptado de Rohuani e Myers, (1990).

Existem outras configurações de dados que consideram a dimensão temporal. Por exemplo, uma rede de estações meteorológicas gera mensurações de precipitação, umidade e temperatura com uma frequência temporal diária, exposto na Figura 7. Neste caso, os dados são mais densos na dimensão temporal. O problema a resolver neste caso é a extrapolação temporal do processo, mas também pode envolver a interpolação espacial.

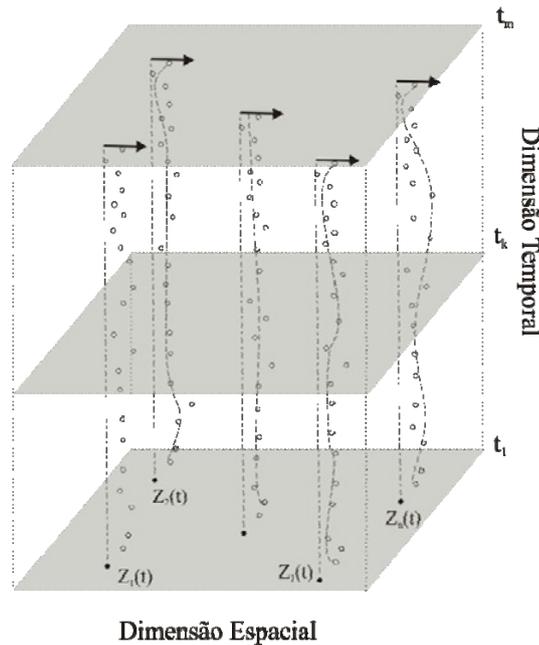


Figura 7. Configuração de dados temporais. Adaptado de Rohuani e Myers, (1990).

Existe uma demanda por modelos computacionais para analisar processos tanto na dimensão espacial quanto na dinâmica temporal e a integração destes métodos com os SIG. Principalmente, devido à disponibilidade crescente de dados oriundos de sistemas de coleta e aquisição de dados provenientes do sensoriamento remoto, estações de coleta e monitoramento ambiental, censos demográficos e socioeconômicos, projetos ambientais, entre outros. Este esquema corresponde a uma estrutura de modelagem espaço-temporal mostrada na Figura 8. Todas as análises espaciais são confinadas dentro do volume definido pelo domínio espacial  $D$  e pelo intervalo temporal  $T$ .

Uma questão importante em estudos e avaliações ambientais é a determinação das causas e conseqüências da dinâmica das mudanças do uso do solo. A dinâmica da mudança do uso do solo é um processo complexo, pois é determinada pela interação de fatores socioeconômicos e biofísicos. Parte desta complexidade pode ser explorada através da geração de simulações das mudanças do uso do solo para um futuro próximo baseado no uso do solo atual e passado.

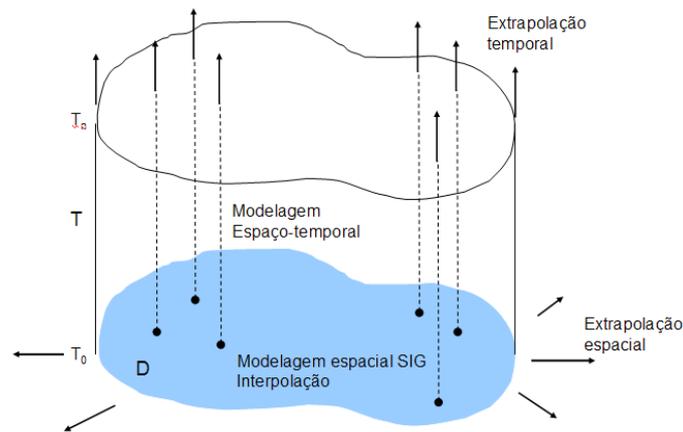


Figura 8. Domínio espaço-temporal da análise espacial.

Modelos de simulação da dinâmica do uso do solo são conhecidos como modelos LUCC, termo procedente da expressão em inglês Land Use Cover Change. Modelos LUCC compreendem um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos para analisar a evolução temporal de um processo espacial, Meirelles *et al.* (2007). Existe uma grande variedade de enfoques de modelos LUCC. Estes enfoques são descritos e comparados em Parker *et al.* (2002), Agarwal *et al.* (2002) e Jones (2005).

Alguns exemplos de enfoques LUCC são o CLUE-S, descrito no Capítulo 3, o DINAMICA descrito em Soares-Filho *et al.* (2002) e *The Land Change Modeler for Ecological Sustainability* (IDRISI, <http://www.idrisi.com.br>). Algumas técnicas de simulação são usadas como os agentes celulares (PARKER *et al.* (2002) ) e cadeias de Markov (MANSILLA, 2007). Algumas questões que as análises das simulações dos modelos LUCC podem ajudar a responder são: Quais são os fatores que contribuem significativamente para explicar as mudanças? Onde acontecem as maiores mudanças?

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

Alguns conceitos utilizados na ecologia, geografia e sociologia são usados na concepção de modelos LUCC (VERBURG *et al.* 2002).

- a) **Conectividade.** A conectividade estabelece que eventos em posições próximas sejam relacionados. Segundo este conceito, a mudança do uso de solo em uma área é influenciada pelas condições existentes de áreas vizinhas. A conectividade se relaciona

ao conceito de continuidade espacial usado na estatística espacial, Isaaks e Srivastava (1989).

- b) **Hierarquia.** Este conceito está relacionado à estrutura organizacional dos sistemas sociais. Processos operando em níveis organizacionais superiores limitam processos atuando em níveis inferiores. Isto implica que a mudança do uso do solo em uma região pode ser influenciada pela sinergia entre processos atuando em diferentes níveis organizacionais, onde o processo do nível superior possui um domínio espacial maior que o processo de nível inferior.
- c) **Resiliência.** Refere-se à capacidade de um ecossistema para absorver perturbações ou voltar a seu estado original após o distúrbio.

## 2 MODELO CLUE-S

### 2.1 Introdução

O CLUE-S é um modelo computacional de simulação da dinâmica da mudança do uso do solo, Verburg *et al.* (2002), Verburg, (2008). O termo deriva da expressão Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent. Este modelo foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa Land Dynamics Group da Universidade de Wageningen, Holanda (<http://www.lad.wur.nl/UK/>).

O CLUE-S possui as seguintes características:

- a) **Espacialmente explícito.** A simulação no CLUE-S se fundamenta na discretização da área de estudo através de um plano celular (PC). O plano celular é formado por células regulares, usualmente quadradas, que definem a unidade espacial da simulação. Este tipo de representação espacial é denominado de raster ou matricial no ambiente SIG. Todas as variáveis consideradas na simulação, as classes de uso do solo, os impulsores de mudanças e as restrições espaciais, são representadas e quantificadas no plano celular. A Figura 9 apresenta esta característica.

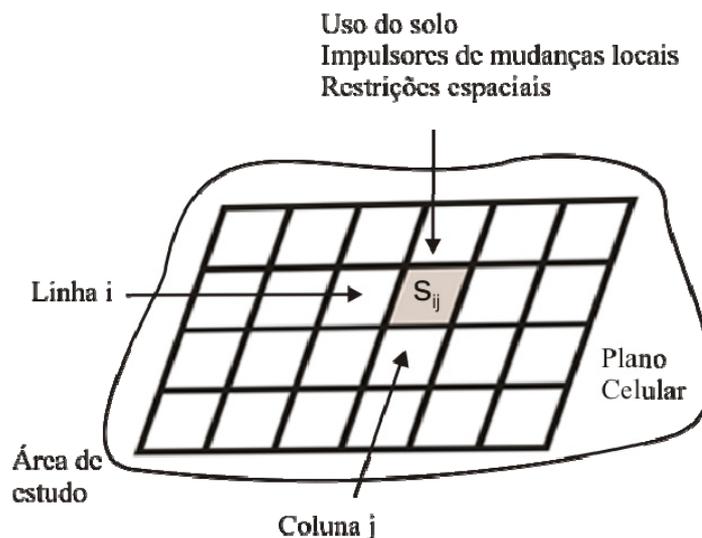


Figura 9. Discretização da área de estudo no plano celular.

A referência espacial de uma célula na posição  $s_{ij}$ , linha  $i$  e coluna  $j$ , é definida pelo centróide da célula. Este centróide é usado como referência para realizar cálculos, por exemplo, distâncias entre objetos. O objetivo de usar um plano celular é homogeneizar informações provenientes de diferentes fontes e formatos: vetoriais, matriciais e de

outros planos celulares. Os resultados das simulações dependem do desenho do plano celular, principalmente, do tamanho da célula.

- b) **Nível de aplicação regional.** A primeira versão do CLUE-S, denominada simplesmente de CLUE, Veldkamp e Fresco (1996), foi desenvolvida para aplicações no nível nacional ou continental. Neste caso, o número de classes do uso do solo varia consideravelmente dentro de cada célula. Portanto, em cada célula é calculada a percentagem da área de cada classe de uso do solo.

Com a disponibilidade de imagens de sensores remotos com maior resolução espacial, o modelo CLUE-S pode ser aplicado com maior resolução espacial. Neste caso, havendo maior homogeneidade dentro de cada célula, uma função indicadora é usada para representar a presença ou ausência de uma classe de uso do solo, Figura 10.

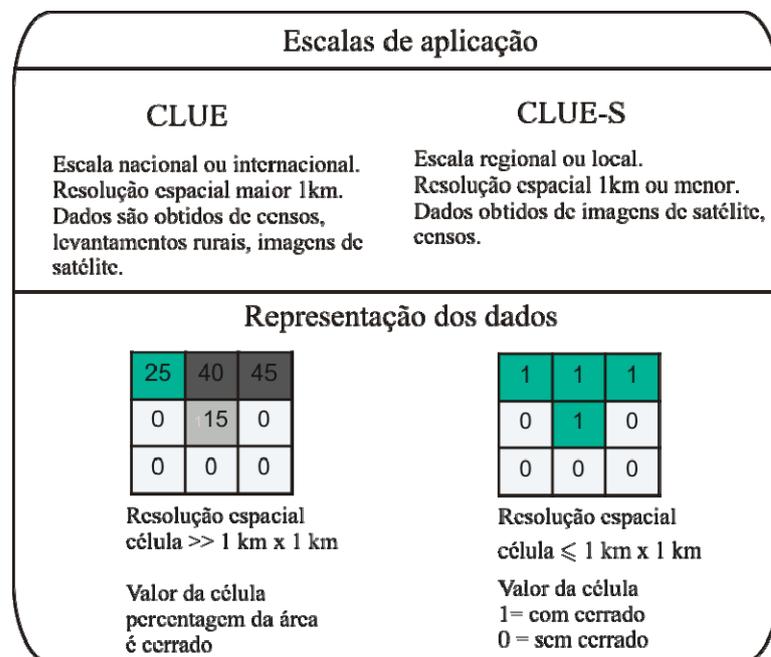


Figura 10. Escala espacial de aplicação do modelo CLUE-S.  
Adaptado de Verburg *et al.*, (2002).

- c) **Multifatorial.** A mudança de uma classe de uso do solo é função de um conjunto de impulsores de mudanças locais e globais.
- d) **Multiescala.** O modelo CLUE-S considera fatores atuando em escalas espaciais locais (impulsores locais) e em escalas regionais (demanda agregada do uso do solo).
- e) **Resolução temporal anual.** A simulação é realizada em intervalos anuais.

- f) **Enfoque estatístico.** O modelo CLUE-S é baseado na regressão logística para quantificar a influência dos impulsores de mudanças locais sobre a probabilidade de ocorrência de uma classe de uso do solo.

## 2.2 Estrutura do modelo CLUE-S

O modelo CLUE-S consiste de dois módulos: não espacial e espacial. A Figura 11 apresenta estes módulos.

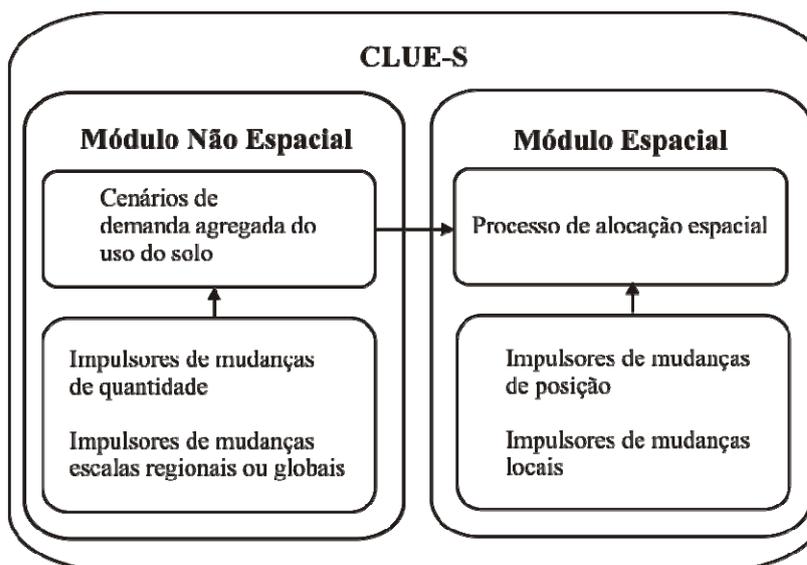


Figura 11. Estrutura do modelo CLUE-S.

- a) **Módulo Não Espacial.** Envolve a geração de cenários da demanda agregada do uso do solo. Estes cenários contêm a variação temporal da área total de cada classe de uso do solo para toda a região de estudo. A variação temporal, aumento ou diminuição, da área de uma classe do uso do solo pode ser considerado como o efeito de impulsores socioeconômicos atuando na escala regional ou global. Estes impulsores caracterizam as mudanças de quantidade. Os cenários foram introduzidos na Seção 1.4. Este módulo não se encontra incluído na versão atual do programa CLUE-S.
- b) **Módulo Espacial.** No módulo espacial é onde se realiza a simulação no programa CLUE-S. O cenário de demanda agregada do uso do solo é alocado espacialmente sobre o plano celular. O processo de alocação espacial envolve a influência de impulsores locais da mudança do uso do solo. A alocação espacial envolve mudanças de posição das classes de uso do solo.

### 2.3 Simulação no CLUE-S

A simulação no CLUE-S é baseada em dois componentes: a geração de cenários de simulação e a determinação de características locais.

Os cenários de simulação determinam as características principais em que a simulação é realizada. Geralmente, vários cenários de simulação são avaliados. Um cenário de simulação é composto pelos seguintes parâmetros: as restrições espaciais, as regras de conversão e a demanda agregada do uso do solo. Estes parâmetros são descritos a continuação.

- a) **Restrições espaciais.** Definem áreas onde as mudanças do uso do solo não são permitidas. Por exemplo, áreas protegidas por políticas públicas como parques naturais, áreas de conservação natural e propriedades privadas.
- b) **Regras de conversão.** O CLUE-S possui dois tipos de regras de conversão entre as classes do uso do solo: a elasticidade de conversão e a matriz de conversão. Estes parâmetros definem a dinâmica temporal das mudanças entre as classes de uso do solo.

- **Elasticidade de conversão.** A elasticidade de conversão de uma classe de uso do solo indica a capacidade de mudança para outra classe. A elasticidade de conversão de uma classe de uso do solo “u” é especificada pelo parâmetro numérico  $ELAS_u$  o qual toma valores no intervalo [0,1]. Considerando uma classe de uso do solo u, a elasticidade tem a seguinte interpretação:

**$ELAS_u = 0$ .** Implica o menor nível de elasticidade de conversão da classe u. Isto é, a classe u tem o maior nível de possibilidade de conversão para outra classe.

**$0 < ELAS_u < 1$ .** Implica um nível intermediário de elasticidade de conversão. As mudanças ou conversões são permitidas, mas enquanto mais próximo a 1, mais difícil a classe u ser convertida para outra classe.

**$ELAS_u = 1$ .** Implica o maior nível de elasticidade. A classe u não se converterá em outra classe.

O raciocínio destas regras está relacionado com a definição de probabilidade total para uma classe de solo u acontecer na célula  $s_{ij}$ , denotado por  $TPROB_u(s_{ij})$ , descrito na Seção 3.4. Sendo  $ELAS_u$  uma parcela da probabilidade total, quando  $ELAS_u = 0$ , a probabilidade  $TPROB_u(s_{ij})$  diminui, ou seja, a classe u tem maiores possibilidades de ser convertida. No entanto, quando  $ELAS_u = 1$  ou perto a 1, a probabilidade  $TPROB_u(s_{ij})$  aumenta, impossibilitando a classe u de ser convertida.

- **Matriz de conversão.** Este parâmetro especifica a lógica das conversões entre as classes do uso do solo durante a simulação. Estas regras de conversões são especificadas através de uma matriz de conversão entre as classes de uso do solo. A Figura 12 apresenta um exemplo das conversões possíveis entre os usos do solo: pastagem, agricultura e floresta.

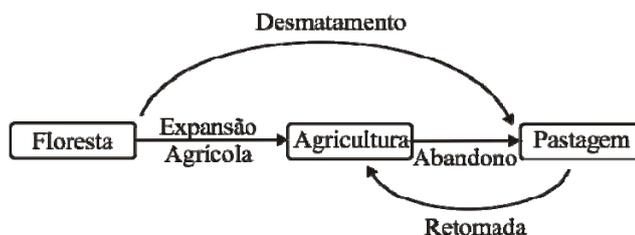


Figura 12. Exemplo de seqüências de transições das mudanças do uso do solo. Adaptado de Verburg, (2008).

As seqüências de transições são armazenadas em uma matriz de transição (Figura 13).

		Futuro		
		Floresta	Agricultura	Pastagem
Presente	Floresta	1	1	1
	Agricultura	0	1	1
	Pastagem	0	1	1

Figura 13. Exemplo de uma matriz de transição entre classes de uso do solo.

Na Figura 13, o valor 1 indica que a conversão entre classes é permitida enquanto o valor 0 indica que a conversão não é possível.

- c) **Demanda agregada do uso do solo.** A demanda agregada do uso solo descreve possíveis cenários da evolução temporal de cada classe do uso do solo em unidades de área. No caso do CLUE-S em hectares. Isto é, a área ocupada por cada classe do uso do solo anualmente. As demandas agregadas podem ser crescentes ou decrescentes para cada classe de uso do solo.

Este módulo não está inserido no programa CLUE-S. Por tanto, devem-se usar métodos auxiliares para gerá-los. Podem ser usadas técnicas de extrapolação de tendências de dados históricos. Modelos econômicos mais avançados podem considerar o crescimento populacional ou diminuição dos recursos do solo para estimar a demanda do uso do solo, Kuhlman (2008).

As características locais definem a influência dos impulsores de mudanças sobre a probabilidade de ocorrência de uma classe de uso do solo para cada célula. Para uma célula na linha  $i$  e coluna  $j$ , denotado por  $s_{ij}$ , a probabilidade de ocorrer uma classe de uso do solo  $u$  em função dos impulsores de mudanças é determinada pelo modelo de regressão logística binária (HOSMER e LEMESHOW, 1989):

$$\log \left( \frac{\text{prob}[y_u(s_{ij}) = 1]}{1 - \text{prob}[y_u(s_{ij}) = 1]} \right) = \beta_0 + \beta_1 x_1(s_{ij}) + \beta_2 x_2(s_{ij}) + \dots + \beta_m x_m(s_{ij}) \quad (1)$$

$y_u(s_{ij})$  é uma função indicadora definida para uma classe de solo  $u$  em uma célula  $s_{ij} \in PC$

$$y_u(s_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{classe de uso do solo é } u \\ 0 & \text{outro caso} \end{cases} \quad (2)$$

$P_u(s_{ij}) = \text{prob}[y_u(s_{ij}) = 1]$  é a probabilidade da classe de uso do solo “ $u$ ” ocorrer na célula  $s_{ij}$ .

$X_k(s_{ij})$  correspondem às covariáveis do modelo (impulsores locais de mudanças).

$\beta_1 \dots \beta_m$  correspondem aos coeficientes desconhecidos do modelo.

A Figura 14 resume os parâmetros usados na simulação do modelo CLUE-S. Os parâmetros que podem ser mudados pelo usuário são os que correspondem aos cenários de simulação: restrições espaciais, regras de conversão e as demandas agregadas do uso do solo. Podem ser definidos vários cenários de simulação, porém as características locais serão as mesmas para todos estes cenários de simulação.

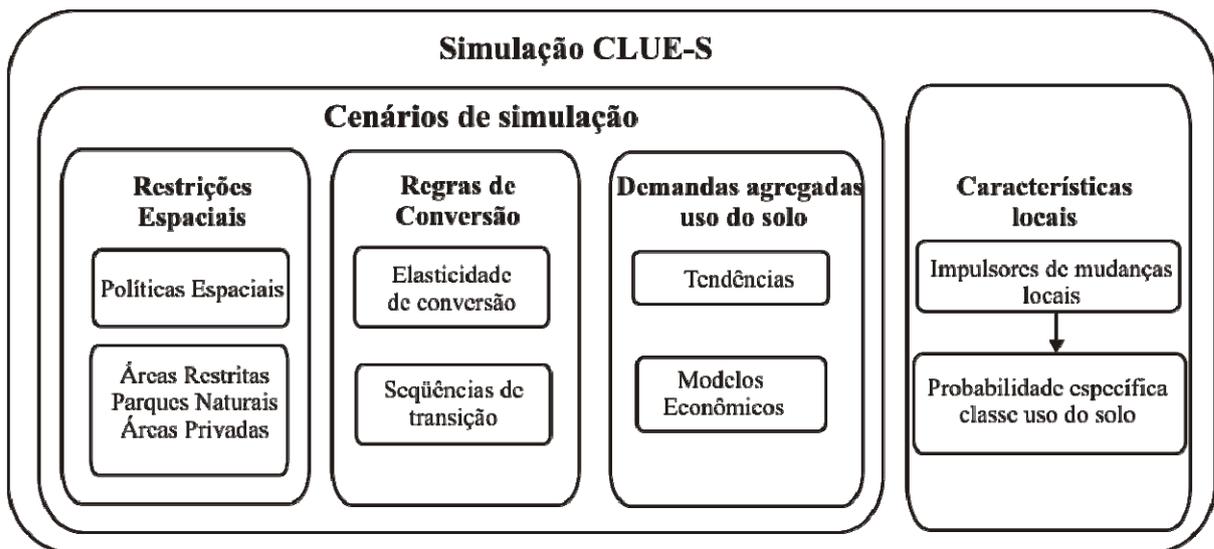


Figura 14. Parâmetros usados no modelo CLUE-S.  
Adaptado de Verburg *et al.*, (2002).

## 2.4 Processo de alocação espacial

O processo de alocação espacial do modelo CLUE-S é um processo iterativo que utiliza os seguintes elementos:

1. **Mapas de probabilidade para cada classe do uso do solo obtidos da regressão logística.** Para uma classe de uso do solo  $u$ , tem-se:

$$\{P_u(s_{ij}) \mid P_u(s_{ij}) = \text{prob}[y_u(s_{ij}) = 1], s_{ij} \in PC\} \quad (3)$$

2. **Regras de conversão.**
3. **Mapa da classificação do uso do solo para o ano inicial.**
4. **Cenários da demanda agregada do uso do solo.**

O processo de alocação espacial é determinado pelas seguintes etapas:

1. **Determinação das células que podem sofrer conversões.** O processo de alocação espacial não considera áreas com restrições espaciais e células que estão em uma localidade onde a conversão não é permitida de acordo com a matriz de conversão.
2. **Cálculo das probabilidades totais para cada uso do solo.** Para cada célula  $s_{ij}$ , a probabilidade total de ocorrência da classe de uso do solo  $u$  pode ser descrita pela Equação 4:

$$TPROP_u(s_{ij}) = P_u(s_{ij}) + ELAS_u + ITER_u \quad (4)$$

onde

$P_u(s_{ij})$  é a probabilidade de ocorrência da classe do uso do solo  $u$  na célula  $s_{ij}$ . Estas probabilidades são estimadas pelo modelo de regressão logística binária, descrito na Equação (1).

$ELAS_u$  é a elasticidade da conversão para a classe de uso do solo  $u$ .

$ITER_u$  é uma variável de iteração que é específica para a classe de uso solo  $u$ .

3. **Alocação preliminar.** É feita uma alocação preliminar com um valor igual da variável de iteração ( $ITER_u$ ) para todas as classes de uso do solo e alocando a classe com maior probabilidade total para a célula considerada. Isto gerará mudanças em algumas células.
4. **Comparação entre área alocada e a demanda agregada.** Para cada classe de uso do solo, se compara área total alocada com sua respectiva demanda agregada. Para as classes cuja área de alocação é menor que a demanda, o valor da variável de iteração  $ITER$  é aumentado.

Para as classes cuja área de alocação é maior que a demanda, o valor da variável de iteração ITER é diminuído.

5. **Iteração.** As etapas de 2 a 4 serão repetidas até que as demandas do uso do solo sejam obtidas. Quando a área de alocação de cada classe se iguala à demanda, o mapa final é salvo e se inicia o cálculo do próximo ano.

A Figura 15 apresenta o processo de iteração da alocação espacial do modelo CLUE-S.

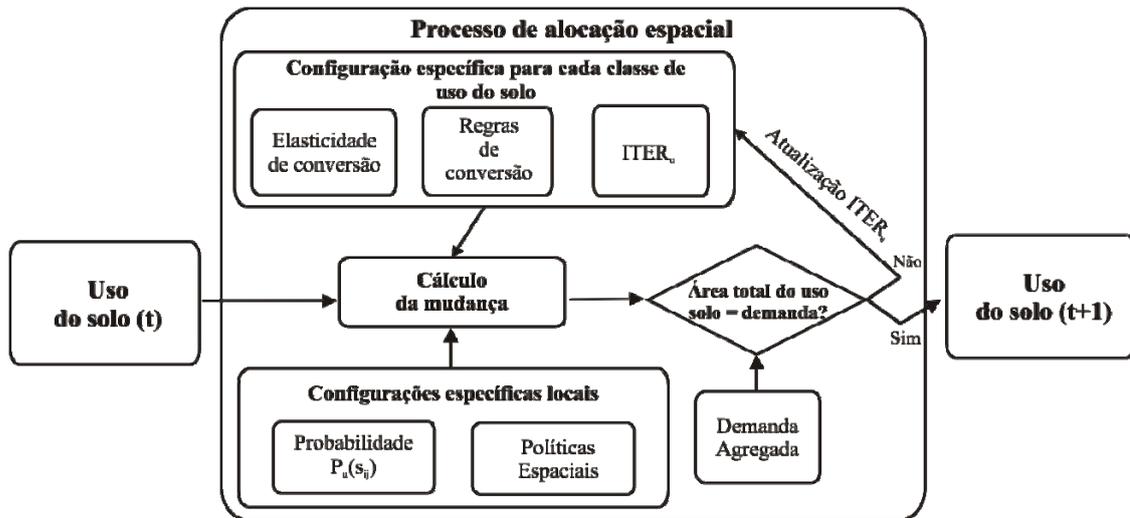


Figura 15. Processo de alocação espacial do CLUE-S.  
Adaptado de Verburg (2008).

De acordo com Verburg (2008), para executar o modelo é necessário que se tenham dados espaciais de pelo menos 1 ano. No entanto, para que se possa calibrar e validar o modelo é necessário possuir dados de pelo menos de 2 anos ou mais.

### 3 ENFOQUE DA REGRESSÃO ESPACIAL

#### 3.1 Introdução

No capítulo anterior descreveu-se o modelo CLUE-S. Na formulação do CLUE-S uma questão importante é a quantificação da influência dos impulsores de mudanças locais sobre a probabilidade de ocorrência de uma classe de uso do solo.

A Figura 16 apresenta o enfoque da regressão logística no modelo CLUE-S. Neste esquema, os impulsores de mudanças, denotados por  $X(s_{ij})$ , influem na probabilidade de ocorrência de uma classe de solo através do modelo de regressão logística, descrito na Equação 1. A principal observação desta relação é a desconsideração da informação da vizinhança sobre a modelagem da regressão logística.

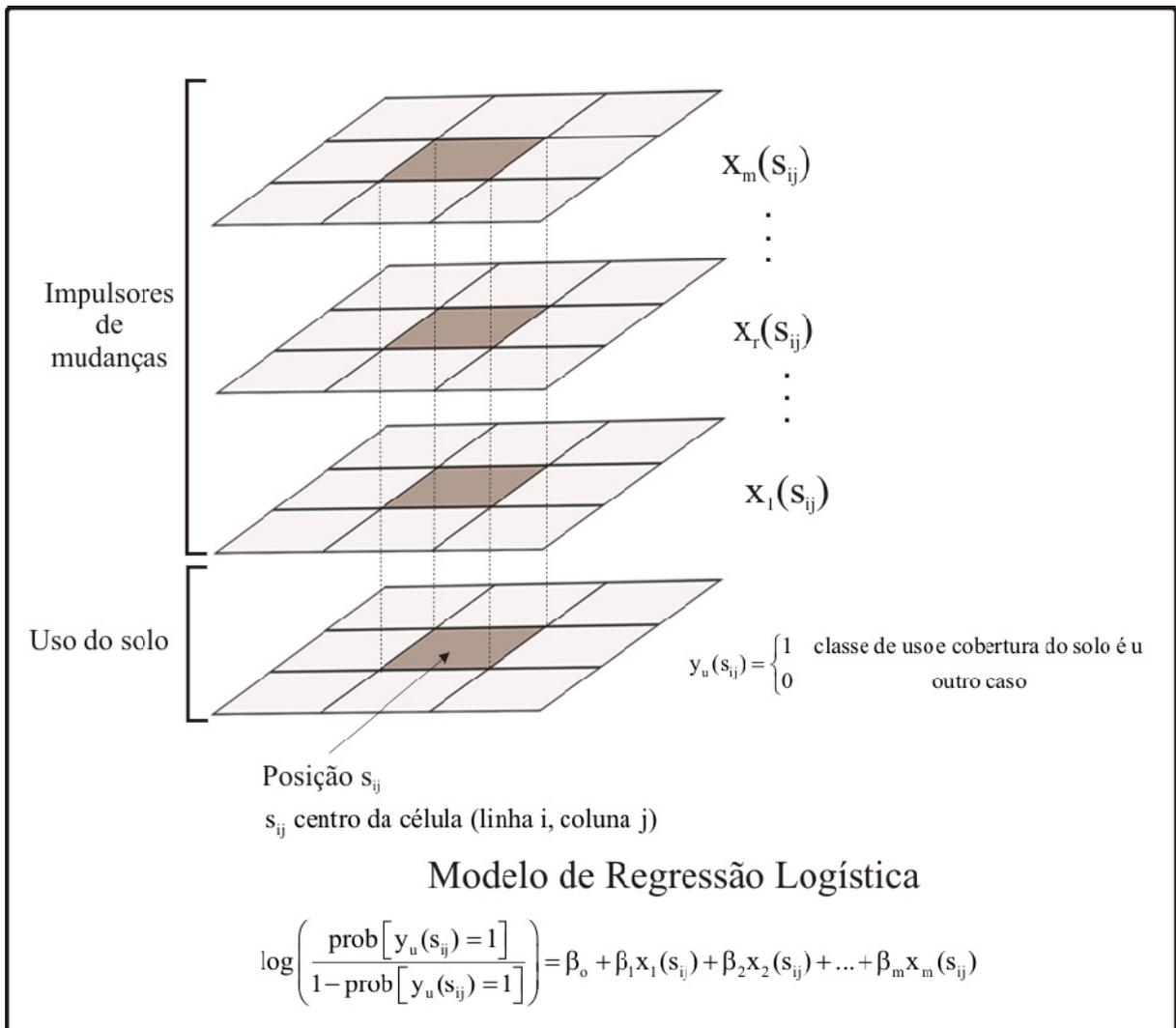


Figura 16. Enfoque do modelo de regressão logística no CLUE-S.

O modelo de regressão logística é uma modificação do modelo linear de regressão, Equação 5, onde a variável dependente ou resposta é categórica. Existe uma ampla literatura sobre o modelo de regressão logística e diversas aplicações, principalmente, na epidemiologia, bioestatística e engenharia, Kleinbaum e Klein (2002), Hosmer e Lemeshow (1989).

O modelo linear de regressão múltipla é definido pela equação:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

$$Y_{n \times 1} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \text{ é um vetor de } n \text{ observações de uma variável } Y.$$

$$X_{n \times m} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m-1} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm-1} \end{bmatrix} \text{ é uma matriz de observações das covariáveis } X_1, \dots, X_{m-1}$$

$$B_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{m-1} \end{bmatrix} \text{ é um vetor de coeficientes desconhecidos do modelo.}$$

$$\varepsilon_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \text{ é um vetor de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas}$$

com distribuição Normal,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$   $i = 1, \dots, n$ . Variância constante,  $\sigma^2 > 0$ .

Ou, explicitamente:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m-1} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{m-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3.2 Enfoque da regressão espacial

A estatística espacial compreende um conjunto de métodos estatísticos para analisar processos espaciais (BAILEY e GATTREL, 1995). Um modelo espacial é um modelo que considera explicitamente a referência espacial ou temporal na modelagem de um processo (CRESSIE, 1991). Modelos estatísticos espaciais podem pertencer a três tipos: Geoestatísticos, Padrões Pontuais e Dados de Área (Figura 17). Cada um apresenta diferentes tipos de modelos, problemas e soluções. A regressão espacial é um método pertencente à estatística espacial de Dados de Área.

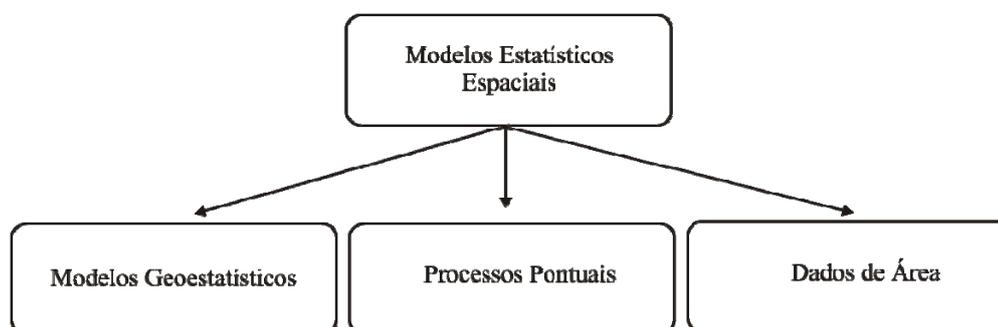


Figura 17. Modelos estatísticos espaciais.

Os dados de área consistem de valores ou indicadores que representam áreas que conformam a região de estudo. Estas áreas são denominadas de reticulados, células ou *lattice*. No caso do modelo CLUE-S os reticulados são quadrados.

O princípio fundamental do enfoque de análise espacial estabelece que os valores das observações de variáveis espaciais tendem a ser similares quando menor é a distância entre as observações. Este efeito também acontece na dimensão temporal na modelagem de séries temporais. Este princípio é conhecido como a Primeira Lei da Geografia de Tobler o qual estabelece: “Todos os objetos são correlacionados entre si, mas objetos próximos são mais correlacionados que objetos distantes” (ARBIA, 2006).

O padrão de similaridade presente na distribuição espacial de uma variável é denominado de autocorrelação espacial. A autocorrelação espacial pode ser identificada por três tipos: positiva, se dados próximos tendem a ter valores similares; negativa, se dados próximos tendem a ter valores diferentes; e aleatória, quando não existe um padrão predominante. Estes padrões são mostrados na Figura 18.

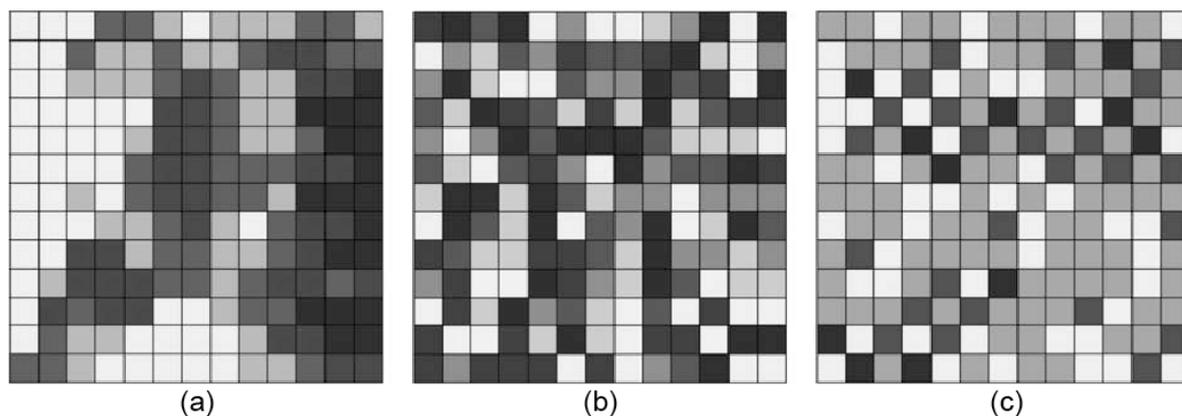


Figura 18. Exemplos de padrões de autocorrelação espacial: (a) autocorrelação positiva, (b) aleatória, (c) autocorrelação negativa. Adaptado de Overmars, (2003).

As fases preliminares para ajustar um modelo de regressão espacial são o cálculo de uma matriz de vizinhança e o cálculo de indicadores de autocorrelação espacial.

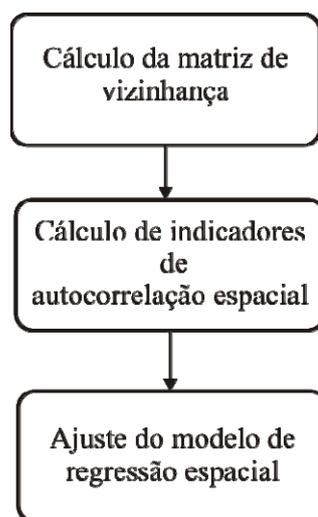


Figura 19. Fases preliminares da regressão espacial.

Descrevem-se estas fases da Figura 19:

- a) **Cálculo da matriz de vizinhança.** A estrutura de vizinhança para uma variável no plano celular é definida pelo conjunto de pares de células que são vizinhas. A estrutura de vizinhança é armazenada em uma matriz de vizinhança, denotada por  $W$ , com elementos  $w_{ij}$  onde  $i$  e  $j$  denotam duas células arbitrárias. Se  $w_{ij}$  é 1, então as células  $i$  e  $j$  são vizinhas; se  $w_{ij}$  é zero as células não são consideradas vizinhas. A matriz  $W$  possui as seguintes características:

- Se existem  $n$  células, o tamanho da matriz  $W$  é  $n \times n$ .

- A estrutura de vizinhança depende do padrão de continuidade da variável e fatores geográficos como limites naturais e artificiais.
- $w_{ij}$  reflete a acessibilidade espacial à célula  $j$  desde a célula  $i$ . Esta relação pode ser não simétrica. Isto é,  $w_{ij} \neq w_{ji}$ .
- $w_{ii} = 0$ .

Dois métodos podem ser utilizados para definir células vizinhas (Figura 20).

- **Contigüidade.** Consideram-se vizinhas as células com uma fronteira em comum (células com um lado ou um ponto em comum).
- **Distância.** Usando uma circunferência cujo centro é o centróide de uma célula e um raio de tamanho fixo. As células cujo centróide estiver dentro da circunferência são consideradas vizinhas.

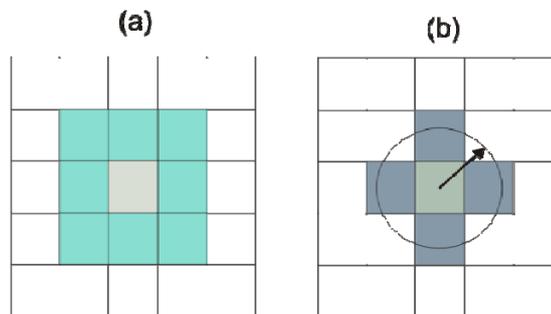


Figura 20. Métodos para definir vizinhos espaciais: contigüidade (a) e distância (b).

- b) **Cálculo de indicadores de autocorrelação espacial.** Deve-se calcular e verificar a significância estatística de indicadores da autocorrelação espacial global para cada classe de uso do solo. Uma opção é utilizar o índice de Moran's I para a percentagem da área de uma classe de uso do solo, (BIVAND, 1998):

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

Onde  $n$  é o número de células do plano celular.

$w_{ij}$  é um elemento da matriz de vizinhança  $W$ .

$y_i$  é a percentagem da área de uma classe do uso do solo em uma célula  $i$ .

$\bar{y}$  é a média das percentagens.

O índice de Moran's I satisfaz as seguintes propriedades (BAILEY e GATTREL 1995):

- Varia entre  $-1$  e  $1$ .
- Valor próximo a  $1$  significa que células vizinhas tendem a ter valores similares, autocorrelação espacial positiva.
- Valor próximo a  $-1$  significa que células vizinhas tendem a ter valores dissimilares, autocorrelação espacial negativa.
- Valor próximo a  $0$  significa que áreas células tendem a ter valores sem um padrão, padrão completamente aleatório.

c) **Ajuste do modelo de regressão espacial.** O modelo de regressão espacial que incorpora a informação da vizinhança através de um efeito autoregressivo é o modelo regressão espacial com defasagem, ou *spatial lag*, (BIVAND, 1998). O modelo de regressão espacial com defasagem se baseia no modelo linear de regressão clássico, Equação 5. A Equação 8 apresenta o modelo de regressão espacial com defasagem:

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon \quad (8)$$

Onde o novo termo  $\rho WY$  denota a componente autoregressiva ou a influência da vizinhança expressada pela matriz  $W$  e  $\rho$  é um parâmetro desconhecido.

A Figura 21 apresenta o enfoque da regressão espacial na modelagem da influência dos impulsores de mudanças sobre a percentagem da área de cada classe de uso do solo.

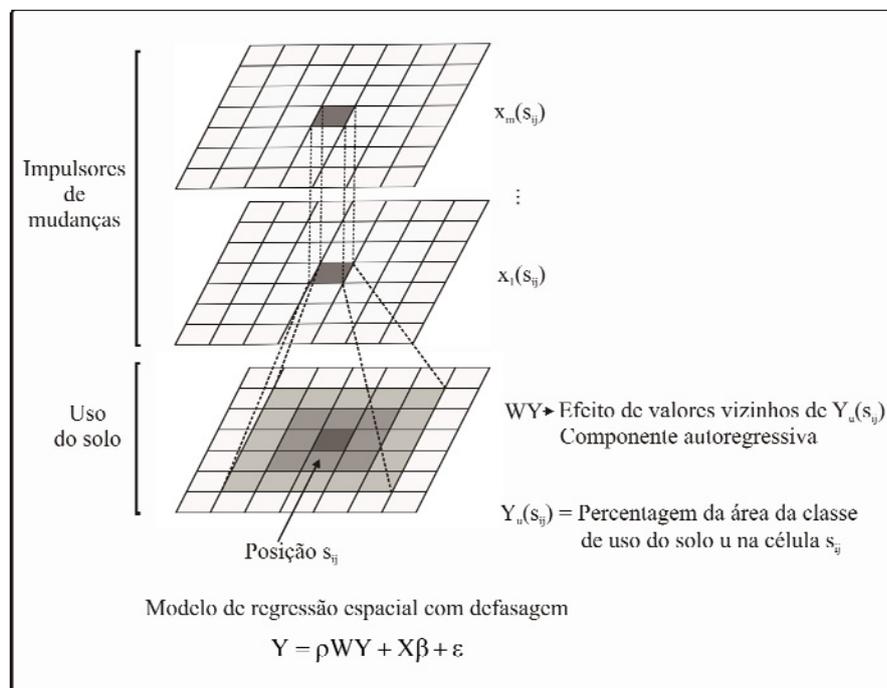


Figura 21. O enfoque da regressão espacial.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Descrição da metodologia

Nesta seção descrevem-se as atividades que compõem a metodologia proposta na dissertação.

#### Etapa I. Organização da Base de Dados

- a) **Criação do SIG.** Esta etapa consiste da coleta, organização, processamento e organização dos dados usados no estudo de caso. Com este intuito, foi criado um sistema de informação geográfica (SIG). Os planos de informação da base espacial precisam estar em uma projeção cartográfica, por exemplo, UTM. Isto é uma condição para o preenchimento do plano celular usando para o caso de distancias.
- b) **Processamento de planos de informação.** As operações mais freqüentes são transformação de coordenadas, depuração de erros e inconsistências das bases de dados espaciais, geração de novos planos de informação e operações com planos de informação, geração e edição de mapas.
- c) **Determinação do plano celular.** Uma decisão importante na determinação do plano celular é o tamanho da célula. Em muitas aplicações é usado  $1 \text{ km}^2$ . Todas as variáveis (uso do solo, impulsores de mudanças, restrições espaciais) são representadas no plano celular. Por tanto, a análise estatística e as simulações dependem da resolução espacial e cálculos realizados no preenchimento do plano celular (Figura 22).

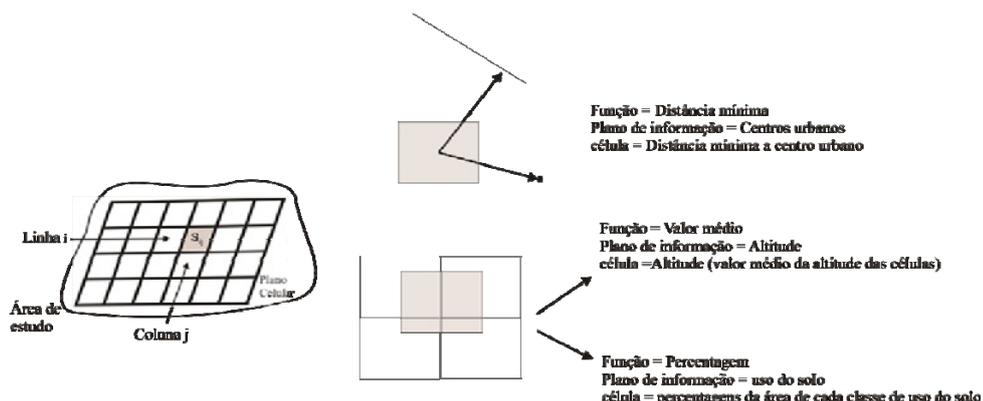


Figura 22. Preenchimento do plano celular.

- c) **Determinação de cenários de demanda do uso do solo.** Esta etapa não é realizada na interface disponível para o modelo CLUE-S. Diferentes modelos entre simples extrapolações de tendências até modelos econômicos complexos podem ser usados.

## Etapa II. Análise estatística

- c) **Análise estatística exploratória.** Esta fase auxilia a compreensão dos processos envolvidos nas mudanças do uso do solo na região de estudo. Além disso, esta atividade serve para verificar a presença de erros, valores extremos e possíveis transformações das variáveis. Por tanto, esta atividade é um pré-requisito para a modelagem estatística. Considerar estatísticas descritivas de correlação e análise multivariada, construção de histogramas, Box-plots, gráficos de dispersão, entre outros.
- c) **Regressão logística.** O modelo de regressão logística pode ser ajustado utilizando o método de seleção de variáveis *step-wise* com probabilidade de entrada e saída, 0,01 e 0,02, respectivamente. Estas opções são recomendadas para grandes volumes de dados (VERBURG, 2008). A avaliação do ajuste do modelo ajustado utiliza a curva ROC ou Receiver Operating Characteristic (KLEINBAUM e KLEIN, 2002). Um modelo ajustado é considerado satisfatório quando a área abaixo a curva ROC é próximo a 1. A regressão logística se encontra disponível em programas estatísticos tais como o R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009) e o SPSS (SPSS, 2006).
- c) **Regressão espacial.** O ajuste do modelo de regressão espacial consiste das seguintes etapas: cálculo de matriz de vizinhança, cálculo de indicadores de autocorrelação espacial, ajuste do modelo de regressão espacial e avaliação do modelo estimado. A escolha do melhor modelo se fundamenta no valor de AIC ou Akaike Information Criterion (ARBIA, 2006), expressado pela Equação (9).

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (9)$$

Onde  $k$  é o número de parâmetros e  $L$  é o máximo valor da função de verossimilhança. O modelo com menor valor de AIC corresponde ao modelo de melhor ajuste.

## Etapa III. Simulação CLUE-S

A versão de demonstração, denominada de Dyna-CLUE, pode ser obtida no site <http://www.cluemodel.nl/>. O programa pode ser executado a partir do diretório de instalação, por exemplo, C:\CLUE, onde também são armazenados os arquivos de dados, os arquivos de parâmetros e os resultados das simulações. Executa-se o arquivo `clues.exe` para ter acesso à interface principal do CLUE-S. A interface principal permite criar e modificar os arquivos de parâmetros e executar a simulação.

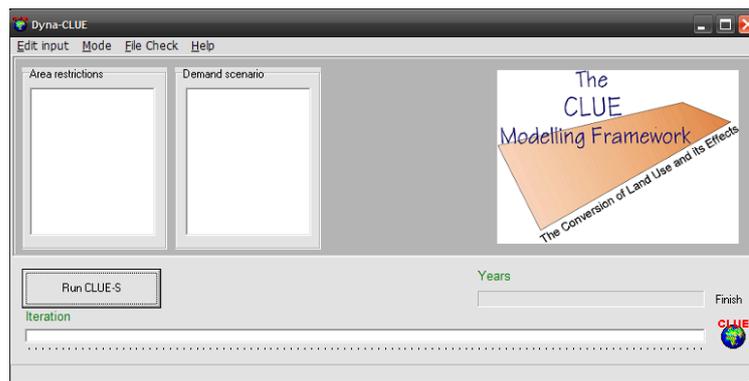


Figura 23. Interface principal do Dyna-CLUE.

O menu principal é descrito pelas seguintes opções, mostrada na Figura 23.

- **Edit Input** permite a criação e edição de arquivos de parâmetros principais, resultados da regressão, matriz de conversão e definição de vizinhanças.
- **Mode** permite a obtenção de mapas de probabilidade.
- **File Check** permite verificar a consistência dos arquivos de parâmetros.
- **Help** permite aceder ao arquivo de ajuda.

O CLUE-S utiliza arquivos de parâmetros, formato texto, e arquivos de dados espaciais, no formato ASCII raster. As saídas da simulação são armazenadas no mesmo diretório de instalação do CLUE-S. Para realizar outra simulação com parâmetros diferentes é aconselhável nomear os arquivos de saída com outro nome ou realizar a simulação em outro diretório. Os arquivos de parâmetros e dados espaciais são reconhecidos pelo CLUE-S através de nomes preestabelecidos e codificados. A Tabela 2 resume os arquivos usados no programa CLUE-S.

Tabela 2. Arquivos utilizados na simulação no CLUE-S.

Arquivos	Descrição	Nome do arquivo	Tipo de arquivo
Entrada	Parâmetros principais	main.1	Texto
Parâmetros	Resultados da regressão	alloc1.reg	Texto
	Matriz de conversão	allow.txt	Texto
Entrada	Uso do solo para o ano inicial	cov_all.0	ASCII raster
Dados	Impulsores de mudanças		
	Estáveis	sc1gr#.fil	ASCII raster
	Dinâmicos	sc1gr#.*	ASCII raster
	Áreas de restrição espacial	regi*.fil	ASCII raster
	Cenário de demanda agregada	demand.in#	Texto
Saídas	Mapas de probabilidade	prob1_*.1	ASCII raster
	Arquivo log	log.fil	Texto
	Saídas da simulação	cov_all.*	ASCII raster

\* e # indicam códigos numéricos.

- a) **Arquivos de parâmetros principais.** Esta opção permite definir os parâmetros da configuração da simulação. Estes parâmetros são armazenados no arquivo de texto denominado de main.1. Este arquivo é descrito na Tabela 3, Verbug (2008).

Tabela 3. Descrição do arquivo principal de parâmetros main.1.

Linha	Descrição	Formato
1	Número de classes de usos do solo.	Inteiro
2	Número de regiões.	Inteiro
3	Número máximo de variáveis independentes na equação de regressão.	Inteiro
4	Número máximo de impulsores de mudanças.	Inteiro
5	Número de linhas do plano celular.	Inteiro
6	Número de colunas do plano celular.	Inteiro
7	Área da célula do plano celular em hectares.	Real
8	Coordenada do eixo X no ponto inferior esquerdo do plano celular.	Real
9	Coordenada do eixo Y no ponto inferior esquerdo do plano celular.	Real
10	Códigos para as classes de uso do solo.	Inteiro
11	Códigos para as elasticidades.	Real
12	Variável de iteração.	Real
13	Ano inicial e final da simulação.	Inteiro
14	Número e código dos impulsores de mudanças dinâmicos.	Inteiro
15	Tipo de arquivo de saída.	Inteiro (-2, 0, 1, 2)
16	Escolha de regressões regionais.	Inteiro (0, 1, 2)
17	Inicialização da história do uso do solo.	Inteiro (0, 1, 2)
18	Escolha de função de vizinhança.	Inteiro (0, 1, 2)
19	Adição de preferências locais	Inteiro (0, 1)

#### Observações

1. Linha 1. Devem ser utilizadas unicamente classes que participam do processo da dinâmica do uso do solo. Classes que não mudam expressivamente são consideradas na classe Outros. A classe Outros permanece constante no período da simulação.
2. Linha 2. Usualmente igual a 1. Pode ser utilizado um número maior quando existem áreas com geomorfologias diferentes ou no caso de ilhas.
3. Linha 3. Número máximo de impulsores estáveis de mudanças na equação de regressão logística.
4. Linha 10. Códigos para as classes do uso do solo: 0 para a primeira classe, 1 para a segunda classe, e assim em diante. A ordem das classes de uso do solo é determinada inicialmente na codificação do mapa do uso do solo. Esta ordem é usada na configuração da simulação, por exemplo, na ordem dos códigos das elasticidades na linha 11.
5. Linha 12. O critério de convergência do CLUE-S pode ser especificado em termos da porcentagem da demanda do uso do solo, opção com valor 0, ou em termos de valores

absolutos da demanda, opção 1. O CLUE-S utiliza dois critérios de convergência. O primeiro critério usa a desvio médio entre a área de demanda e o alocado no processo de iteração. De acordo com Verburg (2008), para a opção em termos da percentagem, o valor do desvio médio deve ser de pelo menos 0,35. Para a opção em termos do valor absoluto, o valor de referência deve ser de pelo menos a área de uma célula dividido pelo número de classes de uso do solo. O segundo critério de convergência utiliza o desvio máximo entre a demanda e o alocado no processo de iteração. Para o caso da percentagem, o valor por defeito é 3. Para o caso do valor absoluto, o valor do desvio máximo deve ser pelo menos a área de uma célula.

6. Linha 14. No caso de utilizar impulsores de mudanças dinâmicos, deve-se especificar o número e o código respectivo de cada impulsor.
7. Linha 15. Permite definir o tipo de formato do arquivo para as simulações.
  - Opção 1. Corresponde a saída das simulações com cabeçalho no formato do ArcGIS - ArcView.
  - Opção 0. Saídas sem cabeçalho, próprias para o IDRISI.
  - Opção 2. Corresponde a saída com cabeçalho no formato do ArcGIS - ArcView e suprime a informação das iterações no arquivo log.
  - Opção -2. Saídas sem cabeçalho e suprime a informação das iterações no arquivo log.
8. Linha 16. Permite rodar regressões específicas para diferentes regiões dentro da área de estudo.
  - Opção 0. Utiliza uma única regressão para toda a área de estudo.
  - Opção 1. Diferentes regressões para diferentes regiões e demanda agregada do uso do solo específica para cada região.
  - Opção 2. Diferentes regressões para diferentes regiões e uma única demanda agregada do uso do solo para toda a região.
9. Linha 17. O CLUE-S considera a história do uso do solo na modelagem dinâmica. Usualmente, isto é desconhecido, por tanto, um número aleatório é gerado.
  - Opção 0. A história inicial do uso do solo é lida do arquivo age.0, um arquivo de formato ASCII raster, contendo para cada célula o número de anos que a classe de uso do solo atual aconteceu.

Opção 1. Um número aleatório é gerado para cada célula para representar o número de anos que a classe atual do uso do solo se encontra presente em uma célula. Com esta opção, duas simulações usam o mesmo gerador aleatório.

Opção 2. Um número aleatório é gerado para cada célula para representar o número de anos que a classe atual do uso do solo se encontra presente em uma célula. Neste caso, duas simulações usam diferentes geradores aleatórios, ou seja, diferentes históricos do uso do solo.

Para a opção 1 e 2, deve se especificar o máximo número de anos que pode se simular.

10. Linha 18. Permite ativar ou desativar a utilização de função de vizinhança.

Opção 1. Função de vizinhança não é usada.

Opção 2. Função de vizinhança é usada.

Opção 3. Calcula unicamente as influências utilizando a função de vizinhança, armazenado em um arquivo e não é realizada a simulação.

11. Linha 19. Ativa (opção 1) ou desativa (opção 0) a adição de preferências específicas.

b) **Resultados da regressão.** Nesta opção especifica-se o resultado do ajuste do modelo de regressão logística para cada classe do uso do solo. Estes resultados são armazenados no arquivo de texto `alloc1.reg`. A estrutura do arquivo `alloc1.reg` é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Estrutura do arquivo de resultados da regressão.

Linha	Descrição
Linha 1	Código da classe de uso do solo.
Linha 2	Constante da equação de regressão.
Linha 3	Número de covariáveis na equação de regressão.
Linha 4 e linhas seguintes.	Em cada linha, o coeficiente de regressão e o código para cada impulsor de mudança no modelo.

c) **Matriz de conversão.** A matriz de conversão especifica as mudanças entre as classes de uso do solo que são permitidas e as que não são permitidas. Deve-se fornecer um arquivo de texto no formato de uma matriz quadrada de tamanho igual ao número de classes de uso do solo. Este arquivo é denominado `allow.txt`. Os valores da matriz podem ser 1, se é permitida a conversão entre classes de uso do solo, e 0, a conversão não é permitida. A matriz de conversão foi introduzida na Seção 3.3. A Figura 24 mostra um exemplo de uma matriz de conversão com quatro classes de uso do solo. A ordem das colunas é determinada na linha 10.



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
1	0	0	0	
1	1	1	0	
1	1	1	0	
0	0	0	1	

Figura 24. Exemplo de matriz de conversão.

- d) **Uso do solo para o ano inicial.** Deve-se especificar em um arquivo a classificação do uso do solo para o ano inicial. Um arquivo ASCII-raster, denominado `cov_all.0`, contendo os códigos de cada classe de uso do solo deve ser especificado. Os códigos são números inteiros começando do zero. A ordem destes códigos deve-se manter nos seguintes arquivos: arquivo principal (`main.1`), arquivo de resultados da regressão (`alloc1.reg`), arquivo de matriz de conversão (`allow.txt`) e no arquivo de demanda agregada do uso do solo (`demand.in1`).
- e) **Impulsores de mudanças.** O CLUE-S especifica dois tipos de arquivos, um para impulsores de mudanças estáveis e outro para impulsores de mudanças dinâmicos, descritos na Seção 2.3. Devem-se fornecer arquivos no formato ASCII-raster para os impulsores de mudanças. No caso de impulsores estáveis, o nome do arquivo tem o formato `sc1gr#.fil` onde `#` indica o código do impulsor de demanda. Os códigos dos impulsores de mudanças são números inteiros que começam no zero.
- Para o caso de impulsores dinâmicos o nome tem o seguinte formato `sc1gr#.*` onde `#` indica o código correspondente a um impulsor de mudança e `*` especifica o ano. Neste caso, devem-se fornecer arquivos do impulsor de mudança dinâmico para cada ano do período de simulação.
- f) **Restrições de área.** Áreas de restrição espacial limitam as mudanças do uso do solo em determinadas células. Isto é, as células não mudam de valor durante a simulação. Deve ser especificado um arquivo ASCII-raster, denominado `regi*.fil`, contendo o valor 0 para as células plausíveis de mudanças e um valor negativo para aquelas células que não podem mudar. No caso de ter uma única área de restrição espacial deve-se usar o valor -9998, mostrado na Figura 25. No caso de existir duas áreas de restrições, devem-se usar os valores -9998 e -9997. O valor -9999 é reservado para especificar células fora da área de estudo. O símbolo `*` especifica um texto específico para cada área de restrição.

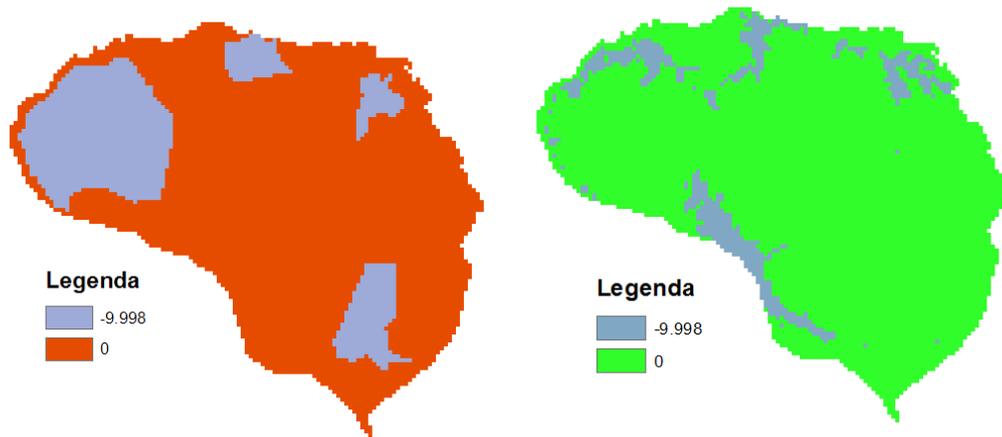


Figura 25. Exemplo de áreas com restrição espacial.  
Adaptado de Verburg (2008).

g) **Cenários da demanda agregada do uso do solo.** Cenários da demanda agregada do uso do solo são especificados em unidades de área em hectares. No caso de existir um único cenário de demanda, um arquivo de texto com nome demand.in1. Se existirem dois cenários de demanda, os arquivos são denominados demand.in1 e demand.in2. Um exemplo de um arquivo de cenário de demanda é mostrado na Figura 26. A primeira linha corresponde ao número de linhas no arquivo, ou seja, o ano inicial mais os anos considerados na simulação. A segunda linha corresponde à demanda para o ano zero, ou ano inicial, para cada uma das classes de uso do solo considerado. A partir da terceira linha em diante, se considera a demanda do uso do solo para os anos sucessivos em que a simulação é desenvolvida.

The screenshot shows a WordPad window titled 'demand.in1 - WordPad'. The window contains a table of data with 5 columns and 20 rows. The first row is a header with the number 15. The subsequent rows contain numerical values representing demand for different land use classes over time.

15				
29518.75	7237.5	5243.75	1400	1762.5
29267.41071	7349.107143	5354.910714	1428.571429	1762.5
29016.07143	7460.714286	5466.071429	1457.142857	1762.5
28764.73214	7572.321429	5577.232143	1485.714286	1762.5
28513.39286	7683.928571	5688.392857	1514.285714	1762.5
28262.05357	7795.535714	5799.553571	1542.857143	1762.5
28010.71429	7907.142857	5910.714286	1571.428571	1762.5
27759.375	8018.75	6021.875	1600	1762.5
27508.03571	8130.357143	6133.035714	1628.571429	1762.5
27256.69643	8241.964286	6244.196429	1657.142857	1762.5
27005.35714	8353.571429	6355.357143	1685.714286	1762.5
26754.01786	8465.178571	6466.517857	1714.285714	1762.5
26502.67857	8576.785714	6577.678571	1742.857143	1762.5
26251.33929	8688.392857	6688.839286	1771.428571	1762.5
26000	8800	6800	1800	1762.5

Figura 26. Exemplo de cenário de demanda agregada do uso do solo.  
Adaptado de Verburg (2008).

Três questões importantes que ajudam na configuração deste arquivo são:

- A ordem das colunas deve respeitar a ordem definida no arquivo main.1 na linha número 10.
- Para cada ano (linha), a soma das demandas do uso do solo para cada classe (coluna) deve ser igual.
- A variação, aumento ou diminuição, da demanda do uso do solo pode ser função da área da célula do plano celular.

- h) **Mapas de probabilidade.** Uma opção interessante do CLUE-S é o cálculo de um arquivo no formato ASCII-raster das probabilidades obtidas do ajuste do modelo de regressão logística para cada classe do uso do solo. Estas saídas são armazenadas em arquivos denominados `probl_*.1`, onde o símbolo \* corresponde a uma classe de uso do solo. Os mapas de probabilidade permitem verificar espacialmente a relação entre os impulsores de mudanças e ocorrência de uma classe de uso do solo.
- i) **Arquivo log.** O CLUE-S fornece um arquivo com o relatório das configurações dos parâmetros de entrada e informação das iterações da simulação para todos os anos. Estas informações são armazenadas no arquivo de texto `log.fil`. O arquivo `log` é útil para corrigir erros e verificar a convergência do CLUE-S em cada ano.
- j) **Saídas da simulação.** O resultado das simulações são arquivos no formato ASCII-raster para cada ano do período da simulação. Estas simulações são armazenadas em arquivos denominados `cov_all.*` onde o símbolo \* corresponde ao ano da simulação.

### **Análise das simulações**

As simulações geradas utilizando os enfoques da regressão logística e da regressão espacial foram comparadas de duas formas:

- Comparação da evolução espacial das classes de uso do solo.
- Comparação das simulações de ambos os enfoques com respeito a um ano de referência.

A Figura 27 apresenta as etapas da metodologia.

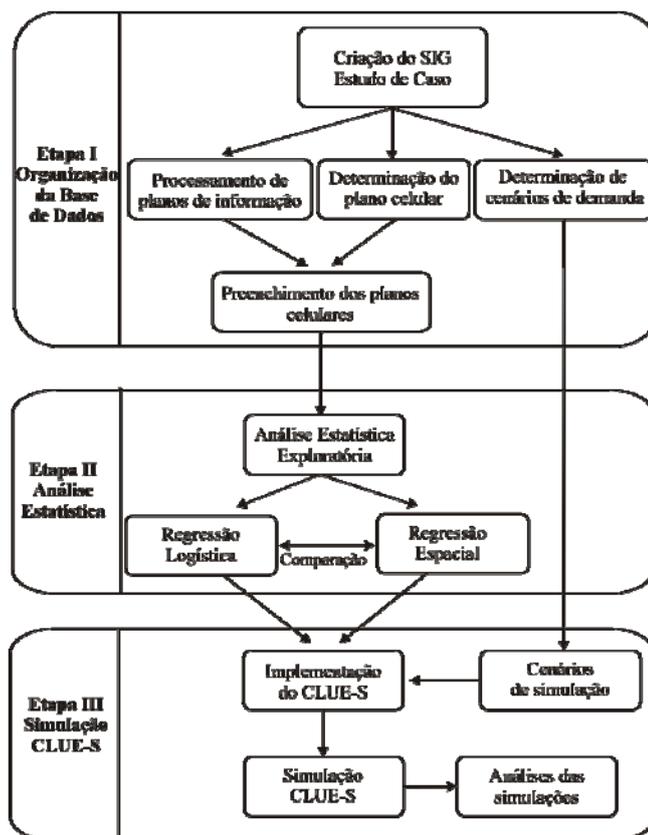


Figura 27. Fluxograma da metodologia.

## 4.2 Programas

Os seguintes programas foram utilizados para o desenvolvimento da metodologia.

- a) **ArcGIS 9.3** e **Terraview 3.2.0**. Estes programas foram utilizados para organizar a base de dados e manipular os dados espaciais ou planos de informação (ESRI, [www.esri.com](http://www.esri.com) e INPE, [www.dpi.inpe.br/terraview](http://www.dpi.inpe.br/terraview)).
- b) **Módulo “Preenchimento celular” do Terraview**. A versão atual deste módulo funciona unicamente com a versão 3.2.0 do Terraview, não é compatível com versões posteriores do Terraview, por exemplo, as versões 3.2.1 e 3.3. Este módulo é utilizado para preencher o plano celular usando uma função específica aplicada sobre um plano de informação. Por exemplo, se o plano de informação é uma rede de estradas representado no formato vetorial, pode-se calcular para cada célula a distância mínima à estrada.

O módulo está disponível livremente no site [www.dpi.inpe.br/~anapaula/plugin\\_celulas](http://www.dpi.inpe.br/~anapaula/plugin_celulas), mostrado na Figura 28.

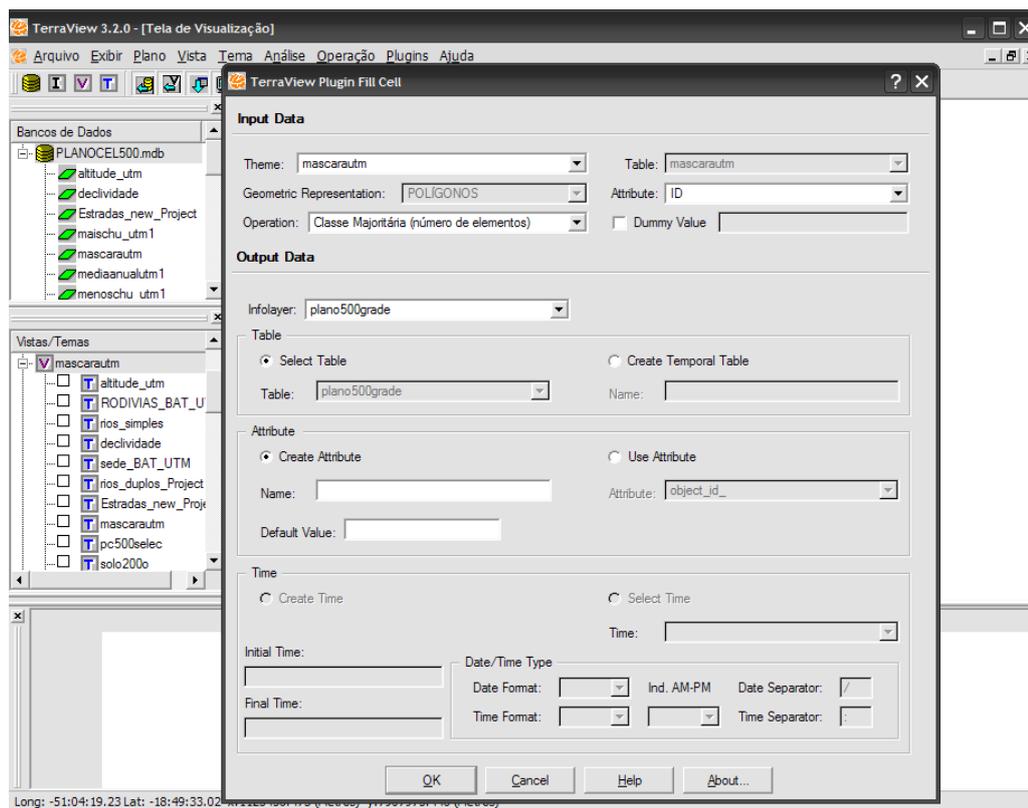


Figura 28. Interface do módulo Preenchimento Celular.

- c) **R versão 2.8.0.** O R é um programa estatístico de domínio público e pode ser obtido no site [www.r-project.org/](http://www.r-project.org/). Este programa possui a linguagem de programação S e muitos pacotes de livre acesso para análise estatística e edição de gráficos. A interface principal do R é mostrada na Figura 29.

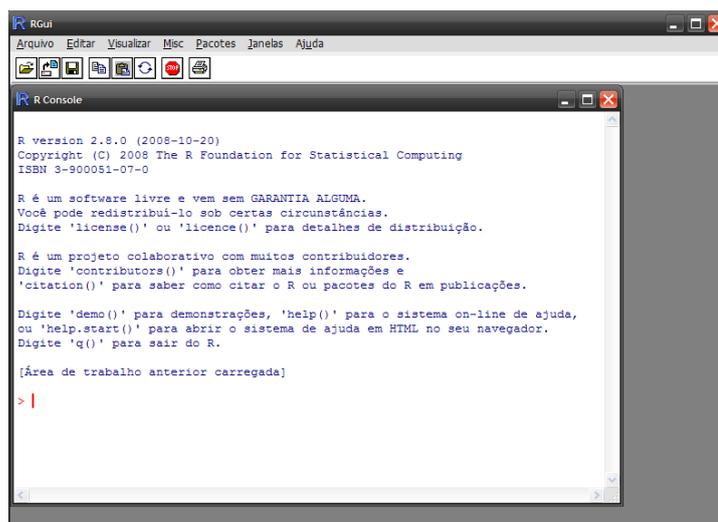


Figura 29. Interface principal do programa R.

d) **GEODA versão 0.9.5-i5**. O GEODA é um programa de domínio público voltado para a análise estatística espacial. Especificamente para analisar dados de área. Pode ser obtido do site <http://www.sal.uiuc.edu/>, mostrado na Figura 30. Este programa é descrito em Anselin (2005).

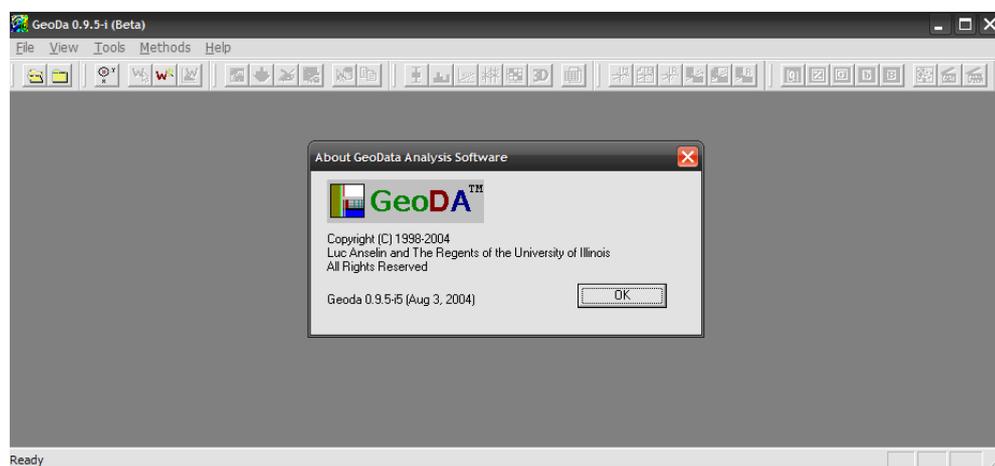


Figura 30. Interface do programa GEODA.

e) **Dyna-CLUE**. A versão atual do modelo CLUE-S é denominada de Dyna-CLUE. A Figura 31 apresenta a página principal do CLUE-S (<http://www.cluemodel.nl/>), onde pode ser obtida a versão de avaliação do programa Dyna-CLUE. Esta versão tem as seguintes restrições:

- Máxima dimensão do plano celular (linhas, colunas): 108 x 128
- Máximo número de tipos de uso do solo: 5
- Máximo número de regiões: 1
- Máximo número de impulsores de mudanças: 11 em 1 equação, 13 em total.

Nesta dissertação foi utilizada uma versão do Dyna-CLUE que permitiu atender a demanda da simulação para o caso de estudo. Esta versão foi cedida por Peter Verburg.

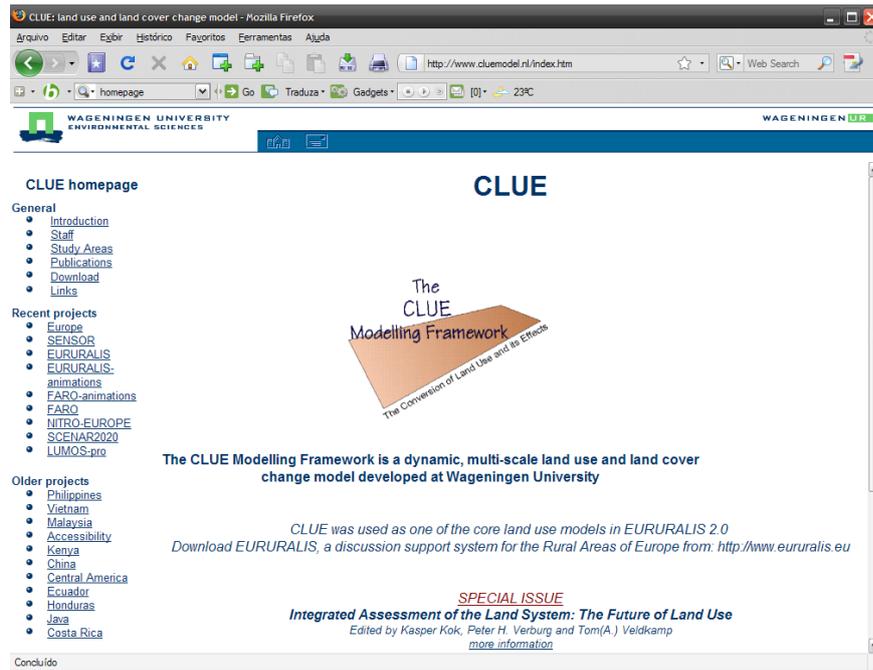


Figura 31. Site do CLUE-S. Acessado em 10/08/2008.

A Figura 32 esquematiza o fluxo de informações entre os programas utilizados dentro de cada uma das componentes da metodologia.

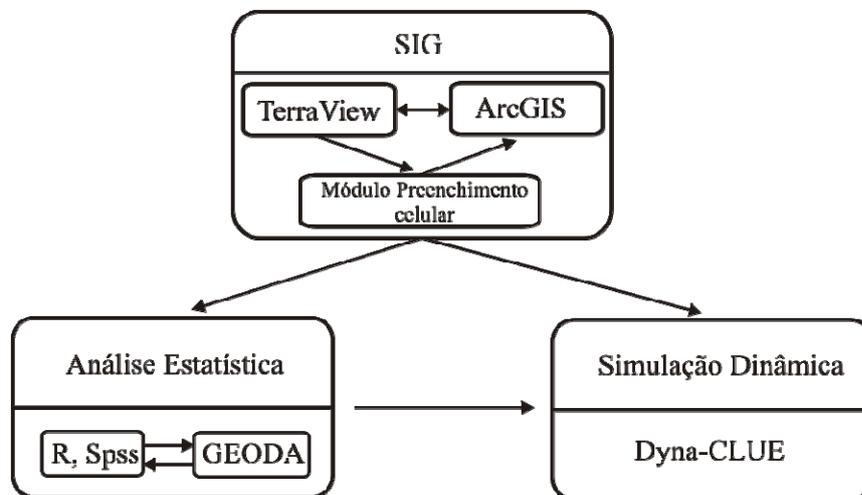


Figura 32. Relações entre os programas usados na metodologia.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Descrição do estudo de caso

O estudo de caso corresponde à região da microbacia do Coxim na bacia do Alto Taquari (BAT). A BAT corresponde a uma região de planalto com altitude variando entre 200m a 900m, com uma área de 28.046 km<sup>2</sup>, segundo Silva (2003). A BAT esta localizada na região Centro-Oeste do Brasil entre os estados de Mato Grosso do Sul (MS) (86,5%) e do Mato Grosso (MT) (13,5%). A Figura 33 apresenta a localização, limites e os municípios que a BAT pertence.

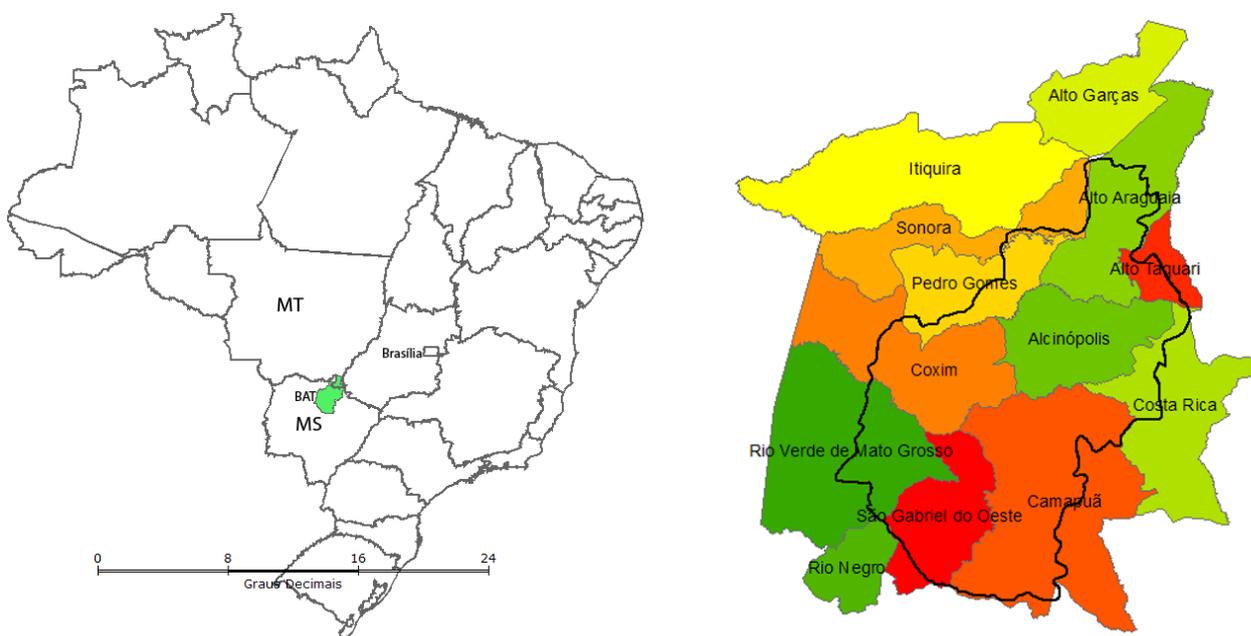


Figura 33. Localização da Bacia do Alto Taquari (BAT), MS.

As principais atividades humanas da região são agricultura (soja e milho) cobrindo 7% da área total e pecuária (pastagem cultivada) correspondendo a 55% da área total. A vegetação nativa (cerrado) corresponde a 38% da área, Silva (2003). Os incentivos fiscais do governo redirecionaram a expansão de fronteiras agrícolas e o sistema produtivo nos planaltos da BAP, principalmente voltadas para a atividade agropecuária.

A BAT tem sido o caso de estudo de vários projetos. Um dos principais alvos de estudo na região foi o problema ambiental de assoreamento. O processo de deposição de sedimento pelo rio Taquari na sua planície de inundação é um fenômeno natural, mas este processo foi intensificado, na década de 70, devido à expansão desordenada da atividade agropecuária, Galdino *et al.* (2003).

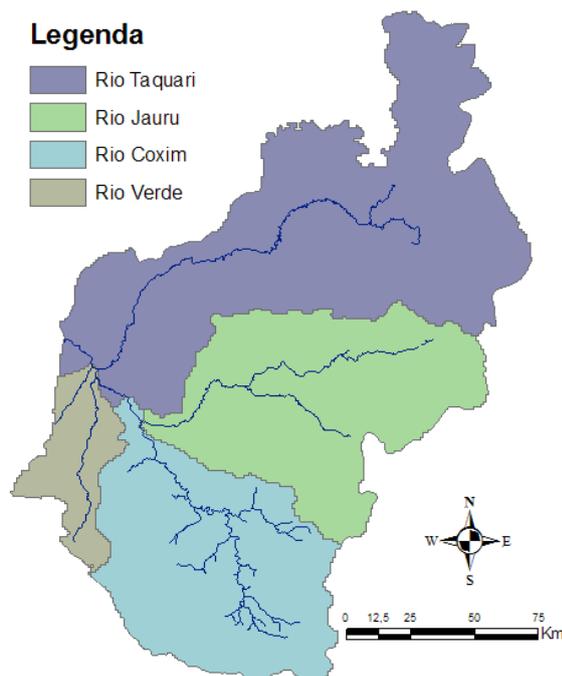


Figura 34. Microbacias hidrográficas que conformam o BAT.

O interesse principal do estudo de caso é analisar a dinâmica das mudanças do uso solo mediante a simulação dinâmica do CLUE-S na microbacia do Coxim no período 2001 a 2011. A microbacia do Coxim é mostrada na Figura 34. A eleição desta microbacia se deve ao fato de ser considerada como representativa da BAT, e também, pela demanda computacional dos processos da análise de regressão espacial e da simulação CLUE-S.

## 5.2 Resultados

Esta seção apresenta os resultados da aplicação da metodologia ao estudo de caso. A montagem da base de dados espacial considerou toda a extensão geográfica da BAT. Desta forma, dados espaciais foram integrados em um SIG para toda a BAT. A análise das mudanças do uso do solo através da simulação do CLUE-S se restringiu à microbacia de Coxim.

## Etapa I Organização da base de dados

c) **Planos de informações.** A Tabela 5 apresenta os planos de informações utilizados para compor o SIG da BAT. Usando os planos de informação da temperatura (máxima, mínima e média) e altitude, apresentados na Tabela 5, mapas topoclimáticos para a temperatura máxima, mínima e média foram calculados. Estes planos de informação são denominados de topotérmicos e denotam a variação da temperatura em função da posição espacial e da altitude.

Tabela 5. Planos de informações (P.I.) utilizados da BAT.

P. I.	Descrição	Fonte
Uso do solo	Classificação do uso do solo para os anos 2001, 2002, 2003 e 2004.	Jonathan, (2005).
Declividade	Declividade (graus)	SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) INPE <a href="http://www.dpi.inpe.br/topodata">http://www.dpi.inpe.br/topodata</a>
Altitude	Altitude em metros	SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) INPE <a href="http://www.dpi.inpe.br/topodata">http://www.dpi.inpe.br/topodata</a>
Rios duplos	Rede fluvial principal	Silva, (2003).
Rios simples	Rede fluvial secundaria	Silva, (2003).
Centros urbanos	Localidade das capitais dos municípios do BAT	IBGE <a href="http://www.ibge.gov.br">http://www.ibge.gov.br</a>
Rodovias	Rede rodoviária	IBGE <a href="http://www.ibge.gov.br">http://www.ibge.gov.br</a>
Precipitação	Máxima. Trimestre com maior precipitação (dezembro, janeiro, fevereiro). Mínima. Trimestre com menor precipitação (junho, julho, agosto). Média anual. Unidade mm.	New <i>et al.</i> (2002)
Temperatura	Máxima. Médias das máximas temperaturas anuais. Mínima. Médias das mínimas temperaturas anuais. Média anual Unidade °C.	New <i>et al.</i> (2002)

- **Classificação do uso do solo.** Correspondem aos planos de informação da classificação do uso do solo para a área da BAT. Esta classificação foi obtida usando imagens multitemporais de satélite MODIS para 2001, 2002, 2003 e 2004, apresentados na Figura 35. Estes dados são o resultado do trabalho de Jonathan (2005) e usados nos trabalhos Arvor *et al.* (2007) e Arvor *et al.* (2008). A resolução espacial é de 300m. A classificação do uso solo considerou quatro classes: agricultura, cerrado, pastagem e outros. A classe outros envolveu áreas urbanas.

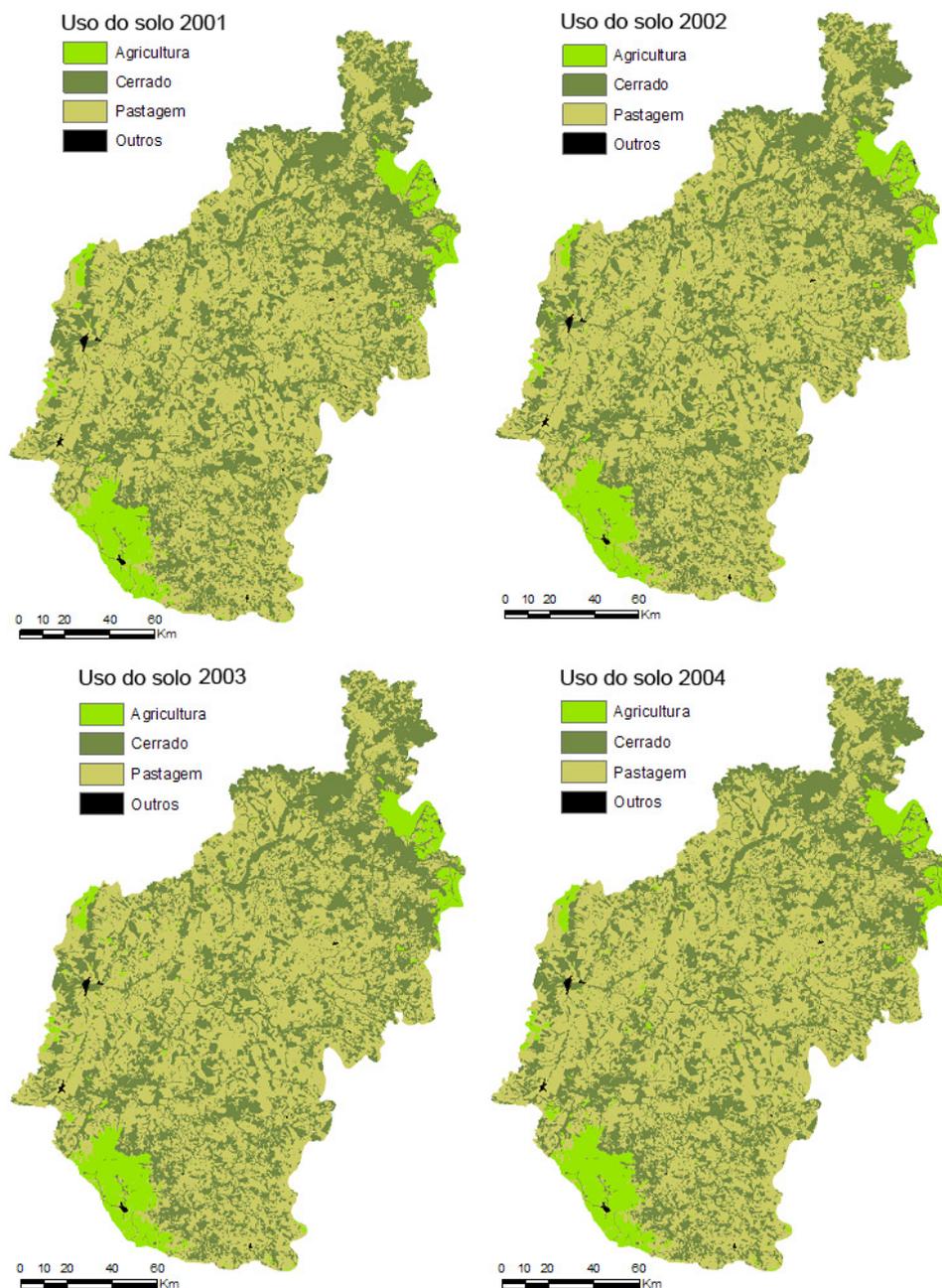


Figura 35. Classificação do uso do solo para os anos 2001, 2002, 2003 e 2004 para a BAT.

- **Declividade e altitude.** O plano de informação declividade, medida em graus, foi categorizado em 6 classes de acordo com a Tabela 6. A resolução espacial para a declividade e a altitude foi de 589 metros. Estes dados foram obtidos do projeto SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) da página TOPODATA do INPE <http://www.dpi.inpe.br/topodata>. A Figura 36 apresenta a declividade e altitude da área de estudo.

Tabela 6. Classes de declividade.

Classe de declividade	Graus
Plano	0 – 1,72
Suave ondulado	1,72 – 4,85
Ondulado	4,85 – 11,32
Forte ondulado	11,32 – 24,23
Montanhoso	24,23 – 36,87
Escarpado	36,87 ou maior

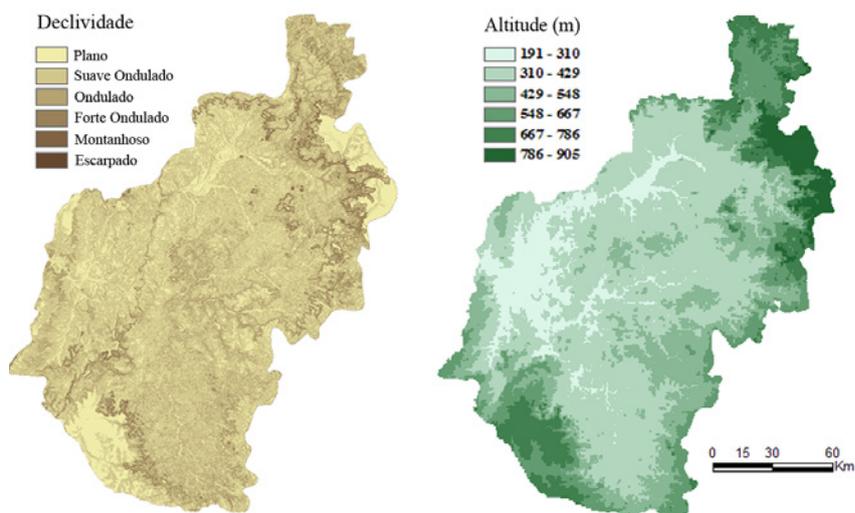


Figura 36. Classes de declividade e altitude para a BAT.

- **Rios duplos e rios simples.** Compreende a rede fluvial principal e secundária da BAT, Figura 37.

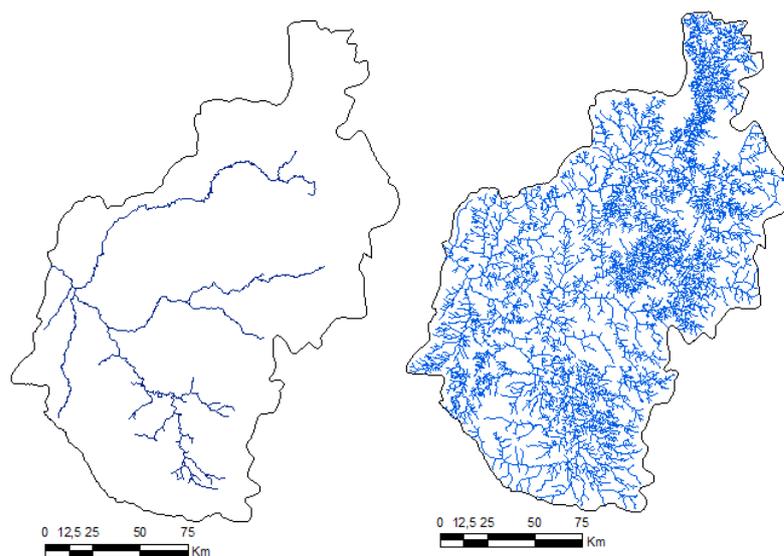


Figura 37. Redes hidrográficas para a BAT

- **Centros urbanos.** Foram considerados os nove centros urbanos mais importantes referentes à BAT, Figura 38.

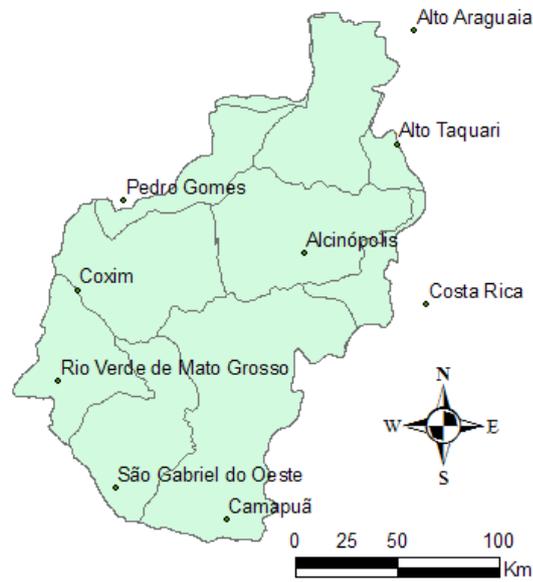


Figura 38. Centros urbanos ligados a BAT.

- **Rodovias.** Compreende as principais rodovias que cruzam a BAT, Figura 39.

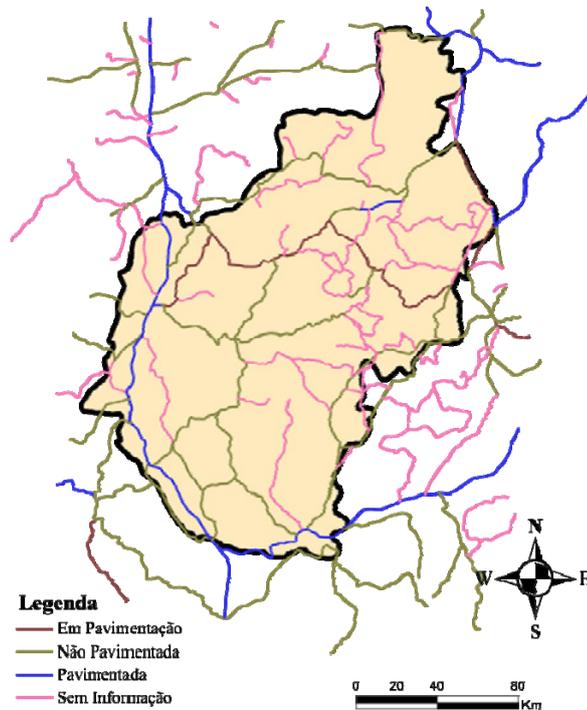


Figura 39. Rede rodoviária para a BAT.

b) **Determinação do plano celular para a BAT.** Um plano celular foi gerado para a área de estudo usando uma célula de 500m x 500m. usando o Terraview. Esta célula tem uma área de 0,25 km<sup>2</sup> ou 25 ha. O plano celular gerou 112.872 células. Depois de uma análise de consistência, detectaram-se 1.066 células fora da área de estudo e foram eliminadas, ficando o plano celular final com 111.806 células. Este plano celular cobre uma área de 27951,5 km<sup>2</sup> ou 2795150 ha. Este plano celular é mostrado na Figura 40.

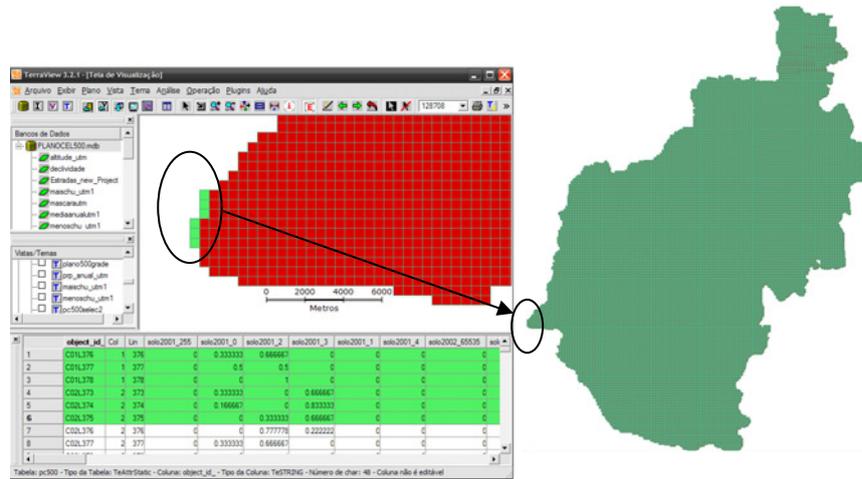


Figura 40. Plano celular com células de 500m x 500m para a BAT.

c) **Cálculo dos planos celulares.** Usando o módulo “Preenchimento celular” do Terraview foram calculados planos celulares a partir dos planos de informação descritos na Tabela 5. A Tabela 7 lista as funções utilizadas em cada plano celular. As Figuras 41, 42, 43, 44 e 45 apresentam os planos celulares gerados.

Tabela 7. Planos celulares calculados para a BAT.

Plano celular	Função
Uso do solo	Porcentagem da área de cada classe
Declividade	Porcentagem da área de cada classe
Altitude	Valor máximo
Rios duplos	Distância mínima
Rios simples	Distância mínima
Centros urbanos	Distância mínima
Rodovias	Distância mínima
Topotérmico máximo	Valor médio
Topotérmico mínimo	
Topotérmico média	
Trimestre com maior precipitação	Valor médio
Trimestre com menor precipitação	
Precipitação média anual	

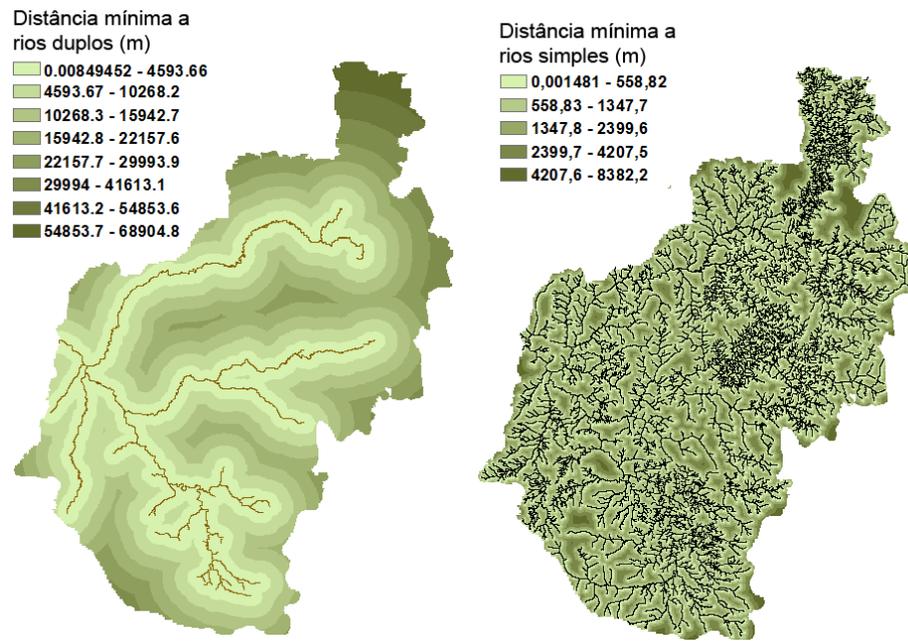


Figura 41. Planos celulares da distância mínima a rio duplo e simples, BAT.

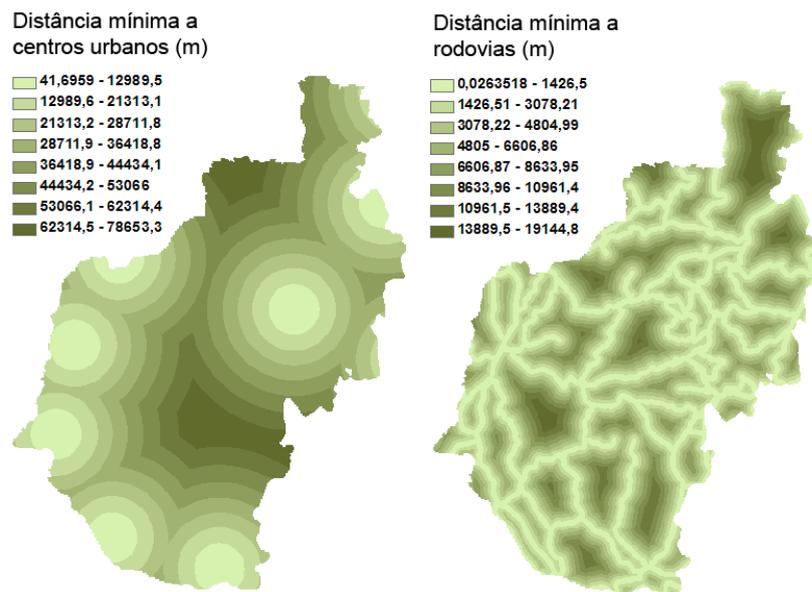


Figura 42. Planos celulares da distância mínima para os centros urbanos e as rodovias, BAT.

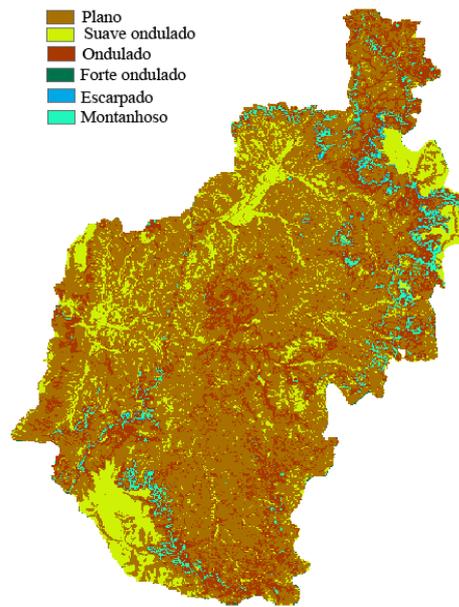


Figura 43. Plano celular para as classes de declividade do uso do solo, BAT.

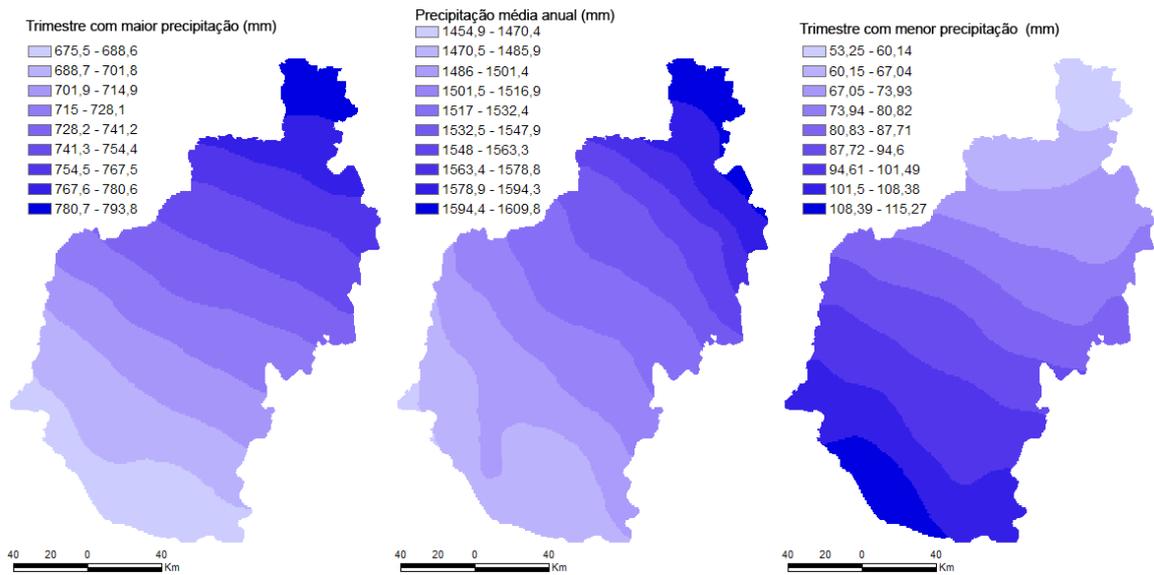


Figura 44. Planos celulares para a precipitação pluvial, trimestre mais e menos chuvosa e média anual, BAT.

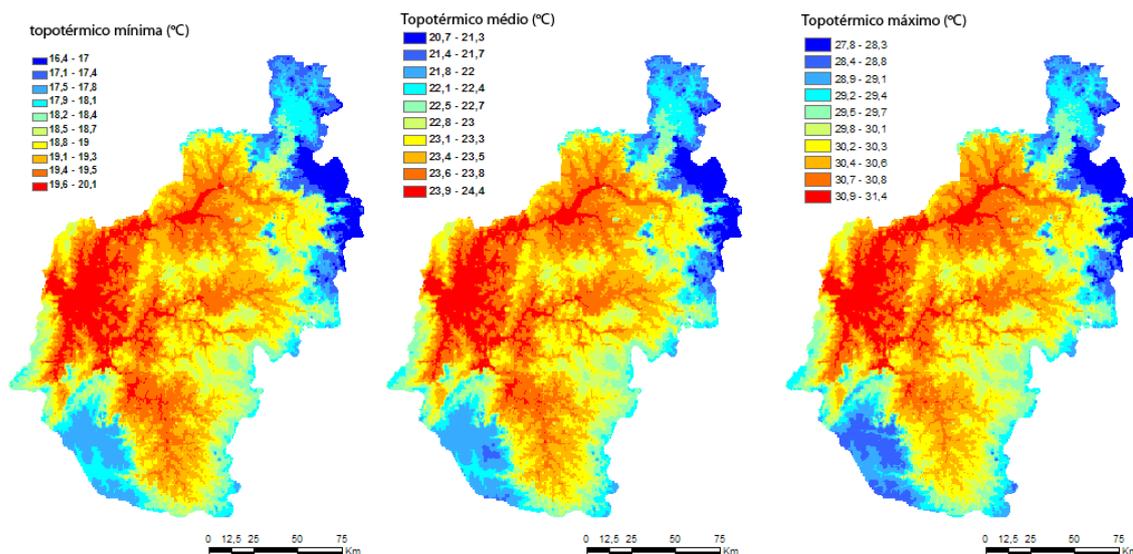


Figura 45. Planos celulares topotérmicos máximo, médio e mínimo para a BAT.

- **Plano celular para o uso do solo para a microbacia do Coxim.** Para os anos 2001, 2002, 2003 e 2004, para cada célula do plano celular foi calculada a percentagem da área de cada classe de uso do solo. Posteriormente, procedeu-se à classificação de cada célula de acordo com a classe de uso de solo com maior percentagem de área. Para esta atividade usou-se os programas do Apêndice. O número total de células para a microbacia do Coxim foi de 26.284, cobrindo uma área de 6.571 km<sup>2</sup> ou 657.100 ha.

Tabela 8. Número de células por classe de uso do solo para o período 2001-2004, microbacia de Coxim.

Ano	Agricultura	Pastagem	Cerrado	Outros
2001	3866	12639	9739	40
2002	3869	12727	9647	41
2003	3921	12772	9551	40
2004	4000	12741	9503	40

A classe Outros apresenta um valor diferente para o ano 2002, mostrado na Tabela 8. A classe Outros, a qual corresponde às áreas urbanas, é considerada constante durante a simulação. As diferenças do número total de células de uma classe do uso do solo entre dois anos consecutivos podem ser causadas por um aumento ou diminuição real dessa classe ou a erros advindos do processo de classificação da imagem. Neste caso, optou-se por reclassificar a classe Outros para obter valor de 40 células em todos os

anos. Para o ano 2002, a classe Outros ficou com 40 células e a classe Pastagem com 12728 células. A classificação final é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9. Número de células para cada classe do uso do solo para o período 2001-2004 reclassificado, microbacia de Coxim.

Ano	Agricultura	Pastagem	Cerrado	Outros
2001	3866	12639	9739	40
2002	3869	12728	9647	40
2003	3921	12772	9551	40
2004	4000	12741	9503	40

A Figura 46 apresenta a classificação do uso do solo para os anos 2001 e 2004 para o plano celular da microbacia do Coxim.

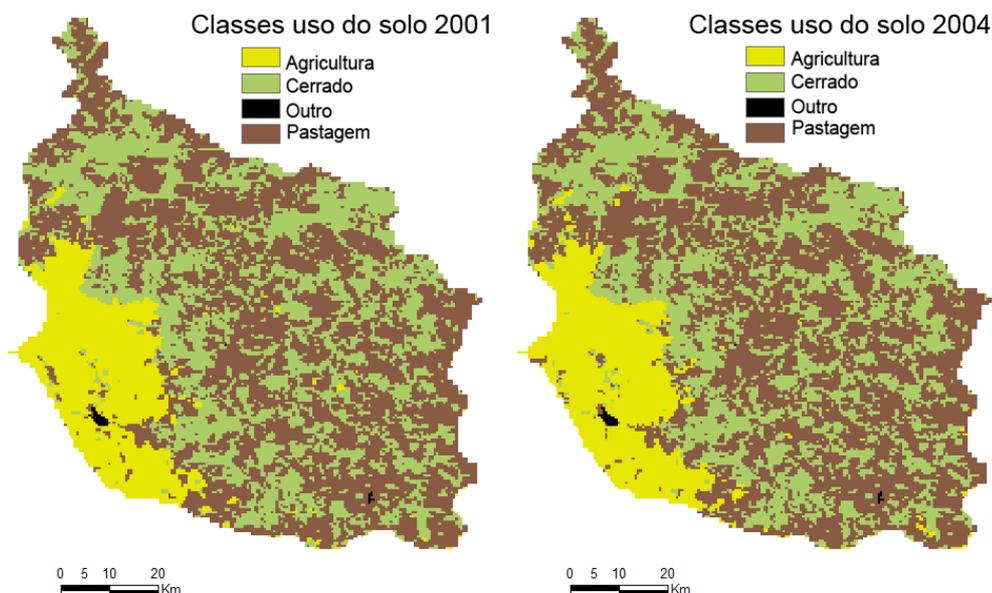


Figura 46. Classificação do uso do solo para a microbacia do Coxim, anos 2001 e 2004.

d) **Determinação de um cenário de demanda agregada do uso do solo para a microbacia de Coxim.** Foi determinado um cenário da demanda agregada para as classes do uso do solo em função da classificação da Tabela 9. A demanda agregada do uso do solo é função de unidades de área. O CLUE-S aceita unidades em hectares. Considerou-se um padrão de tendência linear para cada classe de uso do solo. O ajuste linear considerou o ano 2004 como o ano referencial para o ajuste. O cenário gerado é mostrado na Tabela 10 e na Figura 47.

Tabela 10. Cenário da demanda agregada para a classe do uso do solo em hectares. Período 2001 – 2010, microbacia de Coxim.

Anos	Agricultura	Pastagem	Cerrado	Outro
2001	96650	315975	243475	1000
2002	97775	316825	241500	1000
2003	98900	317675	239525	1000
2004	100025	318525	237550	1000
2005	101150	319375	235575	1000
2006	102275	320225	233600	1000
2007	103400	321075	231625	1000
2008	104525	321925	229650	1000
2009	105650	322775	227675	1000
2010	106775	323625	225700	1000
2011	107900	324475	223725	1000

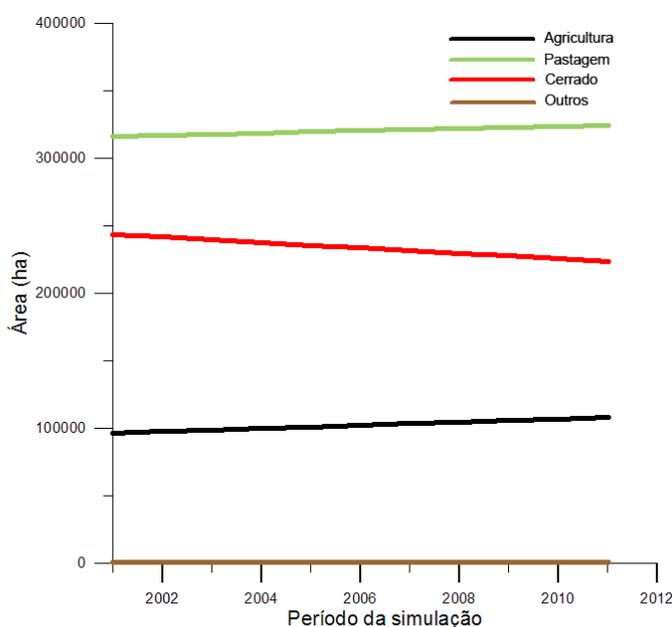


Figura 47. Cenário da demanda agregada para as classes do uso do solo para o período 2001 - 2011, microbacia de Coxim.

## Etapa II Análise estatística para a microbacia do Coxim

- a) **Análise estatística exploratória.** Nesta etapa, apresentamos os resultados da análise estatística. O número total de dados ou células é 26.284. A partir da análise descritiva, Tabela 11 e Figuras 48, 49, 50, 51 e 52, todas as variáveis apresentam histogramas assimétricos. As variáveis foram transformadas utilizando o logaritmo natural com o intuito de ganhar mais simetria. Estas variáveis transformadas foram consideradas na modelagem da regressão logística e regressão espacial com defasagem.

Tabela 11. Estatísticas descritivas dos impulsores de mudanças para a microbacia de Coxim.

Impulsores de mudanças	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Distância mínima a centro urbano (m)	41,7	68522,9	28571,5	14415,9
Distância mínima a rodovia (m)	0	13213,6	806,4	2189,9
Distância mínima a rio simples (m)	0	6024,6	900,3	929,7
Distância mínima a rio duplo (m)	0	31929,7	6159,2	6436,9
Altitude (m)	227,0	748,0	481,5	128,9
Topotérmico máximo (°C)	28,4	31,2	29,8	0,68
Topotérmico mínimo (°C)	17,4	19,9	18,7	0,63
Trimestre com maior precipitação (mm)	675,5	706,4	690,1	7,3
Trimestre com menor precipitação (mm)	95,6	115,2	104,0	4,9

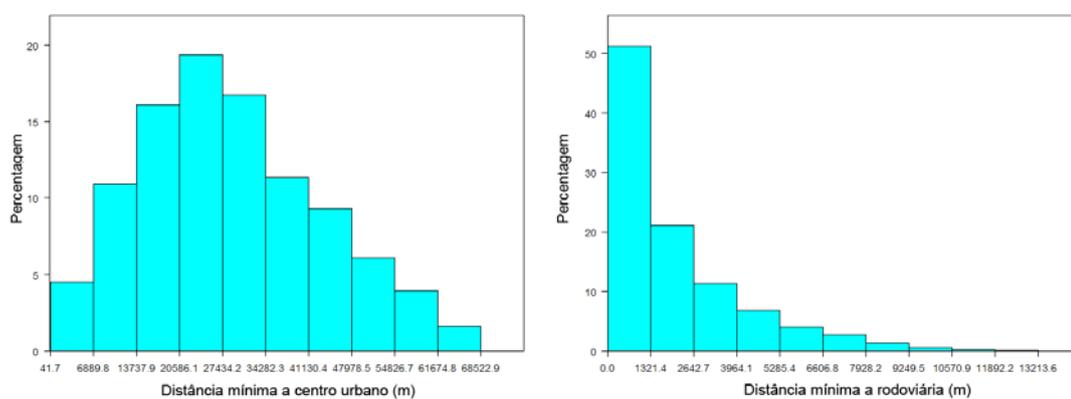


Figura 48. Histogramas da distância mínima a centro urbano e a rodovia, microbacia de Coxim.

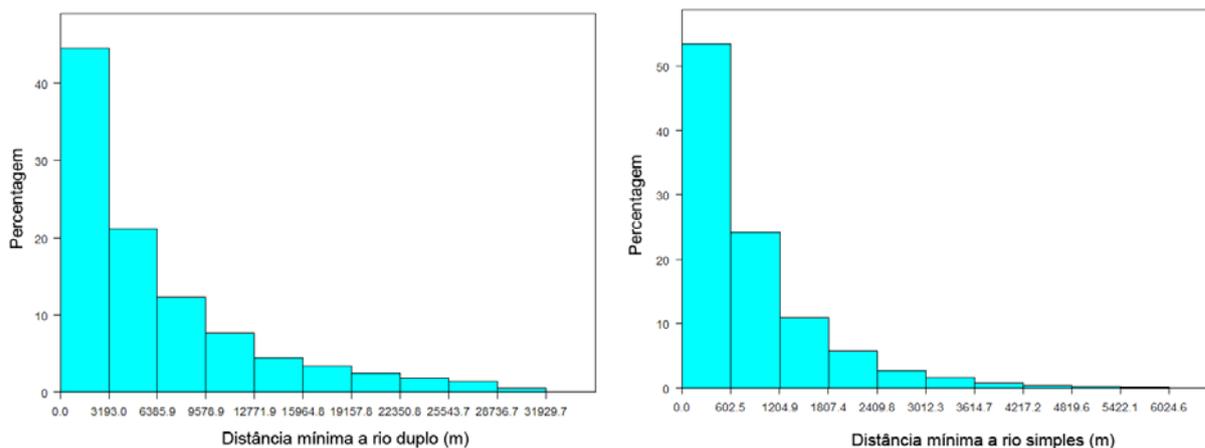


Figura 49. Histogramas da distância mínima a rio duplo e a rio simples, microbacia de Coxim.

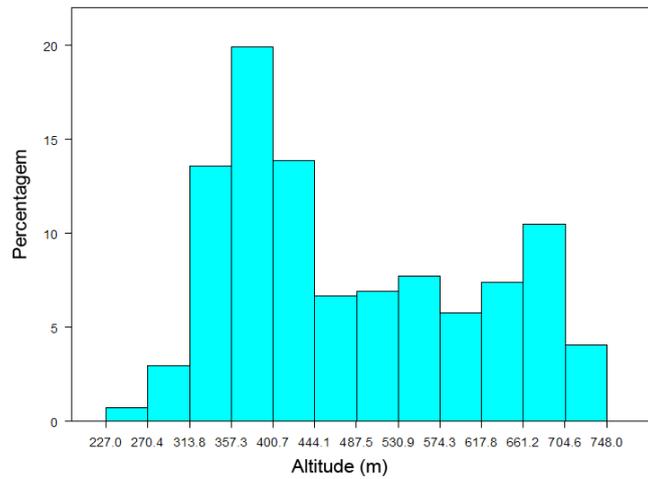


Figura 50. Histograma da altitude da área de estudo, microbacia de Coxim.

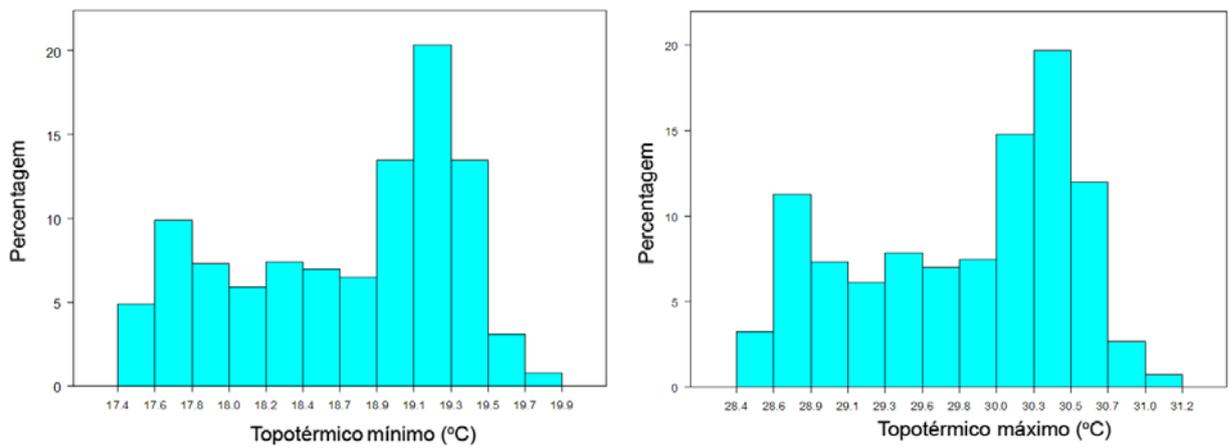


Figura 51. Histogramas da variável topotérmico mínima e máxima, microbacia de Coxim.

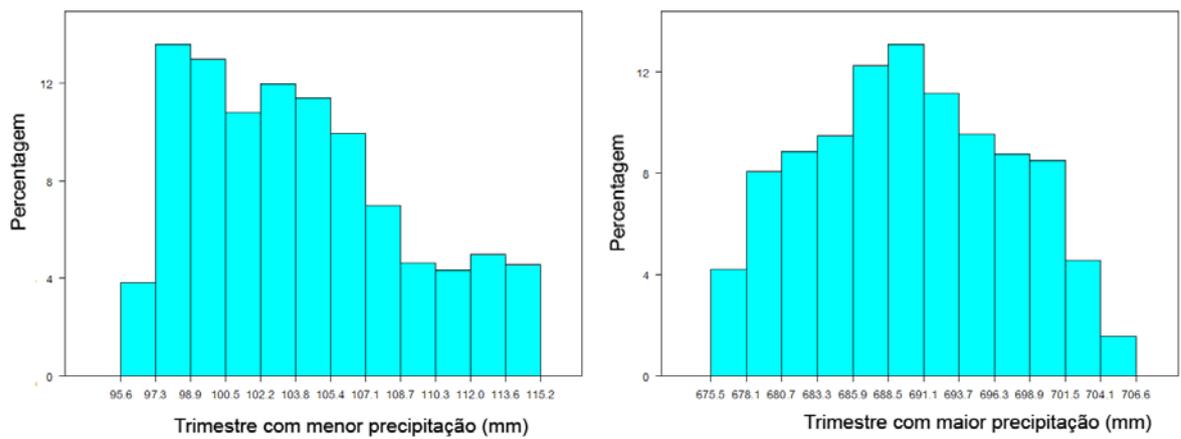


Figura 52. Histogramas da precipitação mínima e máxima, microbacia de Coxim.

As figuras 53, 54, 55, 56 e 57 apresentam a distribuição espacial da transformação dos impulsores de mudanças do uso do solo considerados para a microbacia do Coxim.

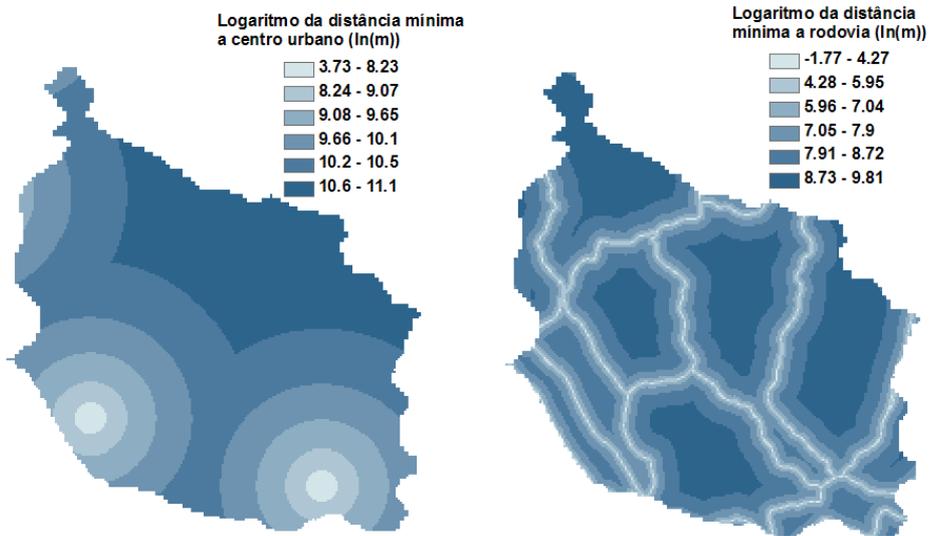


Figura 53. Distribuição espacial do logaritmo da distancia mínima a centro urbano e rodovia, microbacia do Coxim.

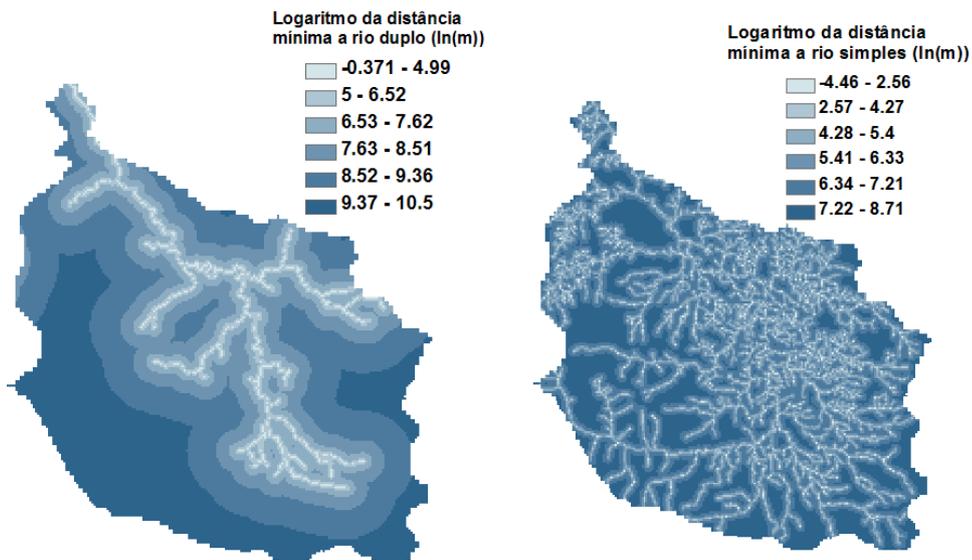


Figura 54. Distribuição espacial do logaritmo da distancia mínima a rio simples e duplo, microbacia do Coxim.

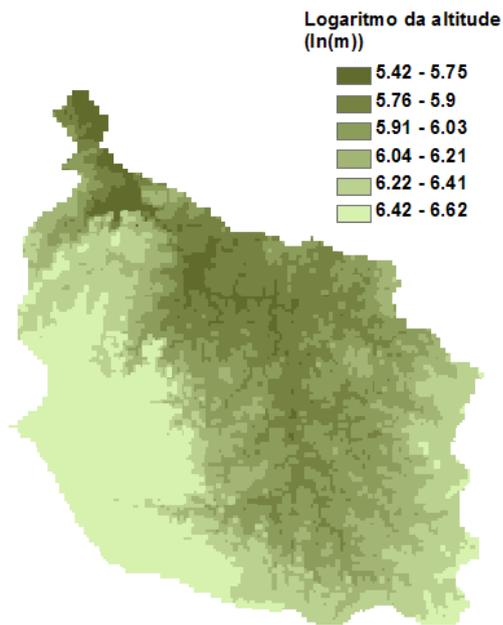


Figura 55. Distribuição espacial do logaritmo da altitude, microbacia do Coxim.

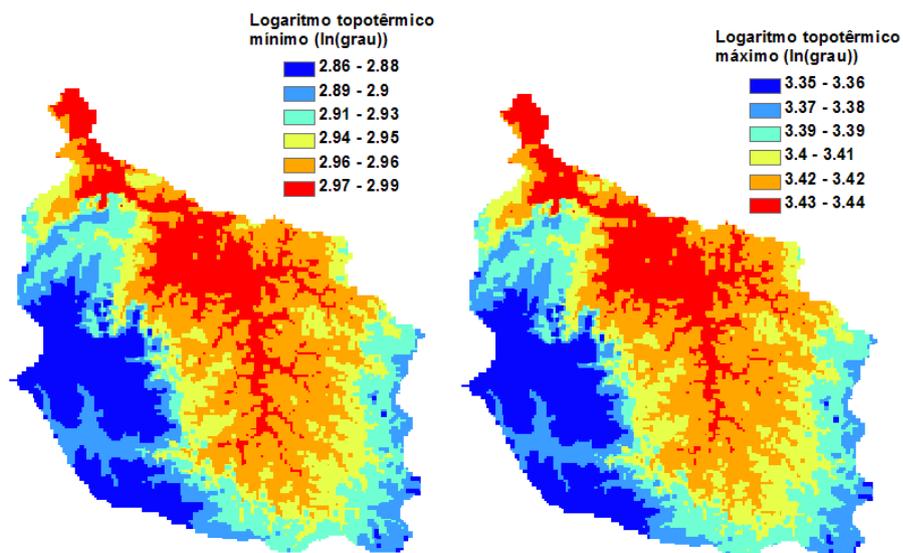


Figura 56. Distribuição espacial do logaritmo topotérmico mínima e máxima, microbacia do Coxim.

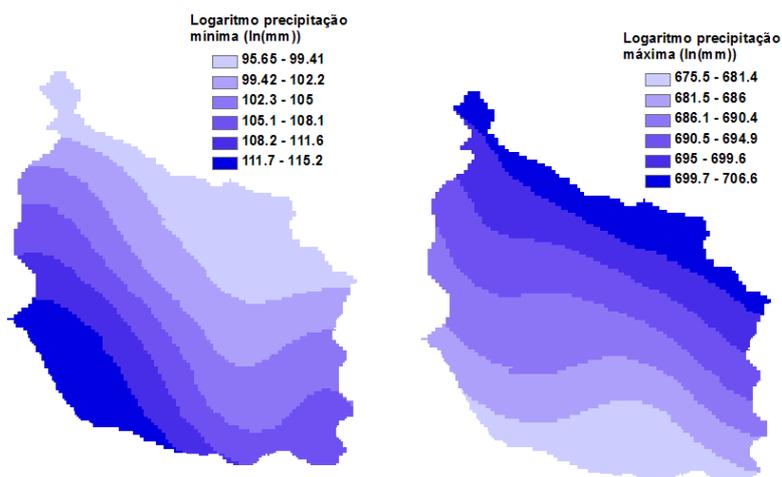


Figura 57. Distribuição espacial do logaritmo da precipitação mínima e máxima, microbacia do Coxim.

**b) Resultados da modelagem da regressão logística para a microbacia de Coxim.**

Apresentam-se os resultados do ajuste do modelo de regressão logística para as classes de uso do solo Agricultura, Cerrado e Pastagem em função dos impulsores de mudanças. O enfoque da regressão logística considera a categorização das classes do uso do solo tomando o valor 1 (presença) e 0 (ausência) em cada célula. O número total de casos, ou células, para a regressão logística foi 26.284. Devido ao problema de desbalanceamento entre o número de dados das classes 1 (presença) e 0 (ausência), se optou por amostrar a classe com maior número de dados, a classe 0, para obter um balanceamento entre os 1 e 0.

Na regressão logística, o exponencial do coeficiente  $\beta$ , denotado por  $\exp(\beta)$ , denota a chance de ocorrer uma classe de uso do solo em função da variação de uma unidade do impulsor de mudança. Quando  $\exp(\beta) > 1$ , a chances de ocorrer um tipo de solo aumenta em relação ao aumento na unidade do impulsor de mudança. No caso de  $\exp(\beta) < 1$ , a chance de ocorrer um tipo de solo diminui com o aumento de uma unidade do impulsor de mudança.

### • Resultados para a classe agricultura

Tabela 12. Modelo ajustado de regressão logística para a classe Agricultura.

Impulsor de mudança	Coefficiente $\beta$	Desvio padrão	Significância	Exp( $\beta$ )	95% IC Exp( $\beta$ )*
log(distância mínima a centro urbano)	-0,64	0,09	< 0,001	0,53	(0,44 - 0,63)
log(distância mínima a rio duplo)	3,17	0,09	< 0,001	23,75	(20,1 - 28,1)
Constante	-22,27	1,34	< 0,001		

\*IC = Intervalo de confiança.

Tabela 13. Classificação do modelo ajustado de regressão logística para a classe Agricultura.

Observado	Modelo estimado			% acerto
		Classe Agricultura		
		Sem agricultura	Com agricultura	
Classe Agricultura	Sem agricultura	3215	542	85,6
	Com agricultura	318	3547	91,8
Percentagem global				88,7

n = 7624

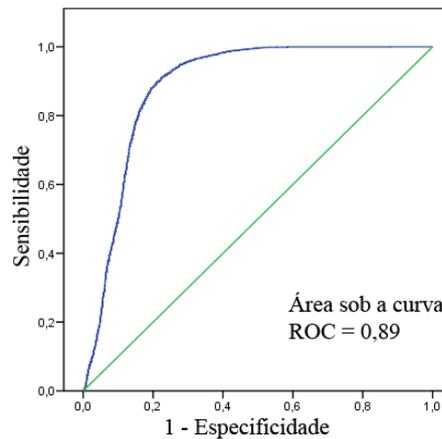


Figura 58. Curva ROC para o modelo ajustado da regressão logística para a classe Agricultura.

### • Resultados para a classe Pastagem

Tabela 14. Modelo ajustado de regressão logística para a classe Pastagem.

Impulsor de mudança	Coefficiente $\beta$	Desvio padrão	Significância	Exp( $\beta$ )	95% IC Exp( $\beta$ )*
log(altitude)	-3,06	0,08	< 0,001	0,05	(0,040 - 0,054)
log(distância mínima a rio simples)	0,11	0,01	< 0,001	1,12	(1,094 - 1,143)
log(distância mínima a rodovia)	-0,12	0,01	< 0,001	0,88	(0,863 - 0,903)
log(distância mínima a rio duplo)	0,26	0,01	< 0,001	1,30	(1,262 - 1,336)
Constante	16,81		< 0,001		

\*IC = Intervalo de confiança.

Tabela 15. Classificação do modelo ajustado de regressão logística para a classe Pastagem.

Observado	Classe Pastagem	Modelo estimado		
		Classe Pastagem		% acerto
		Sem pastagem	Com pastagem	
	Sem pastagem	8582	5063	62,9
	Com pastagem	5357	7282	57,6
Percentagem global				60,4
n = 26284				

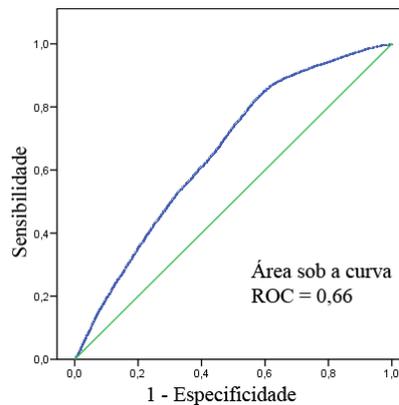


Figura 59. Curva ROC para o modelo ajustado da regressão logística para a classe Cerrado.

### • Resultados para a classe Cerrado

Tabela 16. Modelo ajustado de regressão logística para a classe Cerrado.

Impulsor de mudança	Coefficiente $\beta$	Desvio padrão	Significância	Exp( $\beta$ )	95% IC Exp( $\beta$ )*
log(distância mínima a centro urbano)	0,27	0,03	< 0,001	1,31	(1,24 - 1,38)
log(distância mínima a rio simples)	-0,10	0,01	< 0,001	0,91	(0,88 - 0,93)
log(distância mínima a rodovia)	0,28	0,02	< 0,001	1,33	(1,23 - 1,37)
log(distância mínima a rio duplo)	-0,25	0,01	< 0,001	0,78	(0,76 - 0,80)
Constante	-2,26	0,34	< 0,001		

\*IC = Intervalo de confiança.

Tabela 17. Classificação do modelo ajustado de regressão logística para a classe Cerrado.

Observado	Classe Cerrado	Modelo estimado		
		Classe Cerrado		% acerto
		Sem cerrado	Com cerrado	
	Sem cerrado	5617	4104	57,8
	Com cerrado	3553	6186	63,5
Percentagem global				60,7
n = 19460				

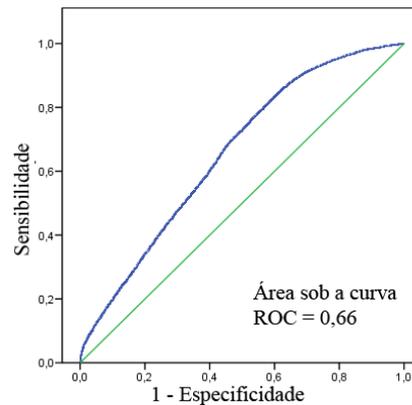


Figura 60. Curva ROC para o modelo ajustado da regressão logística para a classe Cerrado.

c) **Resultados da modelagem da regressão espacial com defasagem para a microbacia do Coxim**

A regressão espacial com defasagem foi estimada usando as 26.284 células.

- **Matriz de vizinhança.** Foi gerada uma matriz de vizinhança usando o método de contigüidade do tipo Queen no GEODA, Seção 4.2. A configuração de vizinhança Queen considera as oito células circundantes de uma célula. A Figura 61 mostra parte da estrutura de vizinhança. Inicia com o código da célula e nas seguintes duas linhas o número de vizinhos e os códigos correspondentes destes.

```

matrixpesos.GAL - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
26284
1 8
26283 24655 24654 24653 12 5610 5621 5599
2 6
26284 26093 26092 26091 3 243
3 7
26095 26093 26092 4 243 244 2
4 8
26096 26095 26093 5 243 244 254 3
5 8
26097 26096 26095 6 254 255 244 4
6 8
26098 26097 26096 7 255 256 254 5
7 8
26099 26098 26097 8 256 257 255 6
8 8
26100 26099 26098 9 256 257 258 7
9 8
26101 26100 26099 10 258 259 257 8
10 8
26102 26101 26100 11 259 260 258 9

```

Figura 61. Matriz de vizinhança estimada usando o método de contigüidade,

- **Indicadores de correlação espacial.** O índice de autocorrelação espacial global de Morán I foi calculado para a distribuição espacial das classes de uso do solo Agricultura, Cerrado e Pastagem. Os valores obtidos foram para a Agricultura  $I = 0,93$ , Pastagem  $I = 0,69$  e Cerrado  $I = 0,66$ .

• **Modelo de regressão espacial com defasagem para a classe Agricultura.**

Tabela 18. Modelo ajustado de regressão da regressão espacial com defasagem para a classe Agricultura.

Parâmetros	Coefficiente $\beta$	Desvio padrão	Probabilidade
W (componente autoregressiva)	0,97	0,002	< 0,01
Constante	-0,11	0,020	< 0,001
log(distância mínima a rio simples)	0,004	0,0004	< 0,001
log(distância mínima a rio duplo)	-0,001	0,0005	< 0,05
log(altitude)	0,017	0,003	< 0,001

Akaike Information Criterion (AIC) = - 55494,8

$R^2 = 0,95$ .

• **Modelo de regressão espacial com defasagem para a classe Pastagem.**

Tabela 19. Modelo ajustado de regressão da regressão espacial com defasagem para a classe Pastagem.

Parâmetros	Coefficiente $\beta$	Desvio padrão	Probabilidade
W (componente autoregressiva )	0,916	0,003	< 0,001
Constante	0,562	0,059	< 0,001
log(distância mínima a rio simples)	0,017	0,001	< 0,001
log(distância mínima a rodovia)	-0,003	0,001	< 0,05
log(distância mínima a rio duplo)	0,011	0,001	< 0,001
log(altitude)	-0,113	0,008	< 0,001

Akaike Information Criterion (AIC) = -1543,3

$R^2 = 0,74$ .

• **Modelo de regressão espacial com defasagem para a classe Cerrado.**

Tabela 20. Modelo ajustado de regressão da regressão espacial com defasagem para a classe Cerrado.

Parâmetros	Coefficiente $\beta$	Desvio padrão	Probabilidade
W (componente autoregressiva)	0,911	0,003	< 0,001
Constane	-0,182	0,056	< 0,001
log(distância mínima a rio simples)	-0,021	0,001	< 0,001
log(distância mínima a rodovia)	0,006	0,001	< 0,001
log(distância mínima a rio duplo)	-0,011	0,001	0,001
log(altitude)	0,055	0,008	< 0,001

Akaike Information Criterion (AIC) = - 9448,5

$R^2 = 0,47$ .

### Etapa III. Simulação no CLUE-S na microbacia do Coxim.

#### a) Implementação dos arquivos de entrada.

- **Restrição espacial (regi1.fil).** A flexibilidade nas leis ambientais para cultivos de cana-de-açúcar, considerando-se que as áreas com declividades menores que 12% são aptas para o cultivo com máquinas agrícolas. Áreas com declividade entre 12 e 14% podem estar ameaçadas pelo desmatamento de áreas protegidas. Em áreas com pastagem nas encostas mais íngremes que possam estar mal manejadas e com evidências do processo erosivo, nesse cenário, essas áreas foram integralmente substituídas por cerrado, para preservação permanente, ou seja, forçando a cana-de-açúcar ocupar áreas com pastagem ou substituição da soja, milho ou de outras culturas na BAT. Um arquivo de restrição espacial para a mecanização da cana-de-açúcar com nome regi1.fil foi criado, mostrado na Figura 62, satisfazendo as duas condições seguintes: apto para mecanização com até 12% de declividade (células com valor zero) e restrito para mecanização com mais de 12% de declividade (células com valor -9998).

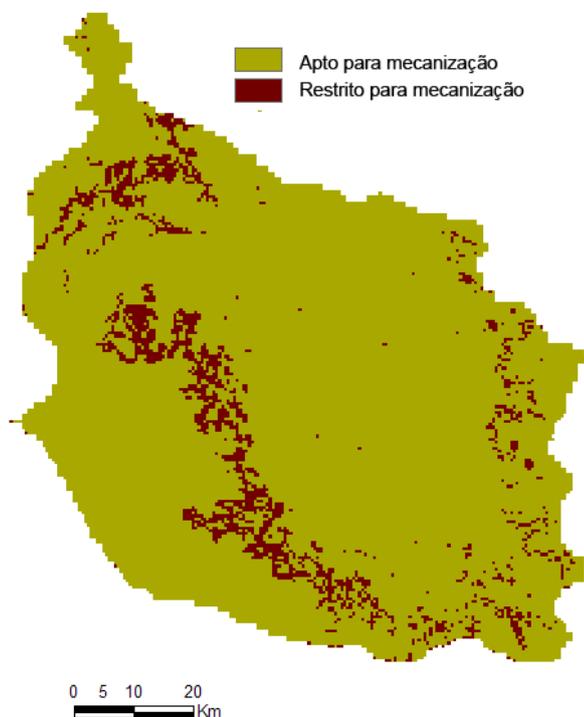


Figura 62. Restrição espacial para a mecanização da cana de açúcar, microbacia de Coxim.

- **Códigos das classes de uso do solo**

Tabela 21. Códigos das classes de uso do solo.

Classe uso do solo	Código
Agricultura	0
Pastagem	1
Cerrado	2
Outro	3

- **Arquivos de parâmetros (main.1)**

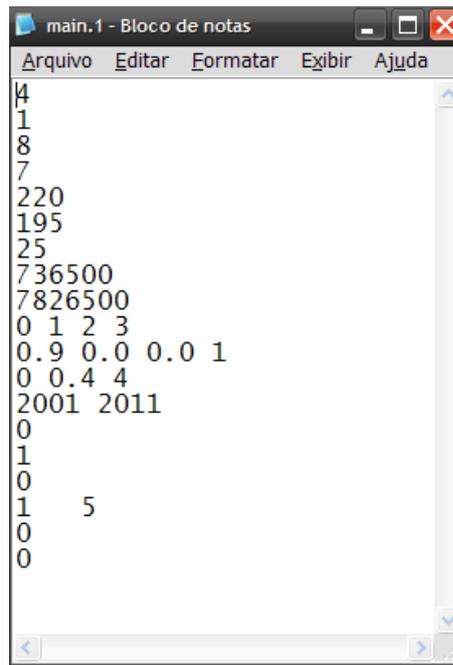


Figura 63. Arquivos de parâmetros principais, main.1, microbacia do Coxim.

- **Arquivos de impulsores de mudanças**

Tabela 22. Lista de arquivos de impulsores de mudanças.

Impulsor de mudança	Código	Arquivo
log(distância mínima a centro urbano)	0	sc1gr0.fil
log(distância mínima a rio simples)	1	sc1gr1.fil
log(distância mínima a rodovia)	2	sc1gr2.fil
log(distância mínima a rio duplo)	3	sc1gr3.fil
Tipo declividade	4	sc1gr4.fil
log(Topotérmico mínimo)	5	sc1gr5.fil
log(altitude)	6	sc1gr6.fil

- Arquivos de parâmetros para a regressão logística e espacial, alloc1.reg

```

0
-22.27
2
-0.60 0
3.17 3
1
16.81
4
-3.06 6
0.11 1
-0.12 2
0.26 3
2
-2.26
4
0.27 0
-0.1 1
0.28 2
-0.25 3

```

Figura 64. Arquivo de parâmetros da regressão logística, microbacia de Coxim.

```

0
-0.11
3
0.004 1
-0.001 3
0.017 6
1
0.562
4
0.017 1
-0.003 2
0.011 3
-0.113 6
2
-0.182
4
-0.021 1
0.006 2
-0.011 3
0.055 6

```

Figura 65. Arquivo de parâmetros da saída da regressão espacial, microbacia de Coxim.

- Arquivo de demanda agregada do uso do solo (demand.in1)

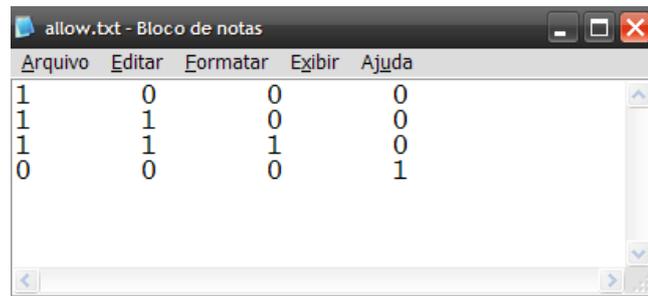
```

11
96650 315975 243475 1000
97775 316825 241500 1000
98900 317675 239525 1000
100025 318525 237550 1000
101150 319375 235575 1000
102275 320225 233600 1000
103400 321075 231625 1000
104525 321925 229650 1000
105650 322775 227675 1000
106775 323625 225700 1000
107900 324475 223725 1000

```

Figura 66. Arquivo da demanda agregada do uso do solo, microbacia do Coxim.

- Arquivo de matriz de conversão (allow.txt).



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
1	0	0	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0
0	0	0	1	1

Figura 67. Arquivo da matriz de conversão entre as classes de uso do solo, microbacia do Coxim.

b) Arquivos de saídas do CLUE-S

- Mapas de probabilidade para as classes de uso do solo no caso da regressão logística.

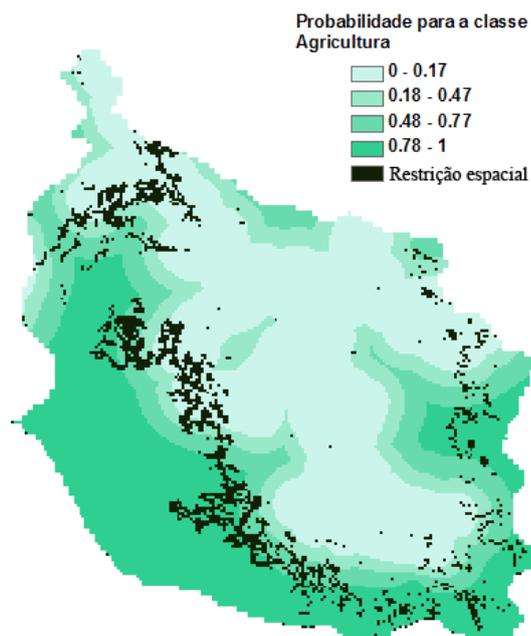


Figura 68. Probabilidade para a classe de uso do solo agricultura usando o modelo de regressão logística, microbacia do Coxim.

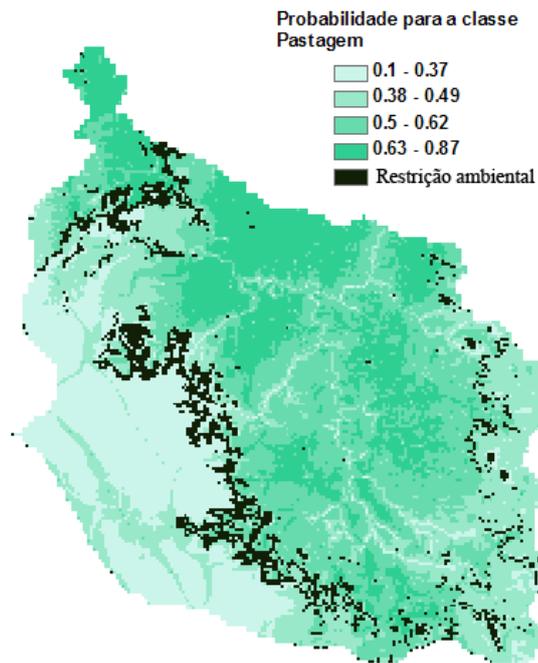


Figura 69. Probabilidade para a classe de uso do solo pastagem usando o modelo de regressão logística, microbacia do Coxim.

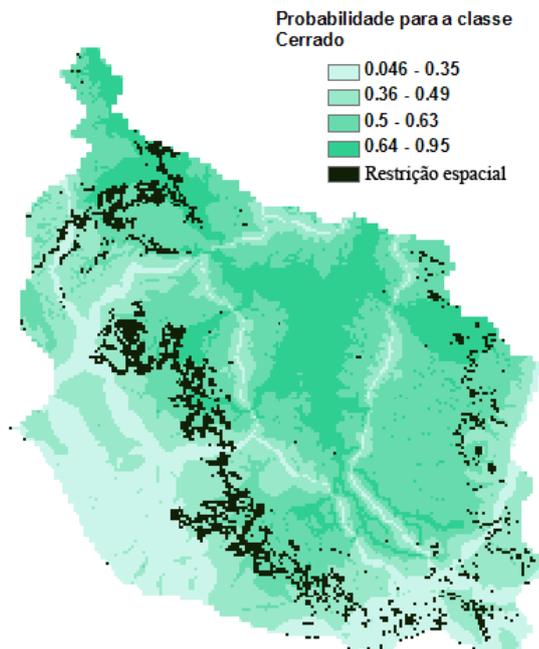


Figura 70. Probabilidade para a classe de uso do solo cerrado usando o modelo de regressão logística, microbacia do Coxim.

- Mapas de probabilidade para as classes de uso do solo no caso da regressão espacial.

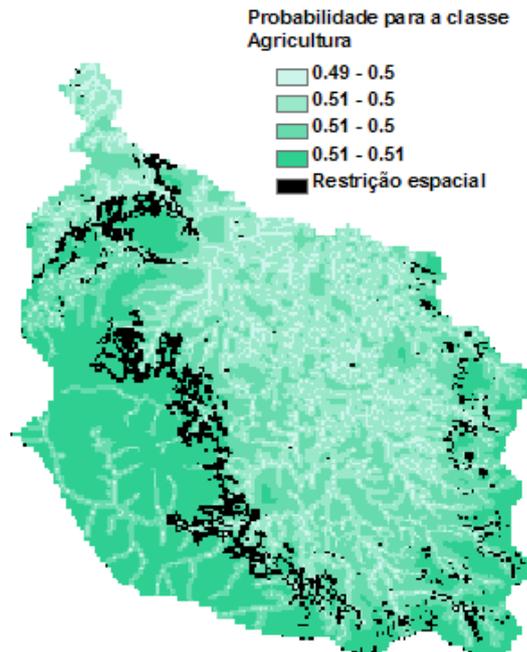


Figura 71. Probabilidade para a classe de uso do solo agricultura do modelo de regressão espacial, microbacia do Coxim.

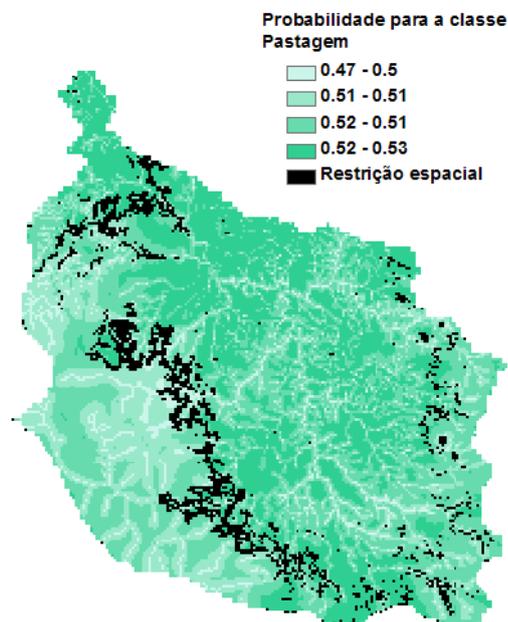


Figura 72. Probabilidade para a classe de uso do solo pastagem do modelo de regressão espacial, microbacia do Coxim.

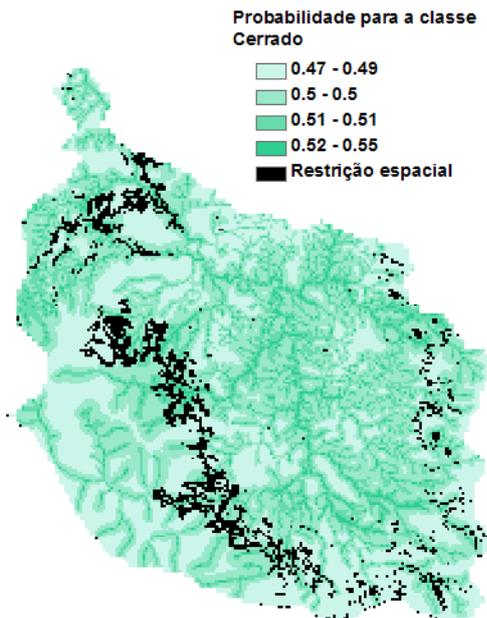


Figura 73. Probabilidade para a classe de uso do solo cerrado do modelo de regressão espacial, microbacia do Coxim.

• **Resultados das simulações CLUE-S usando a regressão logística para o período 2001-2011 para a microbacia do Coxim.**

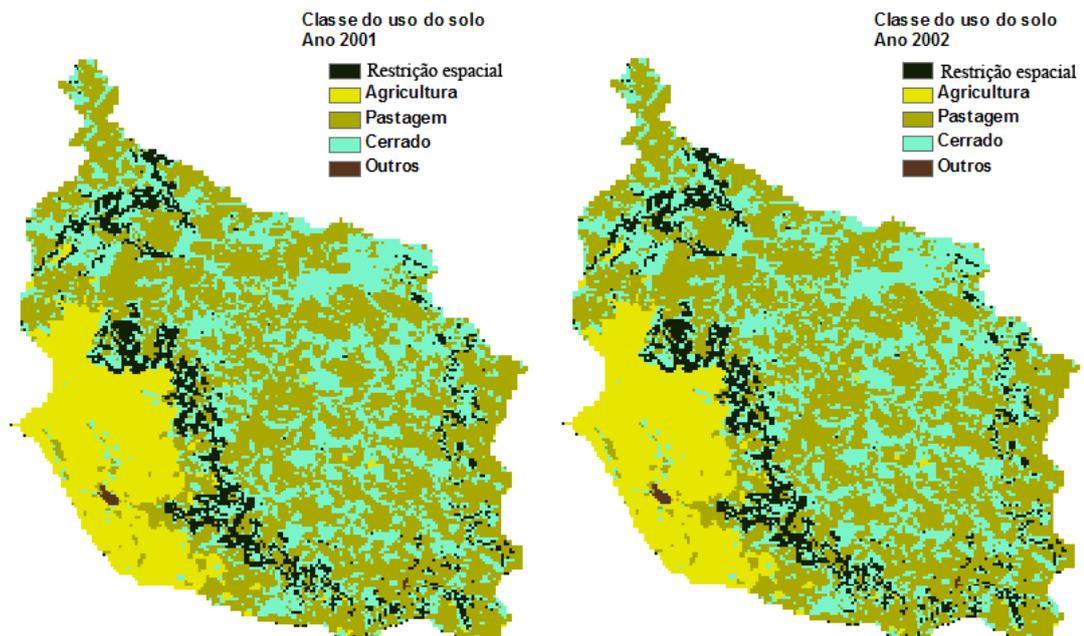


Figura 74. Uso do solo para o ano 2001 e simulação do CLUE-S usando regressão logística para o ano 2002, microbacia do Coxim.

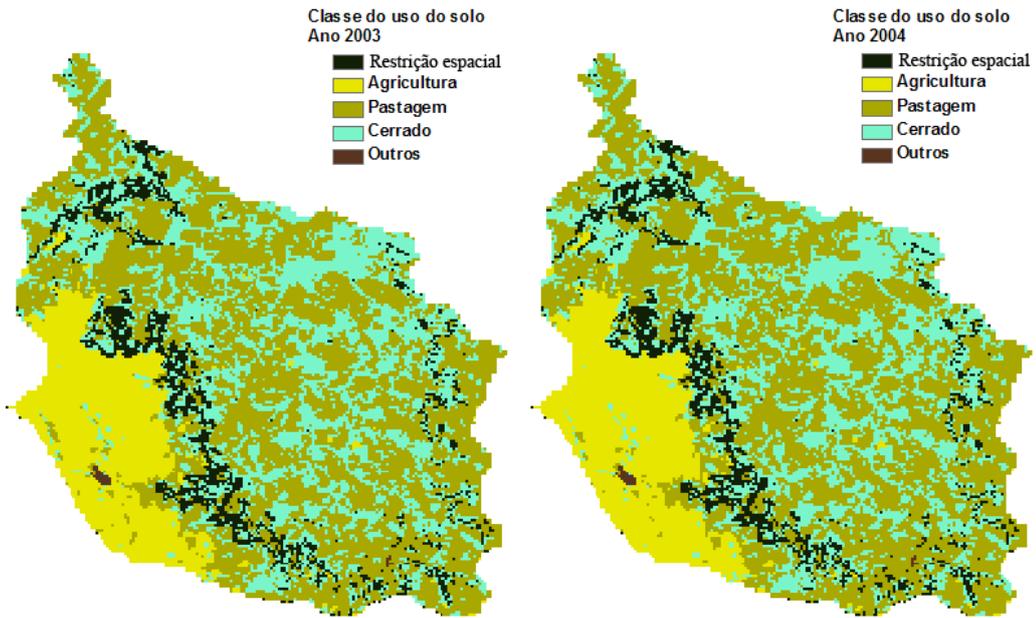


Figura 75. Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2003 e 2004, microbacia do Coxim.

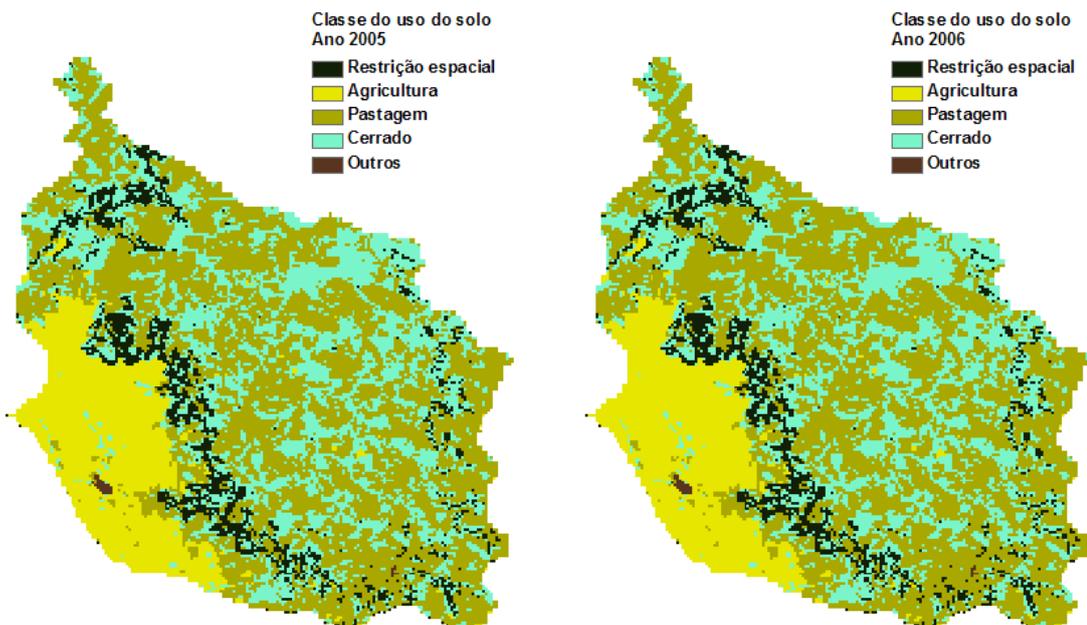


Figura 76. Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2005 e 2006, microbacia do Coxim.

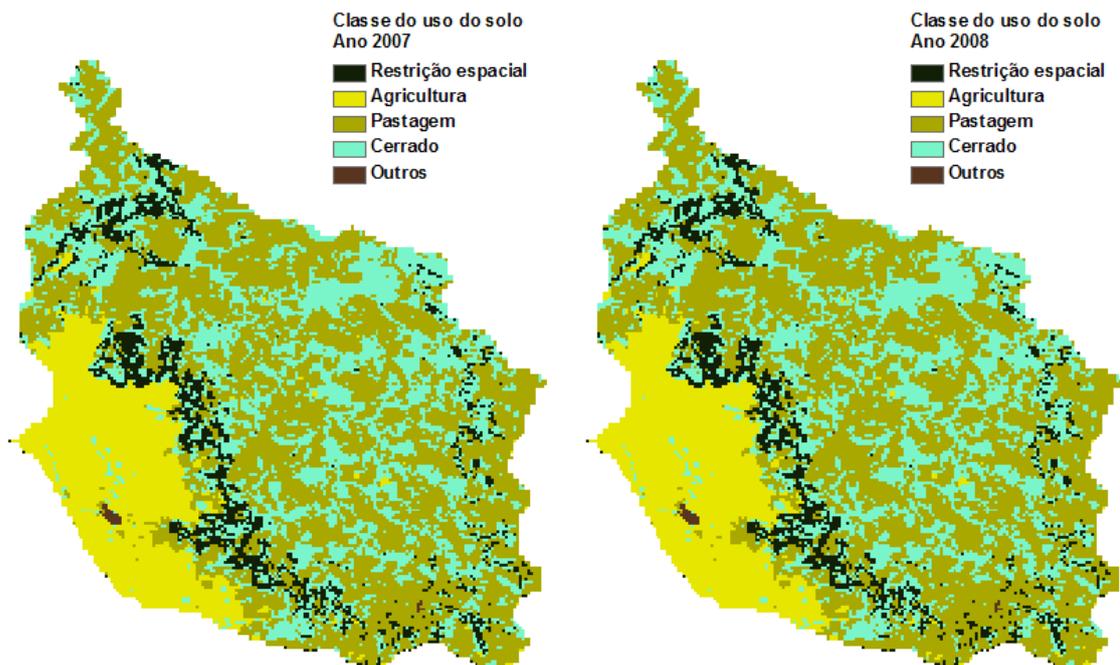


Figura 77. Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2007 e 2008, microbacia do Coxim.

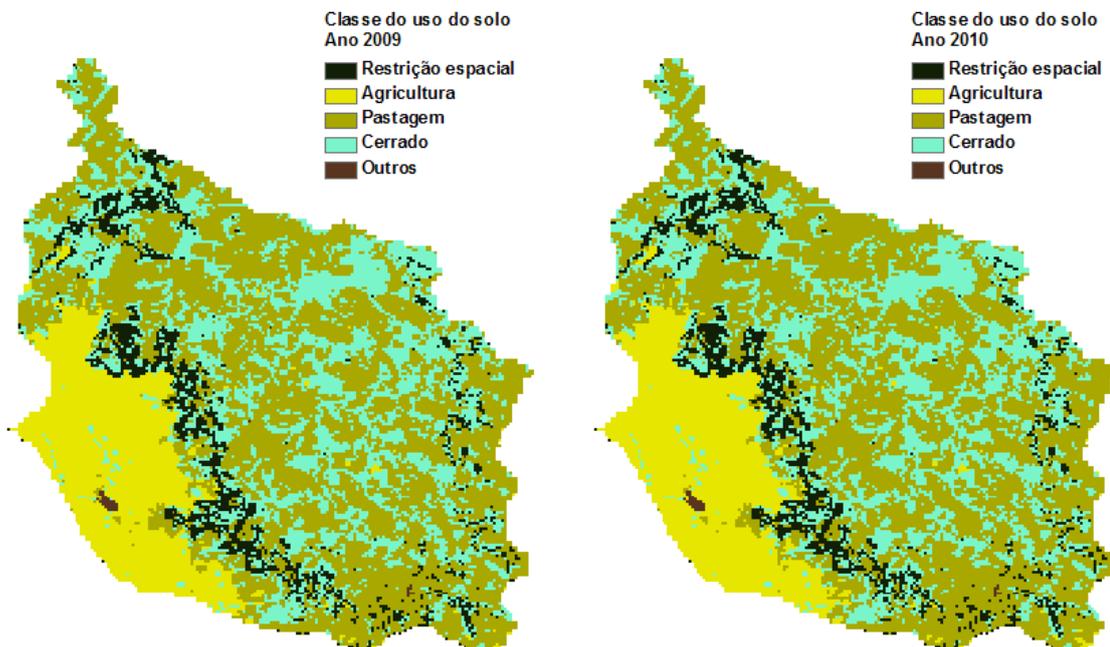


Figura 78. Simulação do CLUE-S usando regressão logística para os anos 2009 e 2010, microbacia do Coxim.

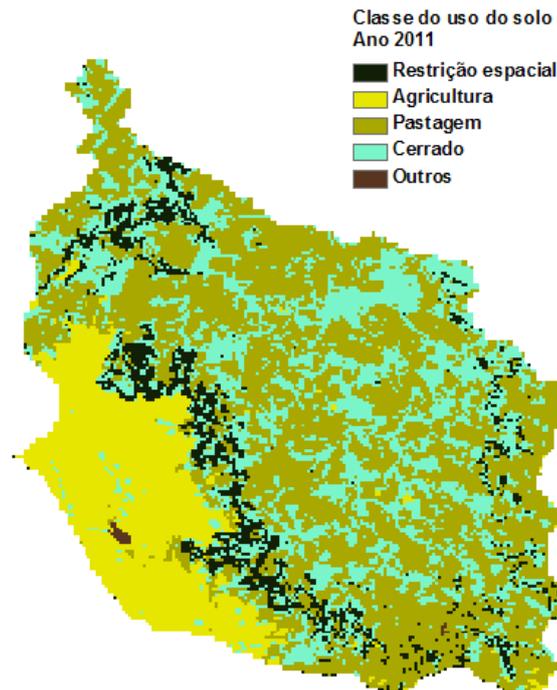


Figura 79. Simulação do CLUE-S usando regressão logística para o ano 2011, microbacia do Coxim.

• **Resultados das simulações CLUE-S usando a regressão espacial com defasagem para o período 2001 – 2011 na microbacia do Coxim.**

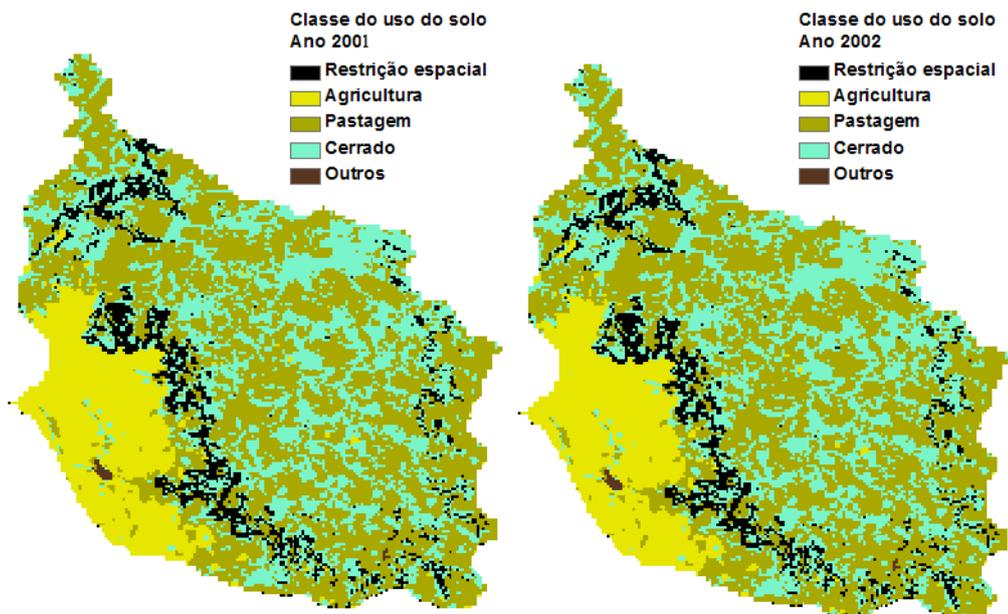


Figura 80. Uso do solo para o ano 2001 e simulação do CLUE-S usando regressão espacial para o ano 2002, microbacia do Coxim.

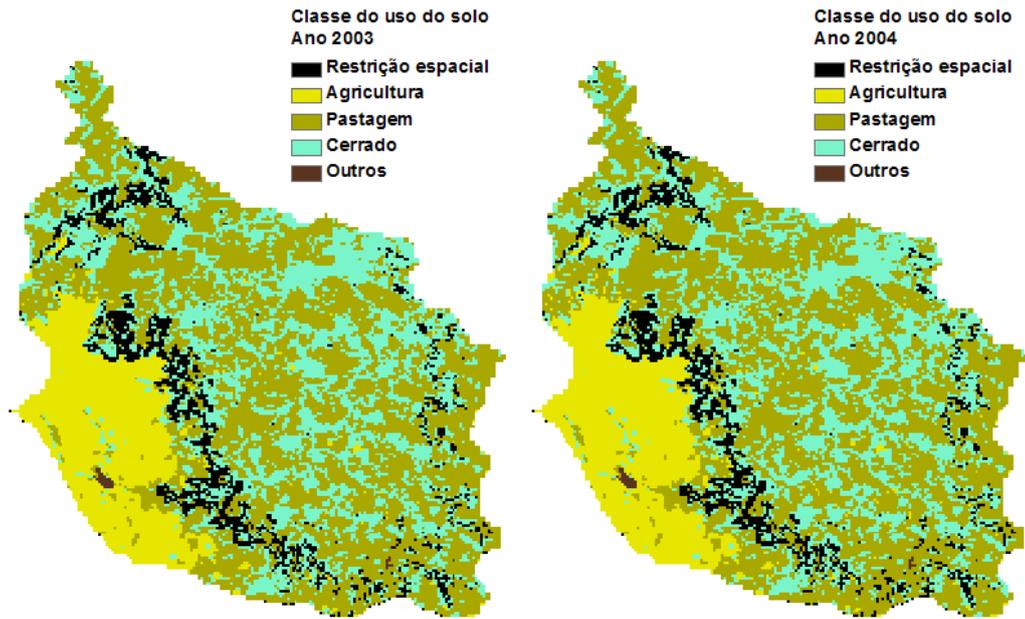


Figura 81. Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2003 e 2004, microbacia do Coxim.

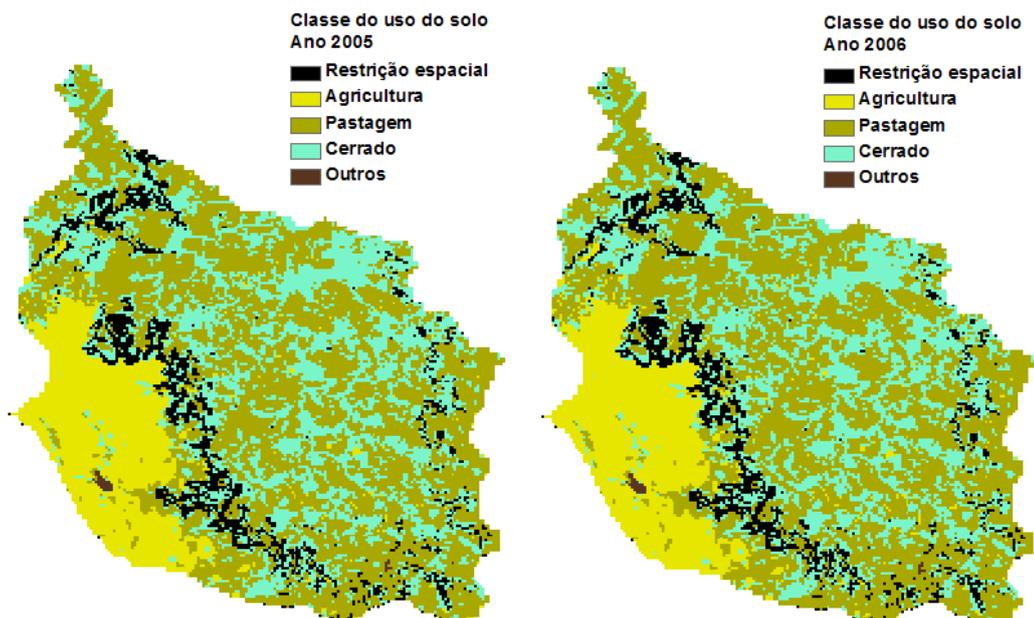


Figura 82. Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2005 e 2006, microbacia do Coxim.

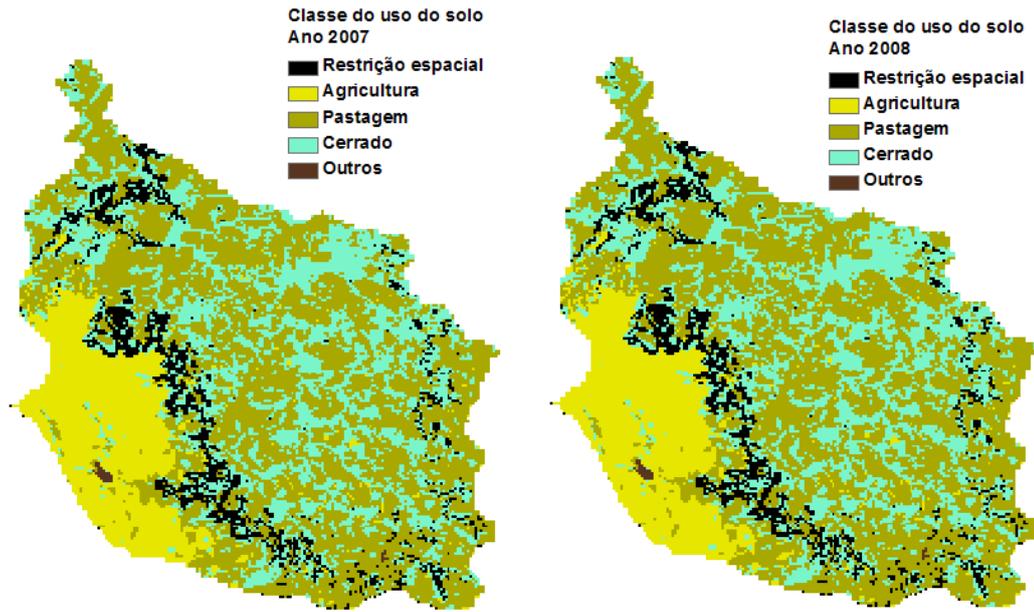


Figura 83. Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2007 e 2008, microbacia do Coxim.

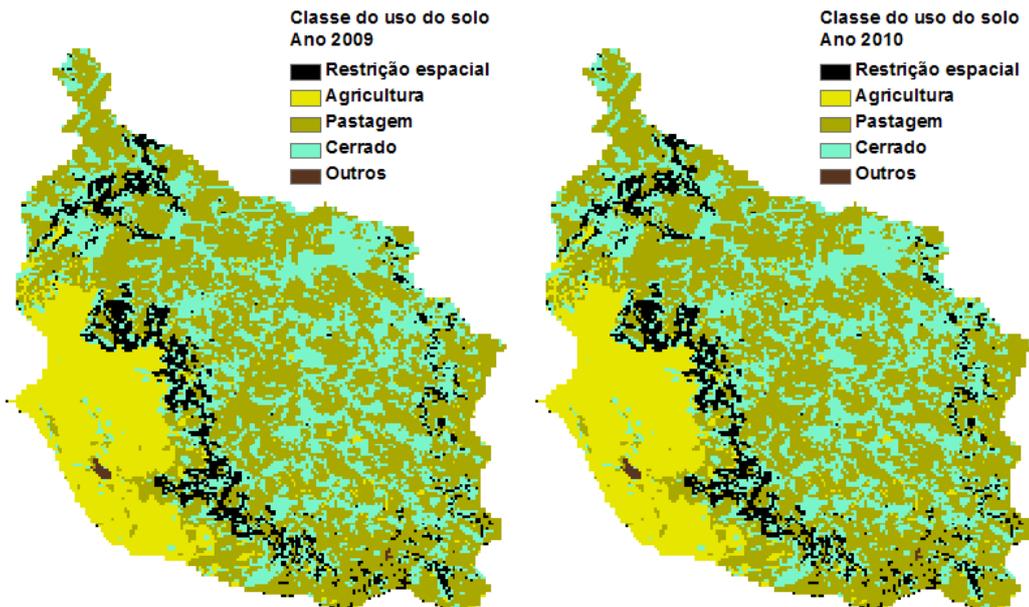


Figura 84. Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para os anos 2009 e 2010, microbacia do Coxim.

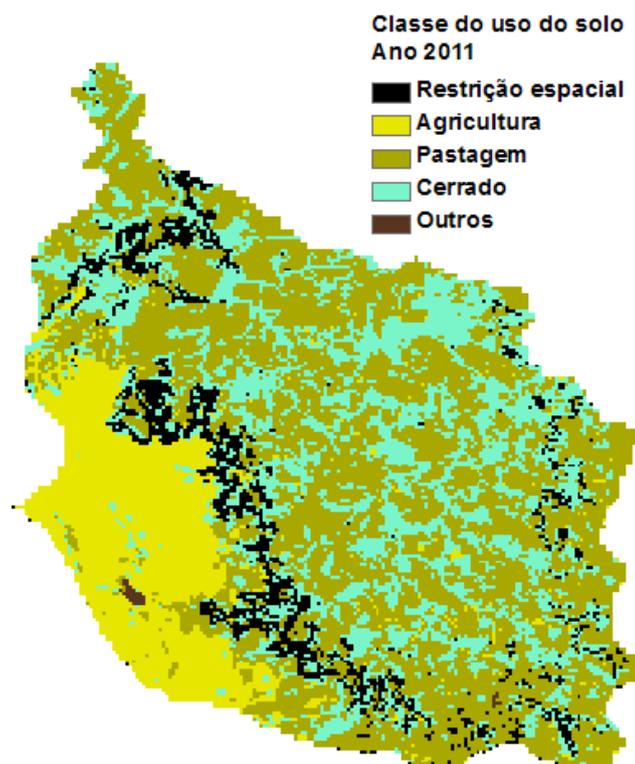


Figura 85. Simulação do CLUE-S usando regressão espacial para o ano 2011, microbacia do Coxim.

**c) Análises das simulações do CLUE-S utilizando os enfoques da regressão logística e regressão espacial.**

A Tabela 23 e Tabela 24 mostram a comparação da classificação do uso do solo obtida através da simulação do CLUE-S utilizando o enfoque da regressão logística e regressão espacial com relação à classificação do uso do solo para o ano 2004 obtida da imagem MODIS para o ano 2004.

Tabela 23. Comparação da simulação CLUE-S usando a regressão logística com respeito ao ano de referência 2004.

		Uso do solo para o ano 2004				Total
		Agricultura	Pastagem	Cerrado	Outro	
Simulação CLUE-S Ano 2004	Agricultura	3694	312	30	0	4036
	Pastagem	278	12192	220	1	12691
	Cerrado	28	236	9253	0	9517
	Outro	0	1	0	39	40
	Total	4000	12741	9503	40	26284

Acurácia global = 0,957 e índice de Kappa = 0,93.

Tabela 24. Comparação da simulação gerada pelo CLUE-S usando a regressão espacial com respeito ao ano de referência 2004.

		Uso do solo para o ano 2004				Total
		Agricultura	Pastagem	Cerrado	Outro	
Simulação CLUE-S Ano 2004	Agricultura	3641	321	30	0	3992
	Pastagem	331	12197	280	1	12809
	Cerrado	28	222	9193	0	9443
	Outro	0	1	0	39	40
	Total	4000	12741	9503	40	26284

Acurácia global = 0,954 e índice de Kappa = 0,92.

A Figura 86 e a Tabela 25 comparam a distribuição espacial das simulações do CLUE-S para ambos os enfoques para o ano 2011.

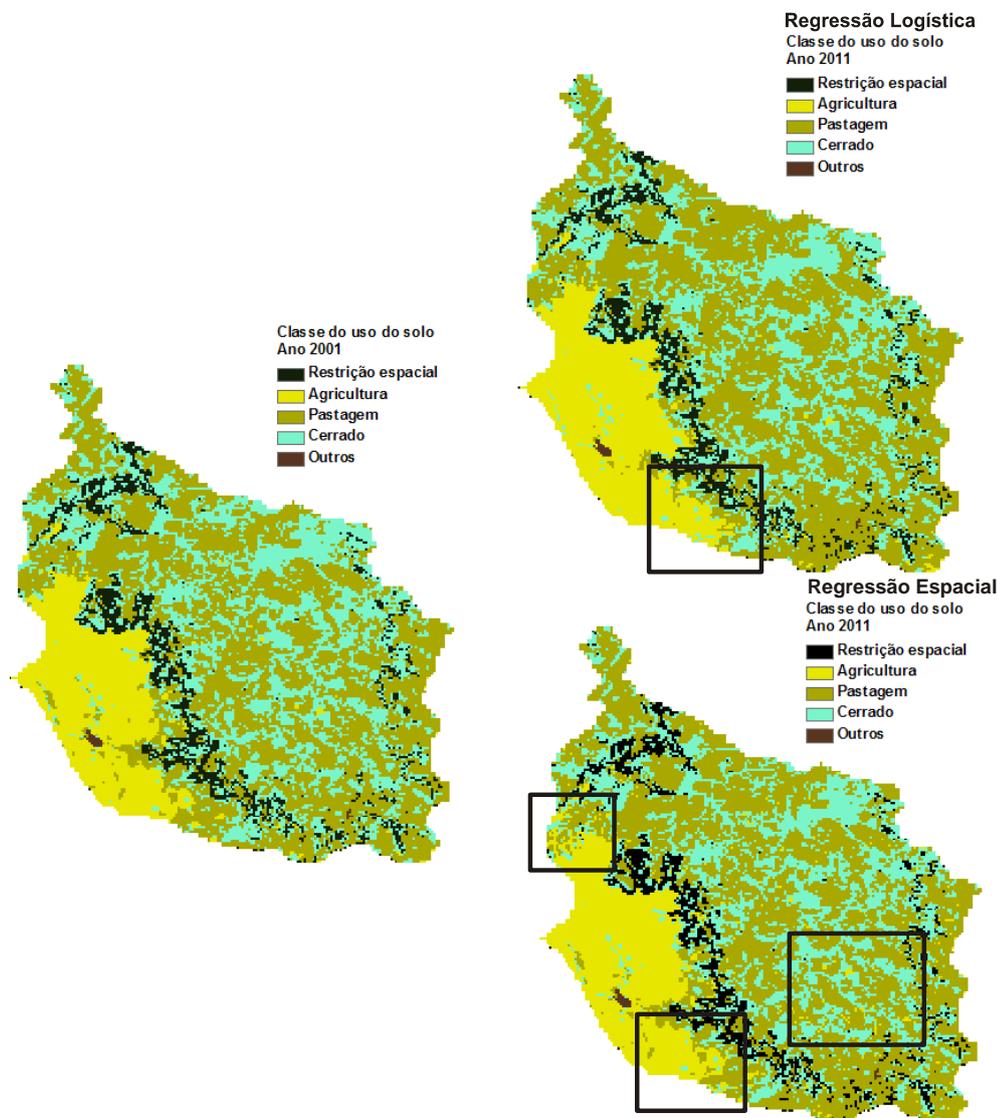


Figura 86. Comparação da distribuição espacial das simulações CLUE-S utilizando o enfoque da regressão logística e regressão espacial para o ano 2011.

Tabela 25. Número de células para as classes de uso do solo obtido da simulação CLUE-S.

Classes do uso solo	Simulação CLUE-S		Demanda do uso do solo 2011
	Regressão Logística Ano 2011	Regressão Espacial 2011	
Agricultura	4357	4297	4316
Pastagem	12943	12965	12979
Cerrado	8944	8962	8949
Outro	40	40	40

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros

Sobre o CLUE-S:

- O CLUE-S permitiu modelar a mudança do uso do solo na microbacia do Coxim em função dos impulsores de mudanças considerados para o período de 2001 - 2011.
- A configuração lógica dos arquivos de parâmetros é importante para obter a convergência do CLUE-S e simulações confiáveis. Desta forma, o padrão de mudança no arquivo de demanda agregada do uso do solo deve estar em concordância com as elasticidades e a matriz de transição.
- A dinâmica das mudanças no CLUE-S é dominada principalmente pelas probabilidades obtidas da regressão logística (mapa de probabilidade). Assim, as células cuja classe do uso solo atual tem baixa probabilidade são as mais suscetíveis de se converter a outra classe.
- A demanda computacional para a simulação dinâmica incide mais na preparação da base de dados espacial. Esta demanda é função do tamanho da célula do plano celular e do tamanho da região de estudo.
- A escolha do tamanho da célula do plano celular determina a resolução espacial das simulações das mudanças do uso do solo. As relações estimadas na modelagem da regressão entre a ocorrência de uma classe de uso do solo e os impulsores de mudanças dependem do tamanho da célula.

Sobre regressão logística:

- É ideal para modelar a dependência de uma variável binária (presença - ausência de uma classe de uso do solo) em função de um conjunto de fatores (impulsores de mudanças). Sua validade depende da condição de ausência de correlação entre os dados.

Sobre a regressão espacial:

- A regressão espacial é um modelo estatístico complexo e computacionalmente intenso que pode ter sua aplicação limitada em casos onde os planos celulares são densos.
- O CLUE-S não integra o modelo de regressão espacial, pois é desenhado para trabalhar exclusivamente com dados binários (presença – ausência de uma classe de uso do solo).
- Modelos de regressão espacial com defasagem incorporam a autocorrelação espacial presente entre células vizinhas.

Sobre a comparação dos enfoques do CLUE-S em função da regressão logística e regressão espacial:

- Ambos os enfoques apresentaram simulações com muito boa concordância, acurácia global e Kappa elevados, com o uso do solo do ano de referência 2004.
- A diferença entre os enfoques foi observada na distribuição espacial da simulação do uso do solo para o ano 2011, sendo o enfoque da regressão espacial que obteve a simulação com menor discrepância com a demanda do uso do solo para esse ano.

Sobre trabalhos futuros:

- O CLUE-S é um sistema que depende de vários programas externos para seu funcionamento. Uma vertente do trabalho proposto nesta dissertação consiste em desenvolver o enfoque da regressão logística espacial no ambiente de programação do R e sua integração com o CLUE-S ou no ambiente de simulação TERRAME (<http://www.dpi.inpe.br/TerraME/introd.pdf>).

## REFERÊNCIAS

- AGARWAL, C.; GREEN, G.; GROVE, J.; EVANS, T.; SCHWEIK, C. *A Review and Assessment of Land-Use Change Models*. Gen. Tech. Rep. NE-297. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 61 p. 2002. [<http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/viewpub.jsp?index=5027>]. Acesso em 21/05/2008.
- AGUIAR, A. P. D. *Modeling land use change in the brazilian amazon: exploring Intra-regional heterogeneity*. Tese de doutorado em sensoriamento remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, SP, Brasil; 2006.
- AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M. *Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity*. *Ecological Modelling*, v. 209, p 169-188, 2007.
- ANSELIN, L. *Exploring Spatial Data with GeoDaTM: A Workbook Spatial*. Analysis Laboratory Department of Geography, 2005.
- ARBIA, G. *Spatial Econometrics. Statistical Foundations and Applications to Regional Convergence*. *Advances in Spatial Science*. Springer. 207 p. 2006.
- ARVOR, D., JONATHAN, M., MEIRELLES, M. S. P., DUBREUIL, V., LECERF, R. *Comparison of multitemporal MODIS-EVI smoothing algorithms and its contribution to crop monitoring*. In: *IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium. p. 4-4. 2008.
- ARVOR, D., NETO, J. L. SANT'ANNA, DUBREUIL, V., ALMEIDA, I. R., MEIRELLES, M. S. P. *Análise dos perfis temporais de EVI/MODIS para o monitoramento da cultura da soja no Estado do Mato Grosso, Brasil*. In: *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007*. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.
- BAILEY, T.; GATTREL, A. *Spatial Data Analysis by Example*. London: Longman, 1995.
- BIVAND, R. *A review of spatial statistical techniques for location studies*. Department of Geography. Norwegian School of Economics and Business Administration. CEPR Symposium on New Issues in Trade and Location, Lund, Sweden, 1998.
- BRIASSOULIS, H. *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches*, 2000, [<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>]. Acesso em 30/08/2008.
- CRESSIE, N. *Statistics for Spatial Data*, Wiley, New York, 1991.
- HELMING, K.; PÉREZ-SOBA, M.; TABBUSH, P. (Editores). *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Springer, Berlin, 2008.
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. *Applied Logistic Regression*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc, 1989.

FAO. *Terminology for Integrated Resources Planning and Management*. Choudhury K.; Jansen, L. J. M. 1998. [<ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/landglos.pdf>]. Acesso em 20/08/2008.

GALDINO, S.; VIEIRA, L. M.; SORIANO, B. M. A. *Erosão na Bacia do Alto Taquari*. Documentos 52, Embrapa Pantanal, Corumbá, MS, Brasil; 2003.

GRAETZ, D. *Grasslands In Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*, eds. W. B. Meyer e B. L. Turner II, p. 125-147. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

IPCC. *Towards new scenarios for analysis of Emissions, climate change, impacts, and Response strategies*. IPCC expert meeting report. Noordwijkerhout, The Netherlands, 2007.

ISAAKS, E.; SRIVASTAVA, R. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, 1989.

JONATHAN, M. *Classificação do uso e cobertura do solo em escala regional a partir de seqüências temporais de dados MODIS*. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação). Mestrado em Geomática, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

JONES, R. *A Review of Land Use/Land Cover and Agricultural Change Models*. Stratus Consulting Inc. for the California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research, 2005.

KLEINBAUM D. G.; KLEIN M. *Logistic Regression. A Self-Learning Text. Second Edition*. Springer-Verlag, New York, Inc, 2002.

KUHLMAN, T. *Scenarios: Driving forces and policies*. In HELMING, K.; PÉREZ-SOBA, M.; TABBUSH, P. (Editors). *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Springer, Berlin. p. 131 -157, 2008.

LESSCHEN, J. P.; VERBURG, P. H.; STAAL, S. J. *Statistical methods for analyzing the spatial dimension of changes in land use and farming systems LUCC*. Report Series No. 7. The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya & LUCC Focus 3 Office, Wageningen University, the Netherlands. 2005.

MANSILLA, J. F. *Modelagem da Dinâmica da Paisagem com processos de Markov*. In: MEIRELLES M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Editores Técnicos) *Geomática. Modelos e Aplicações Ambientais*. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília. D. F. Brasil, 2007. Cap. 10, p. 497-528.

MEIRELLES M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C.; M. (Editores Técnicos) *Geomática. Modelos e Aplicações Ambientais*. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília. D. F. Brasil, 2007.

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

NEW, M.; LISTER D.; HULME, M.; MAKIN, I. *A high-resolution data set of surface climate over global land áreas*. Climate Research, v. 21, p. 1-25, 2002.

ONU. *Agenda 21*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. 2005a. [<http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21>]. Acesso em 30/09/2008.

ONU. *Ecosystemas e bem-estar humano. Relatório do Grupo de Trabalho da Estrutura Conceitual da Avaliação Ecológica do Milênio*. Conselho de avaliação ecológica do milênio. Editora SENAC São Paulo. 2005b.

OVERMARS, K. P.; KONING, G. H. J. D.; VELDKAMP, A. *Spatial autocorrelation in multiscale land use models*. Ecological Modeling, v.164, p. 257 - 270. 2003.

PARKER, D. C.; MANSON, S. M.; JANSSEN, M. A.; HOFFMANN, M. J. E DEADMAN, P. *Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review*. Special Workshop on Agent-based Models of Land Use/Land Cover Change. Irvine, CA. 2002.

PEDROSA, B. M.; CAMARA, G. *Modelagem Dinâmica e Sistemas de Informações Geográficas*. In: MEIRELLES M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Editores Técnicos) *Geomática. Modelos e Aplicações Ambientais*. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília. D. F. Brasil, 2007. Cap. 5, p. 235 - 280.

RAMANKUTTY, N., FOLEY, J. A. *Estimating Historical Changes in Global Land Cover: Croplands from 1700 to 1992*. Global Biogeochemical Cycles, v. 13, n. 4. p. 997 - 1028. 1999.

ROHUANI, S.; MYERS, D. *Problems in space-time kriging of geohydrological data*. Mathematical Geology, v. 28, p. 73-86, 1990.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. 2009.

SILVA, J. S. V. *Análise multivariada em zoneamento para planejamento ambiental. Estudo de caso: bacia hidrográfica do alto rio Taquari MS/MT*. 338 p. (Dissertação de Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. 2003.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C. L.; CERQUEIRA, G. *DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier*. Ecological Modelling, Holanda, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002.

SPSS 15 for Windows Evaluation Version, Rel. 15.0.0. Chicago: SPSS Inc. 2006.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L. O. *CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its Effects*. Ecological Modeling, v. 85, p. 253 - 270. 1996.

VELDKAMP, A; LAMBIN E. F. *Predicting land use change*. Agriculture Ecosystem & Environment, v. 85, p. 1-6. 2001.

VERBURG, P. H.; DE KONING, G. H. J.; KOK, K., VELDKAMP, A.; BOUMA, J. A *spatial explicit allocation procedure for modeling the pattern of land use change based upon actual land use*. Ecological Modelling, v. 116, p. 45- 61. 1999.

VERBURG, P. H.; SOEPBOER, W.; VELDKAMP, A.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, V.; MASTURA, S. S. A. *Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model*. Environmental Management, v. 30, n. 3, p. 391 - 405. 2002.

VERBURG, P., SCHOT, P., DIJST, M., VELDKAMP, A. *Land use change modelling: current practice and research priorities*. GeoJournal, v. 61, p. 309 - 324, 2004.

VERBURG, P. *The CLUE-S model Tutorial CLUE-S (version 2.4) and DYNA-CLUE (version 2)*. Wageningen University. <<http://www.cluemodel.nl/>>. Acesso em 25/08/2008.

VITOUSEK, P. M., D' ANTONIO C., LOOPE, L. L., REJMANEK, M., WESTBROOKS, R. *Introduced species: A significant component of human-caused global change*. New Zealand Journal of Ecology, v. 21, n. 1, p. 1 - 16, 1997.

WALL, M. M. *A close look at the spatial structure implied by CAR and SAR models*. Journal of Statistical Planning and Inference. v. 121, p. 311 – 324, 2004.

## APÊNDICE A. CÓDIGOS USADOS NO R

Neste apêndice os códigos usados no programa estatístico R são apresentados.

### Programa 1.

#Este código classifica cada célula em uma classe de uso do solo usando as percentagens

#calculadas no plano celular

# para anos 2001 - 2004

```
solo2001 <- read.table("solo2001_ID.csv", header = TRUE, sep = ";")
```

```
n <- 111806
```

```
tabelarec<-solo2001[,2:6]
```

#definição parâmetros

#maxpos posição do máximo

#maxvalor valor do máximo

#maxtipo tipo do máximo

```
maxpos <- matrix(0,n,1)
```

```
maxvalor <- matrix(0,n,1)
```

```
maxtipo <- character(n)
```

```
# tipo agricultura      = A, maxpos = 2
```

```
# tipo cerrado         = C, maxpos = 3
```

```
# tipo pastagem       = P, maxpos = 4
```

```
# tipo outro (urbana)  = O, maxpos = 5
```

```
# tipo fora área      = F, maxpos = 1
```

```
for (i in 1:n)
```

```
{
```

```
  maxpos[i] <- which.max(tabelarec[i,])
```

```
  maxvalor[i]<- max(tabelarec[i,])
```

```
  if (maxpos[i] == 2) maxtipo[i] <- "A"
```

```
  if (maxpos[i] == 3) maxtipo[i] <- "C"
```

```
  if (maxpos[i] == 4) maxtipo[i] <- "P"
```

```
  if (maxpos[i] == 5) maxtipo[i] <- "O"
```

```
  if (maxpos[i] == 1)
```

```
    {tabelarec1 <- tabelarec[i,2:5]
```

```
      maxpos[i] <- which.max(tabelarec1)
```

```
      maxvalor[i] <- max(tabelarec1)
```

```
        if (maxpos[i] == 1) {maxtipo[i] <- "A"}
```

```
        if (maxpos[i] == 2) {maxtipo[i] <- "C"}
```

```
        if (maxpos[i] == 3) {maxtipo[i] <- "P"}
```

```

        if (maxpos[i] == 4) { maxtipo[i] <- "O" }
        maxpos[i] <- maxpos[i] + 1
    }
}

# saída
soloclass2001 <- cbind(maxpos, maxvalor, maxtipo)
soloclass2001 <- data.frame(solo2001[,1], soloclass2001)

```

### Programa 2

```

# criação de vetores de tipo de solo
solo_c <- numeric(n)
for (i in 1:n)
    if (maxtipo[i] == "C") solo_c[i] <- 1
solo_p <- numeric(n)
for (i in 1:n)
    if (maxtipo[i] == "P") solo_p[i] <- 1
solo_a <- numeric(n)
for (i in 1:n)
    if (maxtipo[i] == "A") solo_a[i] <- 1

```

### Programa 3

```

# declividade
# definição variáveis

declividade <- read.table("declividade.csv", header = TRUE, sep = ";")

tabela_decli_rec <- declividade[,2:8]

n <- 111806

declipos <- matrix(0, n, 1)
declivalor <- matrix(0, n, 1)
declitipo <- character(n)

# class$max , class$posicao, class$tipo
# declividade plano = P, max = 2
# declividade suave ondulado = SO, max = 3
# declividade ondulado = O, max = 4
# declividade forte ondulado = FO, max = 5
# declividade montanhoso = M, max = 6
# declividade escarpado = E, max = 7
# tipo fora area = Fora, max = 1

for (i in 1:n)
{
    declipos[i] <- which.max(tabela_decli_rec[i,])
    declivalor[i] <- max(tabela_decli_rec[i,])
}

```

```
if (declipos[i] == 2) declitipo[i] <- "P"
if (declipos[i] == 3) declitipo[i] <- "SO"
if (declipos[i] == 4) declitipo[i] <- "O"
if (declipos[i] == 5) declitipo[i] <- "FO"
if (declipos[i] == 6) declitipo[i] <- "M"
if (declipos[i] == 7) declitipo[i] <- "E"

if (declipos[i] == 1)
{tabela_decli_rec1 <- tabela_decli_rec[i,2:6]
declipos[i] <- which.max(tabela_decli_rec1)
declivalor[i] <- max(tabela_decli_rec1)
if (declipos[i] == 1) {declitipo[i] <- "P"}
if (declipos[i] == 2) {declitipo[i] <- "SO"}
if (declipos[i] == 3) {declitipo[i] <- "O"}
if (declipos[i] == 4) {declitipo[i] <- "FO"}
if (declipos[i] == 5) {declitipo[i] <- "M"}
if (declipos[i] == 6) {declitipo[i] <- "E"}
declipos[i] <- declipos[i] + 1
}
}
class.declividade <- cbind(declipos, declivalor, declitipo)
```