



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Leila Sheila Silva Lisboa

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS COM MODELAGEM DINÂMICA
NA BACIA DO ALTO TAQUARI**

Rio de Janeiro

2008

Leila Sheila Silva Lisboa

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS USANDO MODELAGEM DINÂMICA
NA BACIA DO ALTO TAQUARI**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geomática.

Orientadora: Prof^a Dr^a Margareth Simões Penello Meirelles

Co-orientadora: Prof^a Dr^a Lucieta Guerreiro Martorano

Rio de Janeiro

2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/ REDE SIRIUS/ BIBLIOTECA CTC - B

Lisboa, Leila Sheila Silva.
Cenários de mudanças climáticas usando modelagem dinâmica
na Bacia do Alto Taquari – 2008.

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

1 – Geomática – Dissertação. 2 – Tecnologia da Geoinformação. I –
Lisboa, Leila Sheila Silva. II – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Faculdade de Engenharia. III – Título.

Autorizo, para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
dissertação.

Assinatura

Rio de Janeiro, 16 de dezembro de 2008.

Leila Sheila Silva Lisboa

**CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS USANDO MODELAGEM DINÂMICA
NA BACIA DO ALTO TAQUARI**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geomática.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Profª Drª Margareth Simões Penello Meirelles (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Profª Drª Lucieta Guerreiro Martorano (Co-orientadora)
Embrapa Solos

Prof. Dr. Celso Vainer Manzatto
Embrapa Solos

Prof. Dr. Paulo Marcio Leal de Menezes
Departamento de Geografia – UFRJ

Rio de Janeiro

2008

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo amor, compreensão, estímulo, aprendizado e exemplo de união.

AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras, Margareth Simões e Lucieta Martorano, pelo exemplo profissional, competência, estímulo e apoio na realização deste trabalho.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado.

Aos professores da UERJ pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao compreensivo e querido professor Vasconcelos, coordenador do PPG de Geomática/UERJ.

À querida Rinete, ao atencioso Luiz pelo apoio sempre que necessário e ao Alexandre, funcionários do PPG da Geomática, obrigada por tudo.

Aos meus amados pais, Cristóvam e Maria Lisboa, por todo o carinho e amor transmitidos. Sem este apoio minha jornada seria muito difícil.

Aos meus queridos irmãos, Letícia (*in memorian*), Lucinha, Larissa e Ricardo, que incentivaram e sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus doces avós, Cristovão Lisboa (*in memorian*) e Maria José pelas muitas orações e amor permanente.

Às minhas sobrinhas, Cíntia e Victória pelas cartinhas de amor que me deram forças para superar a saudade e continuar a minha luta.

Ao meu companheiro Fábio pelo sentimento verdadeiro e incentivo permanente, me fortalecendo na parte técnica e emocional em todos os momentos de nossa luta na pós-graduação.

À minha querida família paulista, Milton Makoto e Yaê Ishizuka, que me acolheu e me proporcionou estabilidade emocional para superar a saudade de casa e me manter firme na luta pela capacitação.

Aos meus novos amigos, Polyanna Bispo e Marcus Fuckner da pós-graduação do INPE e, Simione Campelo e Ivan Ortiz da UERJ, pela amizade sincera, força e incentivo no curso e na conclusão deste trabalho.

A todos os amigos paraenses que rezaram por mim no Círio de Nazaré e enviaram freqüentes mensagens de incentivo.

Às minhas “bonecas” Fabrícia Moura e Sílvia França, amigas de sempre e incentivadoras do meu sucesso.

Aos amigos da Secretaria de Meio Ambiente (SEMA-PA): Flavio e Paulo Altieri e ao grupo do Laboratório de Sensoriamento Remoto que foram, indiretamente, os responsáveis pela escolha de minha pós-graduação.

Ao meu “grupinho” de amigos pesquisadores do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG): Jorge Gavina, Marcelo Thales, Arlete Almeida e Francisco Barreto pelo apoio, conselho e oportunidade de convívio salutar, durante a minha passagem por essa instituição tão conceituada.

À atenciosa Azeneth, mais conhecida por Marysol, pesquisadora da Embrapa Solos, sempre pronta a me auxiliar quando necessário.

Ao Guilherme, meu amigo “Gui” pelo apoio na fase final de formatação deste documento.

Aos pesquisadores e funcionários da Embrapa Solos que tive oportunidade de conviver por intermédio de minhas orientadoras, pela acolhida e força na reta final do meu trabalho de dissertação.

A todos que direta ou indiretamente incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

LISBOA, Leila Sheila Silva. Cenários de mudanças climáticas usando modelagem dinâmica na Bacia do Alto Taquari, 2008. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

A região Centro-Oeste do Brasil tornou-se nos últimos 40 anos grande produtora de grãos e carne bovina. As condições edafoclimáticas, o sistema de manejo do solo e o descumprimento de leis ambientais trouxeram consequências drásticas à região como o agravamento do processo hídrico erosivo, principalmente na Bacia do Alto Taquari (BAT). Cerca de 90% da BAT localiza-se na porção norte do estado de Mato Grosso do Sul (MS), porém os efeitos do transporte de sedimentos e volume de água são refletidos a jusante dos rios, na Bacia do Pantanal. Utilizando-se pressupostos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) foram estabelecidos cenários de mudanças climáticas na Bacia do Alto Taquari, visando identificar áreas com maior vulnerabilidade ao processo erosivo em função de pressões de uso da terra. Usando a modelagem dinâmica no TerraME (Environment Modeling) foram gerados cenários topopluviais até 2100, considerando-se para a temperatura do ar média anual um aumento de 1°C, em cenário otimista e, em pessimista, elevações térmicas de 3°C. Para a precipitação pluvial média anual um cenário foi com aumento de 15% e outro com reduções de 15%. Os dados foram espacializados no ArcGis 9.2 e exportados para o TerraView 3.2, criando-se espaços celulares e integrando-se com as informações do modelo digital do terreno do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para geração dos mapas topoclimáticos e simulações de cenários no TerraMe. Os resultados apontam que 85% da área da BAT nas condições atuais as temperaturas médias variam entre 23,6 a 25,7°C. As simulações térmicas no cenário otimista indicam que em 40 anos as temperaturas tendem a superar o maior limite térmico médio nas áreas ao longo do rio Taquari, no sentido Oeste-Leste. Esses valores evidenciam elevações nas taxas evapotranspiratórias de matas ciliares, indicando reduções na vazão do Taquari. Em cenário pessimista essas temperaturas antecipam sua ocorrência, em um prazo de 20 anos. Os cenários com acréscimo de 15% na precipitação pluvial mostram aumentos no volume de água precipitada na parte norte da Bacia, região mais vulnerável aos problemas de erosão hídrica. Cenários do regime térmico-hídrico apontam áreas mais sensíveis às mudanças climáticas na parte oeste da BAT e impactos ambientais também na Bacia do Pantanal. Conclui-se que o TerraME é indicado para gerar cenários de mudanças climáticas em bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Condições Topoclimáticas, TerraME, Processo Erosivo, Autômato Celular.

ABSTRACT

LISBOA, Leila Sheila Silva. Climate Change Scenarios using Dynamic Modelling in Upper Taquari Basin., 2008. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Due to agriculture frontier advance in Centre-Western Brazil in the last 40 years, the region became a major grain and meat producer. Soil and Climate particular characteristics, associated to soil management system brought drastic environmental consequences, such as erosion process, mainly in Upper Taquari Basin (UTB). Approximately 86% of UTB is located in North of Mato Grosso do Sul, however the sediment transport effects are reflected downstream, at Pantanal Basin. This study aimed at modeling meteorological variables and simulating climate change scenarios applying dynamic modeling techniques coupled to geoprocessing tools in UTB in order to support land use planning in the region. IPCC assumptions were adopted to simulate two termopluvial scenarios until 2100 applying TerraME (Modelling Environment) tool. An optimistic scenario considers that yearly average air temperature would be increased by 1°C, while pessimistic scenario points out 3°C as average temperature elevation. Regarding to annual pluvial precipitation means, an optimistic scenario forecasts 15% of precipitation increment. Reductions of 15% in precipitation are waited in pessimistic foreseen. Isolines spatial distribution was calculated using DEM (Digital Elevation Model) based on SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Scenarios generate different spatial topoclimate patterns in the basin. Prevalent mean temperatures currently vary from 23.6 to 25.7°C. After 100 years in simulation, optimistic scenario shows a displacement to thermal range from 22.1 to 23.0°C. In the next 40 years, on areas along Taquari river basin, from West to East direction, temperatures will overcome current mean superior thermal limit for the region of UTB, i.e., evapotranspiration rates in riparian zone are likely to increase. This indicates a trend to reduction in stream discharges. In the pessimistic scenarios, these temperatures will be anticipated in 20 years. Scenario with 15% higher pluvial precipitation shows that north part of UTB will receive larger rainfall volumes, what should make erosion problem worse. These scenarios demonstrate spatial-temporal dynamic model potential. Among studied climate variables, air temperature is the most sensitive to express climate change effects in Upper Taquari Basin.

Key-words: Topoclimate conditions; TerraME; Erosion process; Cellular Automata.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Modelagem espaço-temporal de focos de calor e queimadas.	21
Figura 2 -	Classificação dos modelos empíricos e de sistema.	22
Figura 3 -	Grade celular e suas dimensões.	26
Figura 4 -	Diferentes tipos de vizinhança de um AC.	27
Figura 5 -	Estrutura de um autômato celular.	27
Figura 6 -	Diagrama de integração entre o modelo Multi-escala SimLucia e um SIG.	31
Figura 7 -	Representação da sub-divisão espacial e não espacial do modelo CLUE-S.	33
Figura 8 -	Diagrama do modelo multi-escala no TerraME.	36
Figura 9 -	Módulos do TerraME.	37
Figura 10 -	Forças direcionadoras de mudanças na BAT.	42
Figura 11 -	Diagrama de processamento de dados SRTM	43
Figura 12 -	Representação esquemática do espaço celular na BAT	46
Figura 13 -	Localização da Bacia do Alto Taquari – BAT	50
Figura 14 -	Modelo Digital de Elevação (MDE) com a divisão das sub-bacias da BAT.	51
Figura 15 -	Faixas de altitudes (m) na BAT.	52
Figura 16 -	Faixas de declividades na BAT.	52
Figura 17 -	Evolução da população por município na Bacia do Alto Taquari, MS.	53
Figura 18 -	Mapa de uso do solo de 2001 na Bacia do Alto Taquari, MS.	54
Figura 19 -	Área cultivada com soja, milho e cana-de-açúcar nos Estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (2000-2006).	55
Figura 20 -	Estados produtores de cana-de-açúcar no Brasil em 2006.	55
Figura 21 -	Área plantada com cana-de-açúcar no Brasil.	56
Figura 22 -	Produção de cana-de-açúcar em Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, período de 2000 a 2006.	56
Figura 23 -	Municípios com ocorrência de usinas nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.	57
Figura 24 -	Mapa de precipitação pluvial média anual na Bacia do Alto Taquari.	58
Figura 25 -	Variação dos totais de precipitação no trimestre mais chuvoso na BAT, MS.	59
Figura 26 -	Variação dos totais de precipitação no trimestre menos chuvoso na BAT, MS.	59
Figura 27 -	Mapa de temperatura média anual na Bacia do Alto Taquari, MS.	60
Figura 28 -	Mapa de temperatura máxima anual na Bacia do Alto Taquari, MS.	61
Figura 29 -	Mapa de temperatura mínima anual na Bacia do Alto Taquari, MS.	62
Figura 30 -	Dinâmica temporal em cenário climático de reduções de 15% da precipitação pluvial na Bacia do Alto Taquari, MS	66
Figura 31 -	Dinâmica temporal em cenário climático de acréscimo de 15% da precipitação pluvial na Bacia do Alto Taquari, MS	67
Figura 32 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 10 anos.	68

Figura 33 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 20 anos.	69
Figura 34 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 30 anos.	70
Figura 35 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 40 anos.	71
Figura 36 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 50 anos.	72
Figura 37 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 60 anos.	73
Figura 38 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 70 anos.	74
Figura 39 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 80 anos.	75
Figura 40 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 90 anos.	76
Figura 41 -	Cenário com acréscimo de 15% nas precipitações médias anuais em 100 anos.	77
Figura 42 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 10 anos	78
Figura 43 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 20 anos	79
Figura 44 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 30 anos	80
Figura 45 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 40 anos	81
Figura 46 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 50 anos	82
Figura 47 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 60 anos	83
Figura 48 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 70 anos	84
Figura 49 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 80 anos	85
Figura 50 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 90 anos	86
Figura 51 -	Cenário com redução de 15% nas precipitações médias anuais em 100 anos	87
Figura 52 -	Cenário otimista de temperatura média anual na Bacia do Alto Taquari.	88
Figura 53 -	Cenário pessimista de temperatura média anual na Bacia do Alto Taquari.	89
Figura 54 -	Temperatura média anual do cenário atual na Bacia do Alto Taquari.	90
Figura 55 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 10 anos.	91
Figura 56 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 20 anos.	92
Figura 57 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 30 anos.	93

Figura 58 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 40 anos.	94
Figura 59 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 50 anos.	95
Figura 60 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 60 anos.	96
Figura 61 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 70 anos.	97
Figura 62 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 80 anos.	98
Figura 63 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 90 anos.	99
Figura 64 -	Cenário otimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 100 anos.	100
Figura 65 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 10 anos.	101
Figura 66 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 20 anos.	102
Figura 67 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 30 anos.	103
Figura 68 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 40 anos.	104
Figura 69 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 50 anos.	105
Figura 70 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 60 anos.	106
Figura 71 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 70 anos.	107
Figura 72 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 80 anos.	108
Figura 73 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 90 anos.	109
Figura 74 -	Cenário pessimista da temperatura média anual da Bacia do Alto Taquari em 100 anos.	110
Tabela 1 -	Tabela de elasticidade	34
Quadro 1 -	Estrutura das definições de escala na linguagem TerraME.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAT	Bacia do Alto Taquari
CA	Cellular Automata
CLUE	Conversion of Land Use and its Effects
CLUE - S	Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	Environment for Visualizing Images
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
IWMI	International Water Management Institute's
IPCC	International Panel of Climate Change
LUCC	Land Use and Land Cover Change
MDE	Modelo Digital de Elevação
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Nested-CA	Nested Cellular Automata
NIMA	National Aeronautics and Space Administration
PI	Plano de Informação
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SENSOR	Sustainability Impact Assessment
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TERRAME	Terra Environment Modeling
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
ZCIT	Zona de Convergência intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contexto geral e motivações	16
1.2	Hipótese	17
1.3	Objetivo Geral	17
1.3.1	<u>Objetivos específicos</u>	17
1.4	Projetos relacionados	18
1.5	Organização da Dissertação	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM MODELOS AMBIENTAIS: CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO ALTO TAQUARI E SEU ENTORNO	20
2.1	Introdução	20
2.2	Fundamentação Teórica	21
2.2.1	<u>Sistemas de Informação Geográfica (SIGs)</u>	21
2.2.2	<u>Modelo</u>	22
2.2.2.1	Modelos Empíricos (<i>data-driven models</i>)	22
2.2.2.2	Modelos de Sistemas	24
2.2.3	<u>Autômato Celular - AC</u>	25
2.3	Visão geral dos modelos CLUE-S e TerraME	32
2.3.1	<u>Modelo CLUE-S</u>	32
2.3.1.1	Processo de distribuição do CLUE-S	33
2.3.2	<u>Modelo TerraME</u>	35
2.3.2.1	Características principais	36
2.3.2.2	Aplicações do TerraME	39
2.4	Evidências de mudanças de uso da Terra e condições climáticas na Bacia do Alto Taquari (BAT) e seu entorno	39
2.4.1	<u>Modelos de simulações para o estabelecimento de cenários climáticos</u>	40
3	FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS	41
3.1	Aquisição de dados	41
3.1.1	<u>Dados obtidos na Embrapa Solos</u>	41
3.1.2	<u>Dados obtidos na WEB - WorldWideWeb</u>	41
3.2	Avaliação de variáveis candidatas a forças direcionadoras de mudanças de uso da terra	42
3.2.1	<u>Categoria: ambiental</u>	43
3.3	Integração de variáveis	46
3.4	Considerações Finais	48
4	CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA BACIA DO ALTO TAQUARI, MS	49
4.1	Introdução	49
4.2	Características da rede de drenagem na área de estudo	51
4.3	Relevo da área de estudo	52
4.4	Evolução da população na BAT e seu entorno	53
4.5	Uso e cobertura do solo	53
4.5.1	<u>Cultivos agrícolas na área de estudo</u>	54
4.6	Condições termoplúvias na área de estudo	57

		15
4.7	Considerações Finais	62
5	CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO ALTO TAQUARI	64
5.1	Introdução	64
5.2	Metodologia	65
5.3	Avaliação de cenários de precipitação pluvial média anual	66
5.4	Avaliação de cenários de temperatura do ar média anual	74
6	CONCLUSÕES	111
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	112
	BIBLIOGRAFIA	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto geral e motivações

As ações antrópicas têm sido apontadas como fator importante nos estudos que buscam entender os processos dinâmicos da atmosfera terrestre, com vistas a reduções de incertezas nas previsões de tempo e clima. O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2007) confirma as previsões anteriores de mudanças climáticas¹, em que está havendo influência da ação humana sobre o clima global. Pesquisadores buscam identificar evidências de mudanças climáticas (MARENGO et al., 2007; NOBRE et al., 2007) avaliando diferentes variáveis-repostas como alterações no albedo, nas taxas evapotranspiratórias e no regime termopluvial de uma região.

Nos últimos 50 anos, com o desenvolvimento dos avanços tecnológicos e a calibração de modelos ambientais, aliados aos investimentos em ensino e pesquisas, cooperações internacionais e disponibilidade de informações resultaram no aumento de acertos de prognósticos ambientais. Dentre estes avanços cita-se os Modelos Dinâmicos espaciais, cuja ferramenta principal é a possibilidade de simular variações ambientais em diferentes escalas (local, regional e global). Em bacias hidrográficas esses modelos podem auxiliar o entendimento de diferentes processos (RENNÓ, 2004) como a transformação da precipitação em vazão, o fluxo hídrico ao longo da rede de drenagem, trocas gasosas no ciclo hidrológico e efeitos de mudança de uso do solo.

Na Bacia do Prata² concentra-se a maior população da América do Sul, com instalações de hidrelétricas e outros usos como recreação, turismo, pesca, irrigação agrícola e hidrovias para transporte de cargas a longa distância. Nessa bacia hidrográfica localizam-se as hidrovias do Tietê e Paraná-Paraguai. A capacidade hídrica do Rio Paraná, fluindo no sentido norte-sul e a formação de grandes reservatórios como Jupiá, Ilha Solteira, Porto Primavera, Itaipu e Yaciretá (Paraguai-Argentina) são de grande importância para o ecossistema, e as alterações que vem ocorrendo nesta bacia refletem a necessidade de maior detalhamento sobre as variáveis ambientais regionais (topografia, tipos de solos, pluviosidade, temperatura,

¹ As mudanças climáticas podem ser globais ou locais. Mudanças globais são provocadas por mudanças no uso da terra ligadas a emissões de gases de efeito estufa, enquanto que as mudanças climáticas a nível local são as chamadas "ilhas de calor" em áreas urbanas.

² <http://www.ambientebrasil.com.br/>

hidrografia, etc) e os impactos diretamente relacionados com as mudanças ambientais globais.

Esta dissertação desenvolveu-se no escopo do Projeto da Embrapa Solos “Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Impactos Ambientais de Atividades Agropecuárias na Bacia do Alto Taquari: Instrumento de Gestão Ambiental para os Municípios do Alto Taquari, Pantanal Matogrossense”. As pesquisas nessa região têm procurado identificar as causas e efeitos decorrentes da relação homem-ambiente, principalmente relacionadas aos processos erosivos na BAT (MARTORANO et al., 2002; GALDINO, VIEIRA, PELLEGRIN, 2006).

Para identificar áreas mais sensíveis às variações no regime termopluvial foram avaliados cenários de mudanças climáticas com o suporte dos modelos dinâmicos espaciais na Bacia do Alto Taquari.

1. 2 Hipótese

Com modelos dinâmicos espaciais é possível avaliar efeitos de ações antrópicas a partir de cenários de mudanças climáticas na Bacia do Alto Taquari.

1. 3 Objetivo Geral

Gerar cenários de mudanças climáticas na Bacia do Alto Taquari (BAT) usando modelagem dinâmica no programa TerraME (*Environment Modeling*) para identificar áreas sensíveis aos efeitos do clima na região.

1.3. 1 Objetivos específicos

Para obtenção do objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estruturar e compatibilizar a base de dados dos fatores físicos, bióticos e climáticos;
- Caracterizar as principais forças direcionadoras de alterações no uso da terra;
- Adaptar rotinas do TerraME para simular mudanças climáticas na BAT;
- e

- Gerar cenários de mudanças climáticas para auxiliar tomadas de decisão.

1. 4 Projetos relacionados

A modelagem proposta nesta dissertação se insere no contexto de indicadores de sustentabilidade de uso do solo, contemplados no Projeto SENSOR (*Sustainability Impact Assessment*), fruto da parceria entre o Programa de Pós-graduação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), especificamente neste trabalho como o Departamento de Geomática, e instituições de pesquisa nacional como a Embrapa Solos e parceiros internacionais no Projeto SENSOR.

Também, este trabalho integra-se no escopo do Projeto de cooperação internacional no âmbito do Convênio bilateral entre o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e o *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique* (INRIA), fruto da integração de pesquisadores envolvidos no Projeto “Tecnologias avançadas em processamento digital de imagens para o monitoramento automatizado do desflorestamento, degradação da terra e da expansão do sistema plantio direto através da classificação sistemática do uso e da cobertura do solo - Projeto ENVIAIR” (Processo nº 490089/2005-4).

1. 5 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No capítulo 1 são apresentados: introdução, hipóteses e objetivos, no capítulo 2 descreve-se a fundamentação teórica em modelos ambientais, com uma breve introdução sobre fenômenos estáticos, representados pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) e fenômenos com dimensões espaço-temporais, representado pelos modelos dinâmicos espaciais, descrevendo conceitos e pressupostos dos modelos. Apresenta-se uma breve revisão sobre os fundamentos de modelagem, focando nos modelos de simulação: CLUE-S e TerraME.

No capítulo 3 apresenta-se a fundamentação metodológica capaz de testar a hipótese levantada e atingir os objetivos propostos.

Os estudos apontam que a Bacia do Alto Taquari (BAT), devido à remoção da

vegetação nativa, intensidade de uso do solo e manejo inadequado, apresenta alta vulnerabilidade à erosão, motivando sua escolha na seleção da área para o estudo de caso, descrito no capítulo 4.

No capítulo 5 foram gerados cenários climáticos, estabelecidos a partir de regras de conhecimento fornecidas por especialistas que integram os projetos de pesquisa em que esta proposta de trabalho foi inserida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM MODELOS AMBIENTAIS: CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO ALTO TAQUARI E SEU ENTORNO

2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre fundamentos teóricos em modelagem de sistemas ambientais, bem como a inserção de fatores endógenos e exógenos que vêm promovendo mudanças de uso do solo e em consequência na Bacia do Alto Taquari (BAT). Primeiramente, são discutidos aspectos relacionados à espacialização da base de dados, da área de estudo, utilizando-se suporte tecnológico de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) que possibilita a representação de fenômenos estáticos. Contudo, para avaliar variações espaço-temporais há necessidade de novas tecnologias e conhecimentos específicos. Neste sentido, a tecnologia de “Modelagem Dinâmica Espacial” destaca-se pela capacidade de permitir a geração de cenários por meio de modelos dinâmicos espaciais.

A atual geração de SIGs configura uma tecnologia estabelecida para armazenar, organizar, recuperar e modificar informações sobre a distribuição espacial de recursos naturais, dados geo-demográficos, redes de utilidade pública, entre outros tipos de dados com representação espacial (CÂMARA et al., 2003), retratando uma realidade estática e invariável.

Entre os principais desafios atuais está a utilização do conhecimento e suporte tecnológico em SIGs acoplado a ferramentas capazes de prover abstrações que possam tratar apropriadamente as componentes espaciais e temporais (PEDROSA; CÂMARA, 2004). A “Modelagem Dinâmica Espacial”, utiliza modelos capazes de simular cenários que possam validar hipóteses e subsidiar tomadas de decisão. Estes modelos buscam expressar fenômenos que apresentam dimensões espaciais e temporais como, por exemplo, escoamento de água da chuva, planejamento urbano, mudanças de uso e cobertura da terra, crescimento populacional, riscos de erosão, transporte de sedimentos e dinâmica das vazões. A descrição a seguir refere-se ao embasamento teórico norteador deste trabalho.

2. 2 Fundamentação Teórica

2.2.1 Sistemas de Informação Geográfica (SIGs)

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) são ferramentas computacionais de Geoprocessamento³ que permitem a representação de dados através de mapas temáticos: geológicos, solos, clima, relevo, uso da terra, rede de drenagem, entre outros.

As aplicações em SIGs, denominado em inglês por *Geographic Information Systems* (GIS) vêm crescendo no mundo inteiro. A idéia inicial nasceu na Suécia, mas o primeiro sistema foi desenvolvido em 1962 no Canadá, denominado de *Canada Geographic Information Systems* (CGIS), objetivando apresentar um inventário das terras no país com informações sócio-econômicas e ambientais. Nos anos 70 (século XX) os Estado Unidos da América passaram a desenvolver e comercializar programa de GIS e ganharam rápido crescimento em apenas 10 anos. Com o desenvolvimento do suporte tecnológico, estas ferramentas passaram a ser integradas a modelos dinâmicos (CLUE-S, TERRAME, SIMLUCIA) para expressar respostas nas mudanças da paisagem ocasionada por diferentes fatores (climáticos, topográficos, sócio-econômicos). A Figura 1 representa um exemplo de modelagem espaço-temporal de focos de calor e queimada.

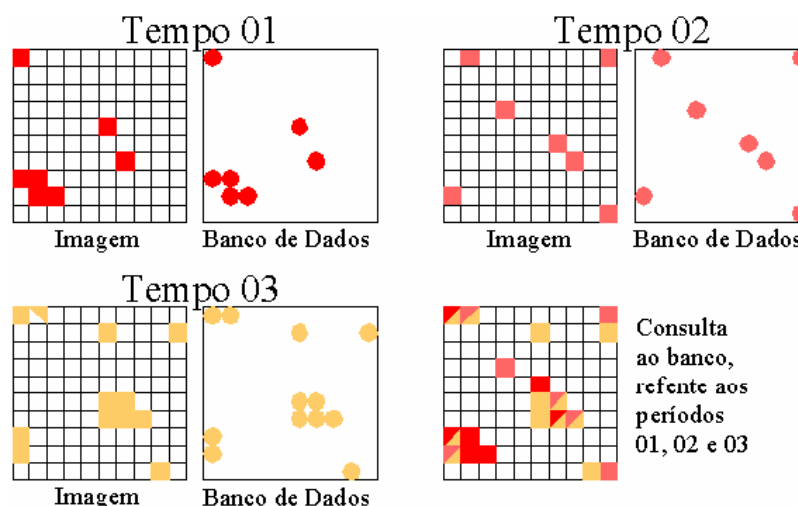


Figura 1 - Modelagem espaço-temporal de focos de calor e queimadas.
Fonte: Dias, Câmara, Davis (2005).

³ O termo geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia, Planejamento Urbano e Regional. (www.wikipedia.org)

2.2.2 Modelo

Segundo Soares-Filho (1998) o desenvolvimento de modelos objetiva a compreensão do comportamento de um sistema para dar suporte à análise de suas futuras mudanças, em que o desenvolvimento do processo é feito por meio da definição de um conjunto de hipóteses ou previsões que serão comparadas com o mundo real. Em SIGs, o objetivo dos modelos dinâmicos é simular, numericamente, processos que ocorrem de uma determinada forma, em um determinado local na superfície terrestre e que mudam em resposta a variações em suas forças direcionadoras (BURROUGH, 1998; CÂMARA, 1996).

Para Lambin (1994) os modelos podem ser divididos em duas principais categorias: Modelos Empíricos e Modelos de Sistema, conforme esquema na Figura 2.

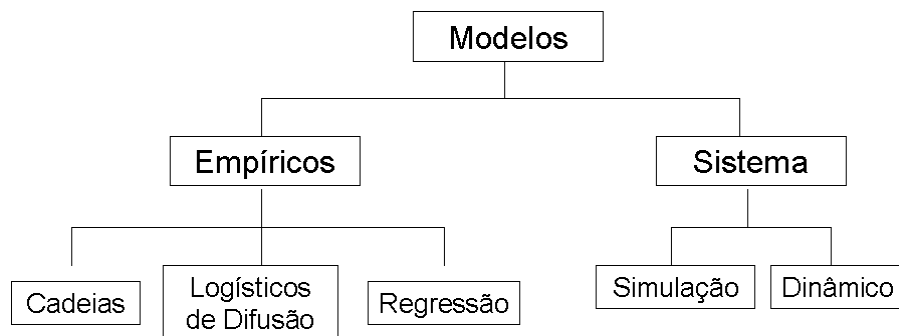


Figura 2 - Classificação dos modelos empíricos e de sistema.
Fonte: Adaptado de Lambin (1994).

2.2.2.1 Modelos Empíricos (*data-driven models*)

Os modelos empíricos ajustam-se a dados descritivos coletados sobre um dado fenômeno para esboçar conclusões “*a posteriori*”. Esses tipos de modelos não se preocupam em explicar o fenômeno ou a sua causa, baseiam-se principalmente na inferência, a partir dos dados e das leis que regem o fenômeno. São caracterizados pela simplicidade dos modelos matemáticos empregados e pelo número reduzido de variáveis envolvidas (PEDROSA; CAMARA, 2007). Esses modelos costumam supor que os processos de mudança são estacionários, ou seja, não apresentam mudanças (VELDKAMP; LAMBIN, 2001). Entre esses modelos podemos citar a Cadeia de Markov e Modelo de Regressão.

- Cadeia de Markov é uma seqüência $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de variáveis aleatórias, denominada também de memória markoviana, em que os

estados anteriores são irrelevantes para a predição dos estados seguintes, desde que, o estado atual seja conhecido, procurando descrever matematicamente processos estocásticos. Pedrosa; Câmara (2007), reforçam que o modelo não ignora o passado, mas assume que toda a informação do passado está concentrada no presente estado do sistema. Utilizando a Cadeia de Markov com dados de frequência da distribuição diamétrica, recrutamento e mortalidade da floresta em Manaus, no período de 2000 a 2004, Teixeira et al. (2007), concluíram que as análises markovianas apresentam-se como um eficaz instrumento para projetar a dinâmica da floresta natural. Evidências de aplicação da cadeia de Markov de terceira ordem foram também destacadas por Keller et al. (2006) como importante instrumento de análise das chuvas no Planalto Central brasileiro, indicando que a ocorrência de chuva, em cada dia, é condicionalmente dependente da seqüência de dias secos e chuvosos nos três dias anteriores. Outras aplicações podem ser encontradas na literatura, mas esse não é o foco deste trabalho e foram citados como possibilidades de utilização em modelos preditivos.

- Modelos de regressão - Os modelos de regressão são um dos métodos estatísticos mais usados para analisar a relação entre as variáveis cujo objetivo é explicar uma ou mais variáveis de interesse (fenômeno em estudo) em função de outras variáveis. Segundo Pedrosa e Câmara (2007) este modelo contribui para o entendimento do fenômeno em estudo, mas é insuficiente para explicá-lo, pois a identificação de um relacionamento estatístico entre duas variáveis por si só não estabelece um relacionamento causal entre elas. Nos modelos logísticos de difusão as causas de um fenômeno não são explicadas, mas podem integrar variáveis ecológicas e socioeconômicas. Sua maior contribuição está na predição do comportamento futuro do fenômeno. Para dar uma idéia de aplicação desses modelos, cita-se Negreiros et al. (2008) nas avaliações da dengue em Sobral e Fortaleza, no Ceará, que destacaram a importância da modelagem para avaliar a evolução da doença e auxiliar na análise de outros

aspectos relacionados, subsidiando nas decisões dos gestores de saúde em tempo hábil, diante de casos de dengue na região.

2.2.2.2 Modelos de Sistemas

Os Modelos de Sistemas procuram descrever o sistema como um todo, procurando representar as interações entre todos os seus componentes. São classificados como modelos exploratórios porque fornecem condições para que várias simulações possam ser investigadas, a partir de diferentes cenários. Apresentam como características principais: dimensão espacial, relações de vizinhança e uso combinado de múltiplas escalas. Foi levado em consideração, dois tipos de modelos: Modelos de Simulação de Ecossistemas e Modelos de Simulação Dinâmica Espacial.

- Modelos de Simulação de Ecossistemas - são planejados para reproduzir o comportamento de um sistema, enfatizando as interações entre todos os seus componentes. Sua construção necessita que os principais aspectos que alteram o fenômeno estejam bem integrados, que haja relacionamento funcional, permitindo ao modelo prever os impactos ecológicos e econômicos das mudanças, ao longo do tempo.
- Modelos de Simulação Dinâmica Espacial - visam modelar a heterogeneidade espacial de ecossistemas, associadas aos processos de ações humanas e auxiliar na tomada de decisão. Uma maneira para desenvolver modelos de simulação da dinâmica espacial é representar o espaço como uma matriz de células e aplicar as equações matemáticas a cada uma das células da matriz, simultaneamente (PEDROSA; CÂMARA, 2007). Dentro deste contexto está inserido a modelagem de mudança do uso da terra, uma tentativa de modelar as causas e conseqüências das dinâmicas de uso da terra (VERBURG et al., 2004), e a modelagem de cenários de mudanças climáticas (enfoque deste trabalho) uma tentativa de avaliar os impactos nas áreas de uso, especialmente a agricultura, assim como, os efeitos das mudanças do uso da terra sobre as variações climáticas.

Estes modelos possuem características e tecnologias diferentes que permitem análises importantes, entre elas, subsidiar os tomadores de decisão a avaliar estratégias mais adequadas às mudanças de uso da terra e à variabilidade climática. Dentro dessas tecnologias encontram-se os modelos da série *Conversion of Land Use and its Effects* (CLUE), que evoluiu para o *Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent* (CLUE-S), destinados à modelagem de uso da terra com aplicações em diferentes partes do globo terrestre (China, Filipinas, Indonésia).

No Brasil, estes tipos de modelos vêm ganhando espaço na última década em que dois modelos dinâmicos foram desenvolvidos: Modelo DINÂMICA, desenvolvido por Soares-Filho et al. (2002), que conta com uma nova versão, denominada DINÂMICA-EGO (RODRIGUES, et al., 2007) cuja proposta é o estudo da dinâmica do uso da terra e o Modelo TerraME (*Environment Modeling*), desenvolvido em Carneiro (2006), cuja proposta é dar liberdade ao modelador para simular qualquer fenômeno.

Um dos métodos mais utilizados para a modelagem dinâmica de dados espaços-temporais são os autômatos celulares (ACs) utilizado em larga escala na representação espacial de modelos urbanos ocorridos no final da década de 80 (ALMEIDA et al., 2007). Sua aplicação abrange as mais diversas áreas, desde a física teórica e empírica até mudanças de uso e cobertura do solo, engenharia e tráfego, disseminação de epidemias e biologia comportamental (ALMEIDA et al., 2003).

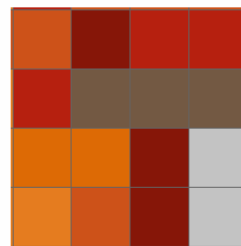
2.2.3 Autômato Celular - AC

É um modelo espacialmente explícito que simula processos espaço-temporais utilizado em diversas simulações, suas ferramentas computacionais podem ser utilizadas na modelagem de sistemas preditivos ou de exploração espacial. O estado inicial do pixel é baseado nas condições de sua vizinhança e numa série de regras de transição. Sua estrutura é apresentada de diferentes formas.

- Células: Uma célula de um AC pode ser considerado um elemento de memória que armazena dados celulares⁴. São objetos do universo de modelagem que podem assumir diferentes formas (quadrada, retangular, hexagonal) e dimensões (uni, bi ou tridimensional), os quais devem manifestar algum tipo de adjacência, ou proximidade entre si. Isto simplifica o mecanismo de predições do sistema. Por exemplo: “se uma célula tem três vizinhos com estado X, é altamente provável que o estado desta célula venha a ser X também” (PEDROSA; CÂMARA, 2007).
- Grades: A grade constitui o plano espacial onde as células estarão dispostas no autômato celular. Pode estar disposta em dimensões diferentes com uma, duas ou até mesmo três dimensões, de acordo com a Figura 3.



Grade de células com uma dimensão - 1D



Grade celular Bi-dimensional (2D)

Figura 3 - Grade celular e suas dimensões.

- Estados: trata-se de um atributo único (discreto) apresentado por cada célula em um intervalo de tempo considerado. (Exemplo: determinada célula no tempo t é uma área de cultivo e no tempo $t+1$ é uma área abandonada).
- Vizinhança: As vizinhanças são estruturas básicas de um AC, nas quais as ações e decisões são definidas. Geralmente, ao redor de cada célula, são formadas oito células, o que pode gerar até oito direções podendo assumir diferentes formatos (cruz ou vizinhança de von Neumann; janela 3x3 ou vizinhança de Moore; etc.) e seus estados e

⁴ Os pixels de imagens orbitais podem ser considerados dados celulares analisados por um autômato celular.

configurações irão condicionar a direção e quais as células sofrerão mudança durante o desenvolvimento do processo. A Figura 4 mostra alguns tipos de vizinhança: vizinhança de von Neumann, vizinhança de Moore e vizinhança de Moore estendida.

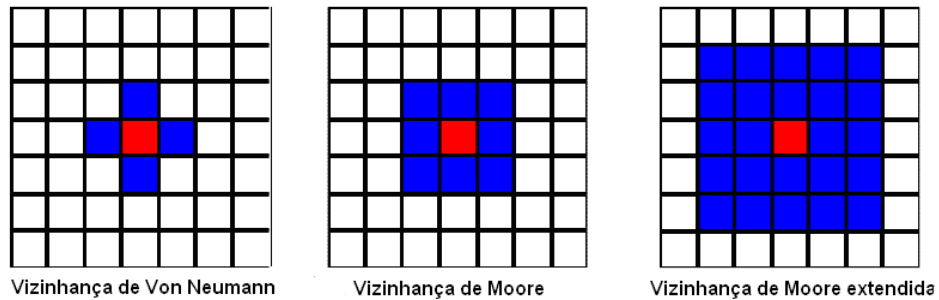


Figura 4 - Diferentes tipos de vizinhança de um autômato celular (AC), onde a célula vermelha é a central e as células azuis representam sua vizinhança.

Fonte: Hellmann, 2005.

- Regras de transição: é o componente mais importante em um sistema que utiliza um modelo AC, porque os possíveis estados que as células podem assumir serão definidos pelas regras impostas no modelo utilizado, ou seja, especificam quando e onde estas células irão mudar. Portanto as regras de transição determinam as mudanças de estado das células a cada instante de tempo (passo ou iteração). Estas regras são uniformes e aplicam-se, indistintamente, a toda célula, estado ou vizinhança (Figura 5).

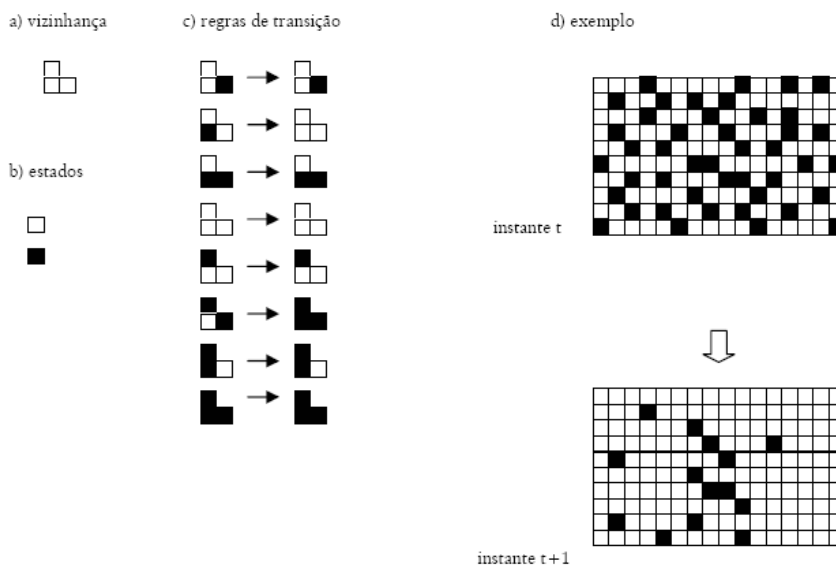


Figura 5 - Estrutura de um autômato celular (AC).

Fonte: Câmara (1996).

Os modelos espaço-temporais possuem especificidades, conforme Verburg et al. (2004), sendo que a maioria delas são aplicadas a modelos de uso da terra sendo descritas a seguir:

- **Nível de Análise** – Neste nível procura-se associar dados do nível micro e macro, porém, esta conexão torna-se difícil devido as diferenças de escalas existente entre eles. Dentro deste contexto estão os dados relacionados às ciências sociais, estudados em ambos os níveis (Verburg et al., 2004). a) **O nível micro** é baseado na simulação dos comportamentos de indivíduos com possibilidade de aumento de escala, neste caso são usados os modelos multi-agentes. Os multi-agentes ou “Sistemas Multi-Agentes” referem-se a uma entidade computacional com comportamento autônomo que atua independentemente de outra entidade, o que lhe permite decidir suas próprias ações. Estas ações dependem das várias condições dadas por outros agentes ou pelo ambiente do qual ele faz parte, sendo representada por um indivíduo, uma instituição ou simplesmente uma regra na forma de lei. Fundamentalmente, a teoria de multi-agentes lida com controle, hierarquia, sincronização e comunicação entre agentes. Suas aplicações são principalmente voltadas para inteligência artificial. b) **O nível macro** é baseado em teorias macro-econômicas ou sobre análises de uma estrutura espacial do uso da terra, sem a necessidade de levar em conta os comportamentos individuais ou setores da economia, como o Modelo CLUE.
- **Dinâmicas entre escalas** - Gibson et al. (2000) definem que existem dimensões nas escalas, as quais são: espacial, temporal, quantitativa ou analítica e que suas diferentes representações possuem uma resolução e extensão. Na **representação espacial** as resoluções de padrões globais apresentam baixo nível de detalhe e as locais apresentam precisão na informação. A precisão significa o menor nível de resolução espacial possível em um tipo de dado, em imagens orbitais esta exatidão é representada pelo tamanho do pixel. A extensão refere-se ao tamanho da área de estudo, ao se trabalhar com uma grande extensão haverá a inclusão de vários padrões espaciais que são resultados de diferentes

processos, ao passo que pequenas extensões podem não destacar os padrões espaciais. É importante ressaltar que a escala terá uma grande influência na escolha das forças direcionadoras que serão utilizadas para a execução do modelo. **Escala como representação temporal** – após definir a escala de trabalho espacialmente, deve-se escolher a resolução temporal. A extensão refere-se ao período de tempo considerado na análise. Ex: A extensão considerada neste trabalho é de 100 anos, enquanto que a resolução refere-se à frequência na qual o fenômeno é registrado (neste trabalho as informações climáticas são da média anual).

Escala como representação analítica – essa representação refere-se às causas que originam as alterações no clima e no uso da terra, ou seja, os vários processos que atuam sobre ele. A extensão é a série de processos levados em consideração, como por exemplo, cabeças de gado e rendimento de soja, sendo a resolução o nível mais baixo de organização do processo, podendo ser exemplificado pelo nível de proprietário de terras ou nível de comunidade.

- Forças Motoras (*Driving forces*) – Para Bürgi et al. (2004), as forças motoras são responsáveis por alterações consideráveis na paisagem. O autor descreve que existem cinco grupos de forças direcionadoras do tipo: sócio-econômicas, políticas, tecnológicas, naturais e culturais. Forças típicas da sócio-economia podem ser citadas, por exemplo, como o aumento da globalização, economia de mercado e barreiras de exportação. As forças políticas na maioria das vezes estão ligadas aos fatores sócio-econômicos. As tecnológicas relacionam-se a introdução de novas tecnologias que afetam seriamente o ambiente. As naturais estão relacionadas a aspectos que integram a paisagem, como: clima, topografia, solo, geologia, entre outros. Já as culturais são mais difíceis de serem definidas, pois estão intimamente relacionadas com as demais.
- Interação espacial e efeito de vizinhança - O conceito de interação pode ser visto como uma ação de reciprocidade entre pessoas ou lugares num dado sistema (BEZ, 2005). Ullman (1954) introduziu o termo interação espacial (autocorrelação espacial) e as três condições interdependentes necessárias são elas: a) **complementariedade**:

existência de compatibilidade entre oferta e demanda dos locais de interação; b) **oportunidades interpostas**: não-existência de outros locais mais próximos, susceptíveis de ofertar ou receber e c) **capacidade de transferência**: existência de uma infraestrutura capaz de suportar as trocas. Esta autocorrelação pode ser encontrada em: grupos (*cluster*) de feições de paisagem determinando seu padrão de uso e entre tipos de uso, ou seja, a expansão urbana normalmente está próxima de outras áreas urbanas. As interações espaciais também podem atuar sobre grandes distâncias, por exemplo, mudanças no uso da terra a montante de um rio pode provocar alterações a jusante, devido o aporte de sedimentos erodidos. Almeida et al. (2008) verificaram que houve convergência espacial da produtividade agrícola da terra nas microrregiões brasileiras no período entre 1991 a 2003.

- Dinâmica Temporal - Os modelos dinâmicos temporais levam em conta inicialmente o uso da terra como um critério de mudanças permitidas. Os autômatos celulares com suas regras de decisão determinam a probabilidade de conversão. O modelo Dyna-CLUE usa um tipo específico de conversão (Conversão de elasticidade) para cada tipo de uso. Este tipo de modelo é baseado na tendência de mudança do uso da terra. Jansson et al (2008) reforça o potencial de elasticidade do Dyna-CLUE para avaliar a dinâmica de impactos de políticas públicas no crescimento e rendimento agrícola.
- Nível de Integração - Atualmente, os modelos integrados, capazes de extrair informações de diversas áreas do conhecimento científico como ecologia, meteorologia, geografia, geologia e agronomia vêm ganhando espaço nas avaliações sistêmicas. Como exemplo de modelagem realizada por modelos integrados tem-se as modelagens de mudanças climáticas e de dimensões políticas. Nessa linha enquadra-se o Modelo SimLucia (ENGELEN et al., 1995), exemplificado no diagrama da Figura 6. Este modelo representa uma estrutura de modelagem dinâmica e de suporte à decisão que integra diferentes escalas. O SimLucia está dividido em macro e micro escala, a macro-escala representa os sub-sistemas natural, econômico e

social, enquanto a micro-escala consiste em um autômato celular sobre o qual são aplicadas as regras de transição para calcular as mudanças dinâmicas no sistema em estudo.

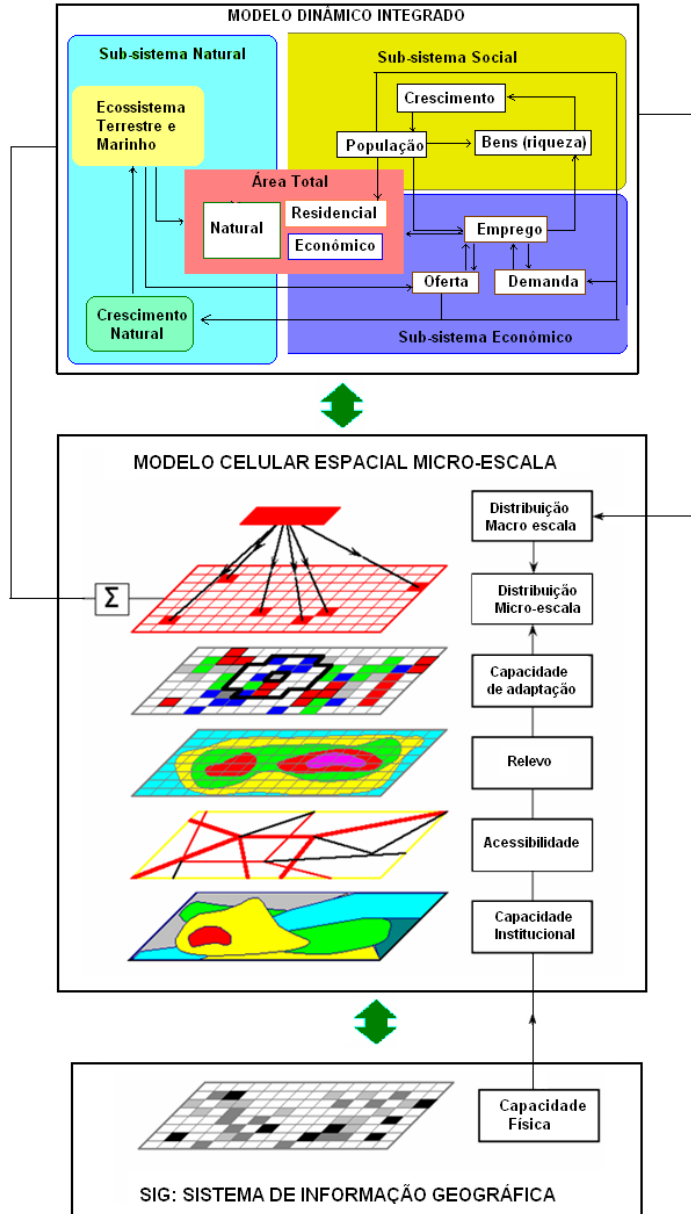


Figura 6 – Diagrama de integração entre o modelo multi-escala SimLucia e um SIG.
Fonte: Adaptado de Engelen et al. (1995).

Em uma visão geral, um modelo deve responder questões como: por que, quando e onde o processo ocorre, possibilitando descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, de forma que ocorra integração entre as escalas temporal e espacial. (PINTO et al., 2006).

2. 3 Visão geral dos modelos CLUE-S e TerraME

2.3.1 Modelo CLUE-S

A maioria dos modelos de mudança de uso, geralmente é capaz de simular apenas um tipo de conversão de uso da terra (ex. desmatamento). O modelo *Conversion of Land Use and its Effects* (CLUE)⁵ foi desenvolvido para simular as mudanças de uso da terra usando relações empíricas entre o uso e suas forças direcionadoras numa combinação com a modelagem dinâmica (VELDKAMP; FRESCO, 1996; VERBURG et al., 1999). Este modelo foi desenvolvido para uma extensão territorial a nível nacional e continental, onde os dados em sua maioria foram extraídos de censos e sua representação espacial é maior que 1 km².

Os dados de uso da terra em escala local ou regional são baseados nos mapas de uso da terra ou imagens de sensoriamento remoto com representação matricial. Pelo fato de alguns dados representarem feições típicas de aplicações regionais, o modelo CLUE não pode ser aplicado numa escala regional ou local. Para solucionar este problema, o modelo foi modificado evoluindo para o *Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent* (CLUE-S), descrita em Verburg et al., (2002) e foi desenvolvido especificamente para simulações a nível local e regional, as quais se baseiam em análises empíricas de locais adequados, combinados com simulação dinâmica de competições e interações entre a dinâmica espaço-temporal do sistema de uso.

Esse modelo é subdividido em dois módulos distintos: uma componente espacial e outra não espacial. O módulo não espacial calcula a mudança de área para todos os tipos de uso da terra num nível regional. Dentro do módulo espacial essas demandas são distribuídas na área de estudo usando um sistema baseado em dados matriciais (Figura 7).

⁵ www.cluemodel.nl/obtainfull.html

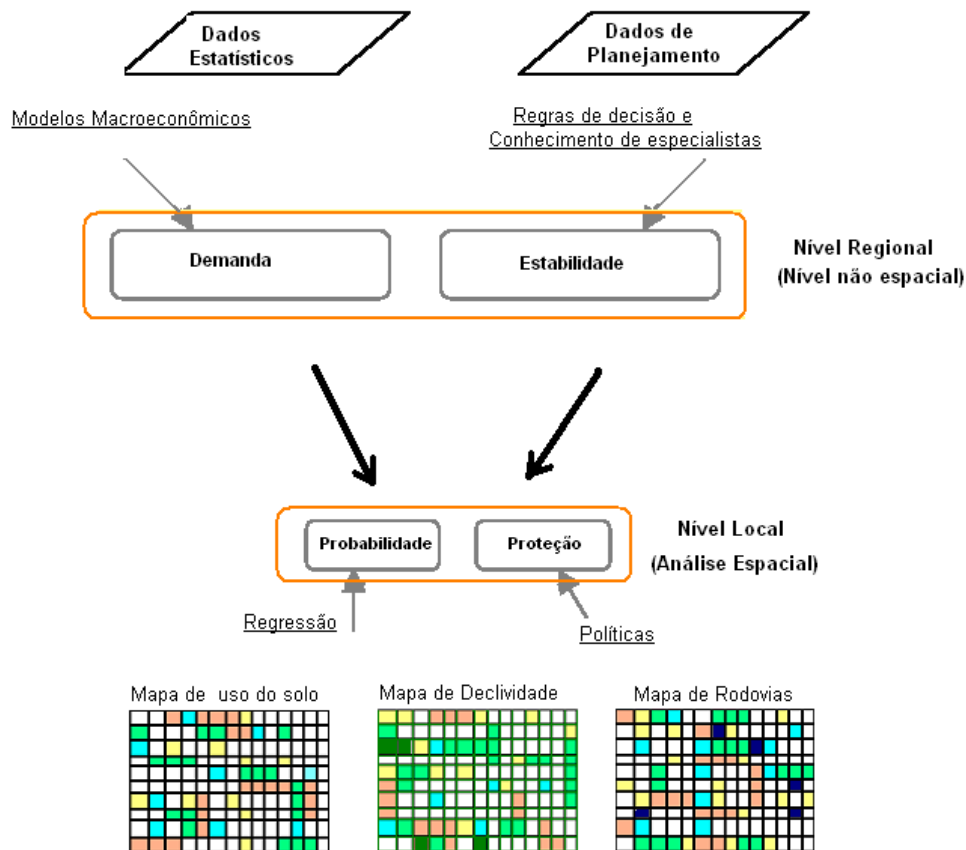


Figura 7 – Representação da sub-divisão espacial e não-espacial do modelo CLUE-S.

2.3.1.1 Processo de distribuição do CLUE-S

As informações que são inseridas neste modelo são divididas em quatro categorias que juntas criam uma série de condições e possibilidades que permitem calcular a melhor solução num processo iterativo. São elas:

1. Restrições e políticas públicas - A área de restrição indica quais células permanecerão sem alterações e quais serão levadas em conta na simulação de mudança de uso da terra. Esta categoria geralmente indica áreas protegidas⁶ onde as mudanças são limitadas através de políticas públicas⁷.
2. Conversão de cenários de um tipo específico de uso da terra – A conversão de um tipo específico de uso determina a dinâmica temporal das simulações. Dois parâmetros são necessários para caracterizar cada tipo de uso: Conversão de elasticidade e Seqüências de transição do uso da terra. Na **Conversão de Elasticidade ou Estabilidade** o cenário indica a facilidade de

⁶ As áreas protegidas são: Parques Naturais, zonas de desenvolvimento voltado para a agricultura, etc.

⁷ Como políticas públicas tem-se: proibição do corte de madeira em área de reserva florestal, pavimentação de estradas e a criação de áreas protegidas.

mudança de um determinado tipo de uso da terra. Os fatores de estabilidade são não-espaciais e definidos para cada tipo de uso. Como exemplos podem ser citados: a) Tipos de uso da terra com alto investimento não serão facilmente convertidos em outros tipos de uso, porque há demanda suficiente ou b) Certos tipos de uso são facilmente convertidos em outros tipos de uso da terra porque o local é mais apropriado a um determinado tipo de uso. Para cada um deles há um valor que precisa ser especificado. Este valor representa a elasticidade relativa (estabilidade) de mudança. A Tabela 1 apresenta os possíveis valores de acordo com a descrição de comportamento das mudanças. Na **Seqüência de transição do uso da terra** os cenários são especificados em uma matriz de conversão. Esta matriz define: a) Para qual tipo de uso da terra o presente uso pode ser convertido, b) Em que regiões uma conversão específica é permitida ocorrer e c) Quanto tempo um tipo de uso da terra de um local pode permanecer o mesmo antes de sua mudança para outro tipo de uso.

Tabela 1 - Tabela de elasticidade

Valor	Descrição do Comportamento
0	Dinâmico: Todas as mudanças são permitidas, independente das condições da terra.
1	Estático: Este cenário é relevante para os tipos de uso da terra que são difíceis de serem convertidos. Ex: Assentamentos Urbanos
Valor entre 0 e 1	Elasticidade: Quanto mais próximo de 0, mais facilmente ocorrem mudanças, quanto mais próximo de 1, menor a chance de mudança.

3. Condições do Uso da Terra (Demanda)

A demanda relaciona as mudanças de uso da terra com uma base anual do fenômeno estudado. Para análises políticas é possível basear as demandas em modelos de mudanças macro-econômicos, o qual pode servir para produzir cenários, relacionando objetivos políticos com as condições de mudança da terra, como exemplo cita-se a demanda por etanol que exigirá energias renováveis e subsídio do governo para o incentivo da cana-de-açúcar, acarretando possivelmente

o aumento do desmatamento ou a redução de determinadas culturas para a substituição da cana-de-açúcar.

4. Características Locais

As características locais (*driving factors*) determinam a ocorrência espacial para cada tipo de uso. Esta ocorrência é dada pela probabilidade de uma determinada célula possuir determinado tipo de uso. A análise estatística para alcançar este resultado é baseada na análise da Regressão Logística. Este método estatístico é usado porque as variáveis dependentes são dicotômicas (0 ou 1) e as variáveis independentes são contínuas ou categóricas. Neste caso, os tipos de uso da terra representam as variáveis dependentes em que o valor um indica sua presença e o valor zero indica a ausência de determinado tipo de uso em cada célula.

2.3.2 Modelo TerraME

O modelo de simulação TerraME – *Environment Modeling* é um ambiente de modelagem e simulação de processos ambientais desenvolvido recentemente por Carneiro (2006) que permite aos usuários criar estruturas e regras que possibilitará definir o comportamento do modelo utilizando a linguagem de programação TerraME. Sua plataforma computacional dá suporte ao desenvolvimento de modelos ambientais em múltiplas escalas integrados a banco de dados geográficos.

O TerraME surgiu da necessidade de se ter um modelo que adequasse o suporte computacional com a modelagem multi-escala – *Nested-CA*, visto que, modelos baseados em extensões de AC aplicam apenas uma única série de regras para o espaço celular, como é o caso do modelo CLUE-S que não leva em consideração as ações humanas, devido a complexidade do sistema para representar a escolha de decisões, enquanto que, os modelos baseados em agentes, que considera as ações humanas, apresentam como desvantagem a dependência de mudanças de escala.

Para os modelos *Nested-CA* as escalas são definidas como uma combinação particular da resolução e extensão: espacial (*CellularSpace*), temporal (*timer*) e analítica (*Automaton*). Estas escalas podem ser definidas independentemente e

então formar o modelo multi-escala, cada escala é modelada por um único *nested-CA* incorporando todas as dimensões (Figura 8).

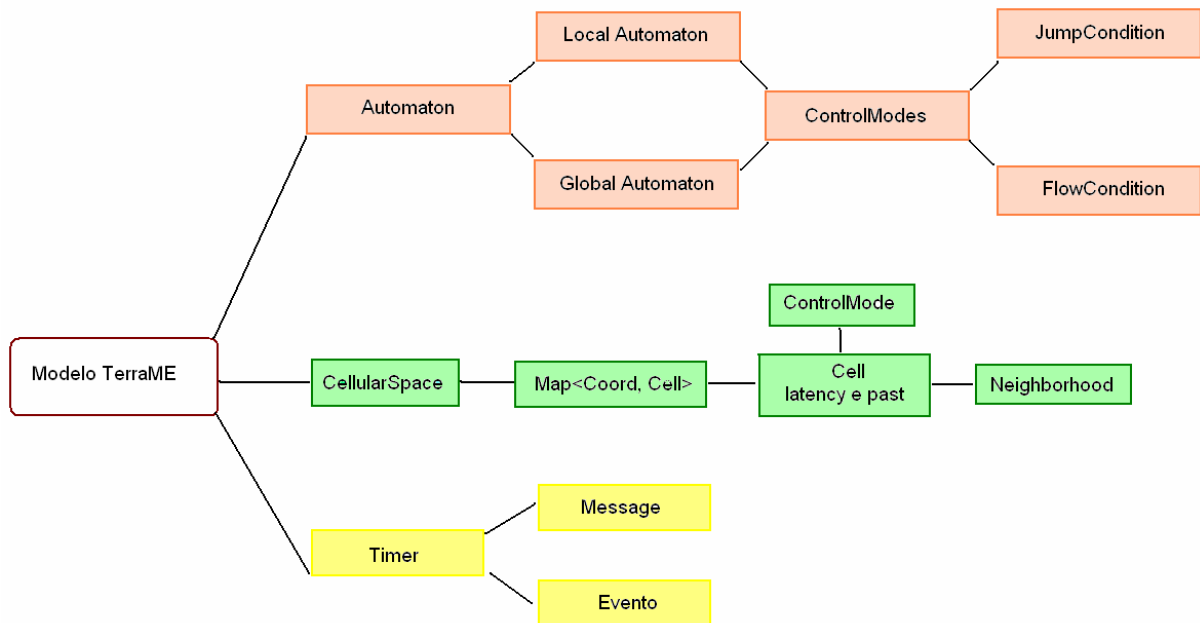


Figura 8 – Diagrama do modelo multi-escala no modelo TerraME.

Nesse tipo de modelo escolhe-se a resolução espacial, temporal e analítica associada com cada processo (ex: capacidade de infiltração). Cada processo é associado a um *nested-CA*, gerando simulações onde os modelos dinâmicos são aninhados em outros, permitindo que diferentes processos operem em uma mesma paisagem. Nesse tipo de modelo estão outros modelos: *Global Automaton* e *Local Automaton* que são classificados como modelos analíticos (CARNEIRO, 2006). O modelo *Global Automaton* permite o desenvolvimento de modelos baseados na abordagem de sistemas multi-agentes, enquanto que o *LocalAutomaton* permite o desenvolvimento de modelos baseados na abordagem dos automatos celulares.

2.3.2.1 Características principais

1 - O ambiente TerraME - Os serviços da modelagem fornecida pelo TerraME são distribuídos em cinco módulos: Estrutura TerraME, Interpretador TerraME, TerraLib, TerraView, LUA e Eclipse (Figura 9). Destaca-se que apenas os módulos, Estrutura TerraME e Interpretador TerraME foram desenvolvidos por Carneiro (2006).

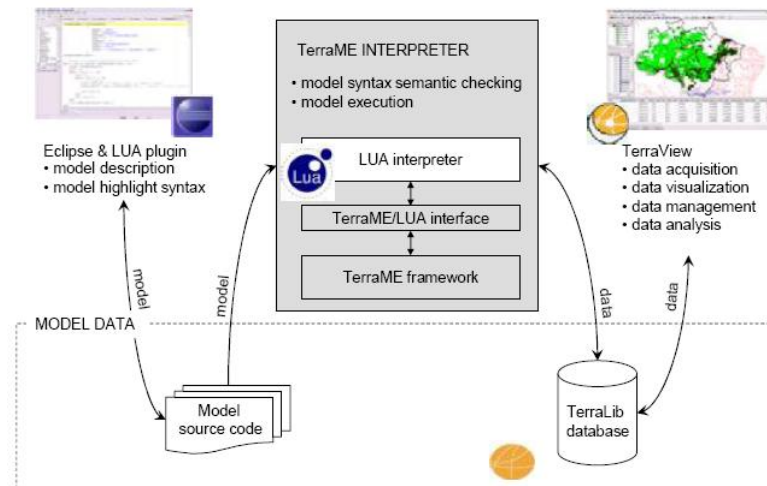


Figura 9 - Módulos do TerraME.
Fonte: Carneiro (2006).

2 - Estrutura TerraME - A estrutura TerraME é uma série de arquivos em linguagem C++, contendo definição de classes e objetos (Quadro 1), que podem ser usados para desenvolver o modelo dinâmico espacial ou expandir a arquitetura TerraME.

```

myScale = Scale{
id = "MyScale",
-- Add cellular spaces to this scale (spatial scale dimension)
cs1 = CellularSpace{ ... },
cs2 = CellularSpace{ ... },
...
csN = CellularSpace{ ... },
-- Add automata to this scale (analytical scale dimension)
aut1 = LocalAutomaton{ ... },
aut2 = GlobalAutomaton{ ... },
...
autN = LocalAutomaton{ ... },
-- Add timers to this scale (temporal scale dimension)
t1 = Timer{ ... },
t2 = Timer{ ... },
...
tN = Timer{ ... },
-- Add subscale to this scale (multiple scale modeling)
sc1 = Scale{ ... },
sc2 = Scale{ ... },
...
scN = Scale{ ... },
}

```

Quadro 1 – Estrutura das definições de escala na linguagem TerraME.
Fonte: Carneiro (2006).

3 - Interpretador TerraME - O interpretador TerraME (terraME.exe) é a parte principal do ambiente de desenvolvimento TerraME. Ele lê um programa escrito na linguagem de modelagem TerraME. Os outros módulos da arquitetura TerraME são implementadas em projetos de domínio público: TerraLib, TerraView, LUA e Eclipse, os quais apresentam as seguintes características:

- a) TerraLib - é uma biblioteca de classes desenvolvidas em C++ para a construção de aplicativos geográficos, baseados na arquitetura integrada com código fonte aberto e distribuída como um software livre. Destina-se a servir como base para o desenvolvimento cooperativo na comunidade de usuários ou desenvolvedores de SIG's (VINHAS; FERREIRA, 2005), ou seja, oferece gerenciamento de dados espacial e serviços de análise e funções adicionais para o uso de dados temporais.
- b) TerraView – trata-se de um aplicativo geográfico onde os dados são manipulados e visualizados, utiliza a biblioteca TerraLib disponível para Linux e Windows.
- c) LUA - é uma linguagem de extensão e serve como base para a linguagem TerraME: ela funciona somente com um programa hospedeiro, ou seja, não possui características de um programa principal. Neste caso o TerraME (programa hospedeiro) busca funções para executar parte do código Lua, podendo escrever e ler variáveis Lua e registrar funções em diferentes linguagens para serem chamadas pelo código Lua. As variáveis em Lua não têm tipos; elas apenas armazenam valores de diferentes tipos. Diz-se que as variáveis são tipadas dinamicamente. Esta linguagem foi projetada e implementada por uma equipe no laboratório Lablua da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- d) Eclipse - é um editor de rotinas no qual o modelo na linguagem TerraME é desenvolvido, ou seja, onde as rotinas são implementadas. É usado preferencialmente pelo TerraME porque possui um *free plugin* para a linguagem LUA e pode ser configurado para executar o modelo. Outra opção de editor é o aplicativo livre Crimson (Crimson Editor 3.70 Release).

2.3.2.2 Aplicações do TerraME

O modelo foi aplicado para a região da Amazônia Brasileira para simular o processo de desmatamento de 1997 a 2015, em que foi usado o módulo de distribuição do CLUE sobre a base de dados de Escada (2003) e Aguiar (2006). Em Jesus (2008) sua aplicação destinou-se a simular a taxa de crescimento dinâmico-populacional de acordo com taxas de nascimento e morte dado um número inicial de indivíduos de uma determinada população.

Lima et al., 2008 apresentam o desenvolvimento do *TerraME Graphical Interface for Modeling and Simulation* (TerraME GIMS), uma plataforma gráfica para a construção de modelos dinâmicos espaço-temporais para o ambiente TerraME, com o intuito de ampliar a comunidade de usuários deste ambiente de simulação.

2.4 Evidências de mudanças de uso da Terra e condições climáticas na Bacia do Alto Taquari (BAT) e seu entorno

A Bacia do Alto Taquari (BAT) nas últimas décadas passou por significativas transformações causadas por ações antrópicas (GALDINO, VIEIRA, SORIANO, 2003) e variabilidades climáticas (TUCCI, 2001), aspectos importantes que devem ser considerados nas avaliações das dinâmicas espaço-temporais na região.

Estudos apontam que os problemas ambientais existentes na área de estudo produzem impactos diretos no bioma Pantanal com aumento de áreas alagadas em determinados ambientes e assoreamento de córregos e rios, em outras áreas. Além disso, a BAT está inserida na Bacia do Rio da Prata que é a segunda maior bacia brasileira e a quinta do mundo com extensão territorial de 3,1 milhões de km². Esta bacia envolve cinco países da América do Sul (Argentina, Bolívia, Brasil, Paraguai e Uruguai), sendo que no Brasil concentra-se o maior pólo de desenvolvimento no eixo centro-sul do país.

A região Centro-Oeste brasileira passou por grandes transformações a partir da mudança da capital do Brasil para Brasília em 1960. O Estado de Mato Grosso do Sul, onde está inserida a maior área da BAT, foi criado em 1977, por Lei Complementar nº 31 (assinada pelo presidente Ernesto Geisel), com sede de governo na cidade de Campo Grande. Esse estado pertencia a Mato Grosso, mas as peculiaridades ambientais motivaram o seu desmembramento. Para a jurisdição de Mato Grosso do Sul ficaram as áreas com características de cerrado, sendo as

terras mais indicadas à agricultura e a pecuária, e para Mato Grosso as áreas típicas de floresta amazônica (CAMPESTRINI; GUIMARÃES, 2002).

Programas de governo promoveram o desenvolvimento dessa região, como por exemplo: Prodoeste⁸, Prodepan⁹, Polocentro¹⁰, Prodegran¹¹ e Polonoroeste¹², mas são apontados como responsáveis por grandes transformações na dinâmica da bacia do Alto Taquari e no Pantanal (GALDINO; VIEIRA; PELLEGRIN, 2006).

Na década de 70 (século XX) a região Centro-Oeste passou por pressões com o avanço da fronteira agrícola, principalmente com cultivos de milho e soja. A partir de 2000 os interesses se voltam para expansão da cana-de-açúcar no Brasil.

2.4.1 Modelos de simulações para o estabelecimento de cenários climáticos

Com base em técnicas estatísticas é possível extrair informações de séries temporais capazes de sinalizar alterações climáticas, confirmar flutuações e evidenciar a dinâmica sazonal de variáveis meteorológicas da região de interesse.

O conhecimento do padrão climático de uma região auxilia no planejamento de implantação e condução de cultivos agrícolas. A variabilidade de condições meteorológicas, em diferentes escalas espaciais e frequências temporais, pode ser um agente condicionante do sucesso ou fracasso de uma safra. Segundo Streck e Alberto (2006) as mudanças climáticas poderão afetar o ciclo hidrológico e, por conseguinte, a oferta hídrica para atender a demanda em cultivos agrícolas. No terceiro relatório (IPCC, 2007), as projeções nos aumentos da temperatura do ar indicaram valores superiores a 1°C e inferiores a 5°C, em 2100.

⁸ Programa de desenvolvimento do Centro-Oeste criado em 1971.

⁹ Programa de desenvolvimento do Pantanal, criado em 1975 e que abrangeu a região do Pantanal de MS e MT.

¹⁰ Programa de desenvolvimento do Cerrado, criado em 1975 e teve como objetivo o desenvolvimento e a modernização das atividades agropecuárias da região Centro-Oeste e do oeste do estado de Minas Gerais.

¹¹ Programa de desenvolvimento da região da Grande Dourados criado em 1975 e que abrangeu a região de Dourados no sul de MS.

¹² Programa de desenvolvimento integrado do nordeste do Brasil criado em 1981 a 1985 e que abrangeu o oeste e noroeste de MT (incluindo RO).

3 FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Aquisição de dados

Para avaliar as mudanças climáticas foram selecionadas as variáveis do clima (precipitação e temperatura) e as variáveis biofísicas (altitude e uso do solo) na BAT. Assim sendo, fez-se uma avaliação na base de dados utilizada por Jonathan (2005), procedendo-se os ajustes necessários quanto a acurácia da informação na base de dados.

3.1.1 Dados obtidos na Embrapa Solos

A base de dados da BAT que integra o projeto: *Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Impactos Ambientais de Atividades Agropecuárias na Bacia do Alto Taquari: Instrumento de Gestão Ambiental para os Municípios do Alto Taquari* desenvolvido pela Embrapa Solos, utilizada por Jonathan (2005) foi cedida para a realização deste trabalho. Esta base foi avaliada visando identificar necessidades de ajustes e novos dados para compor os mapas de trabalho, descritos a seguir:

1. Dados vetoriais: Contorno da bacia que correspondem aos vetores da malha municipal, viária e hidrográfica;
2. Dados matriciais: Mapa de uso e cobertura do solo resultante da classificação da imagem MODIS do ano de 2001, realizada por Jonathan (2005), com resolução espacial de 250 m², apresentando as classes de cerrado, agricultura, pastagem e área urbana, as quais identificam os grandes padrões de uso e cobertura do solo na BAT;
3. Foram realizados procedimentos de ajustes na malha viária e rede de drenagem, tomando-se como referência a imagem do satélite Landsat 5, de 2001, usando ferramentas de edição do aplicativo ArcGis v. 9.2.

3.1.2 Dados obtidos na WEB - WorldWideWeb

Foram realizadas buscas na rede de alcance mundial, conhecido como Web, em bases de dados gratuitos das seguintes fontes:

- Dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para obter dados de altitude e declividade em <http://seamless.usgs.gov>;

- Dados censitários do IBGE, 2004 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) relacionados em <http://www.ibge.org.br>;
- Dados climáticos de precipitação pluvial, temperatura do ar e umidade relativa do ar em <http://www.iwmi.org> e
- Dados da malha viária e sedes municipais, disponibilizados no Atlas produzido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (<http://www.inpe.br/>).

3.2 Avaliação de variáveis candidatas a forças direcionadoras de mudanças de uso da terra

É necessário conhecer o processo de ocupação da área de estudo para tentar encontrar os indicadores que são responsáveis pela variabilidade das mudanças climáticas para a obtenção de cenários que mais se aproximem da realidade. A Figura 10 mostra algumas possíveis forças que atuam na área e que podem influenciar tais mudanças.

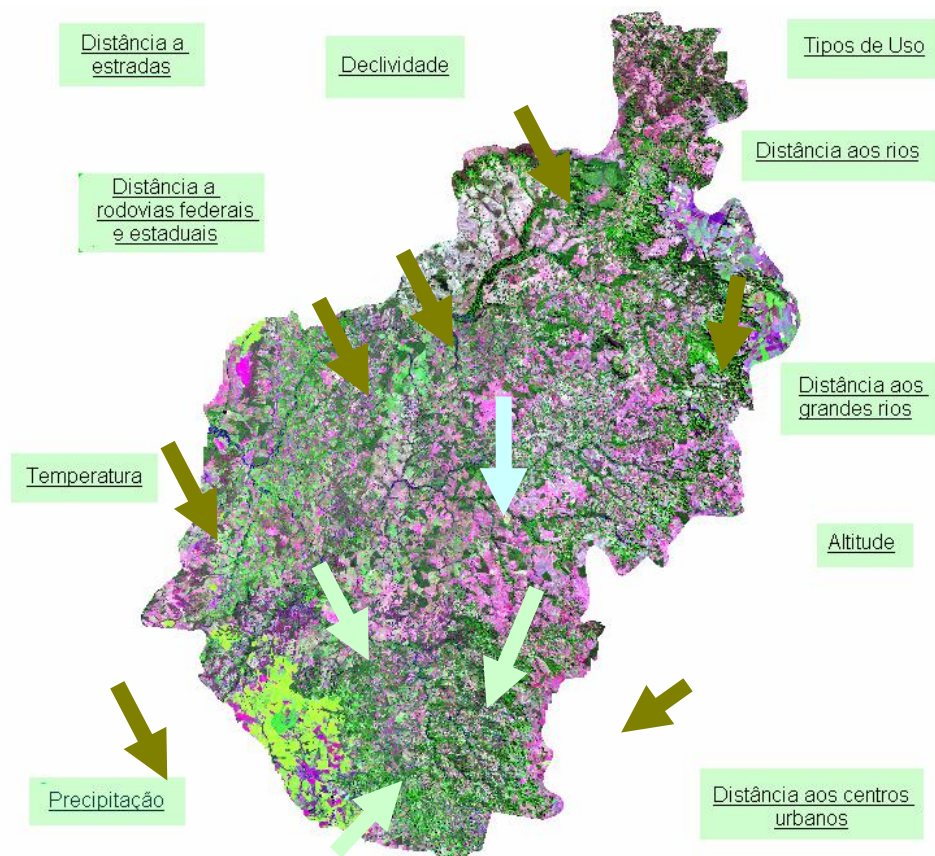


Figura 10 – Forças direcionadoras de mudanças na Bacia do Alto Taquari (BAT).

3.2.1 Categoria: ambiental

A categoria ambiental contempla fatores físicos, bióticos e climáticos, que expressam influências de diferentes variáveis exógenas (independentes). A seguir é apresentada uma descrição dessas categorias, focando-se nas variáveis utilizadas nesta dissertação.

1. Variáveis físicas

Foram extraídas informações do Modelo Digital de Elevação (MDE) da BAT a partir dos produtos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), oriundos da parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), que disponibiliza dados capazes de gerar informações sobre orientação de vertentes, curvatura horizontal, curvatura vertical, altitude e declividade. As variáveis utilizadas neste trabalho foram altitude e declividade, ambas foram representadas no formato matricial e classificadas como variáveis contínuas. O MDE gerado pelos dados SRTM foram tratados utilizando-se o programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI, v.4.5), seguindo os passos identificados na Figura 11.

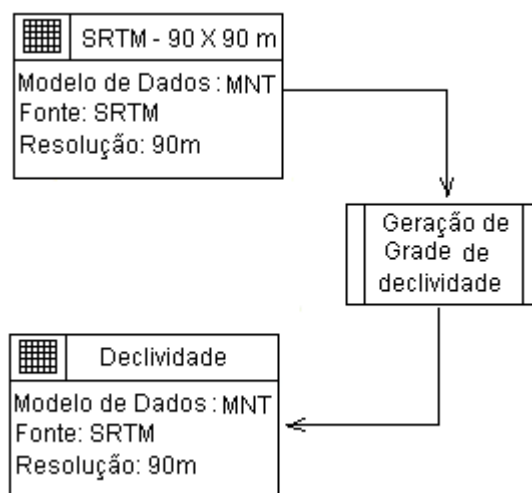


Figura 11 – Diagrama de processamento de dados SRTM.

- *Altitude* – Esse mapa foi gerado com os dados do SRTM para servir de base na geração dos mapas topoclimáticos na BAT.
- *Declividade* - Foi obtido para avaliar o ângulo entre a superfície inclinada e o plano horizontal, sendo expresso em porcentagem, adotando-se a denominação de Silva (2003). As informações sobre

a declividade do terreno influenciam as ações de manejo do solo como, por exemplo, limitações no uso de máquinas e implementos agrícolas. No caso dos cenários de simulações de mudança de uso agrícola para implantação de cultivos canavieiros na região, a declividade deve ser considerada como fator limitante à aptidão pedoambiental da cultura.

2. Variáveis bióticas

As atividades humanas podem exercer fortes pressões, provocando impactos ambientais que comprometem o potencial de uso das terras agrícolas, refletindo na degradação de ecossistemas frágeis.

Para este trabalho utilizou-se como cenário-base a imagem MODIS classificada, do ano de 2001, com quatro classes de uso da terra (cerrado, agricultura, pastagem e área urbana).

3. Variáveis climáticas

As condições climáticas influenciam praticamente todas as atividades humanas. Na agricultura, pode-se avaliar a aptidão de um cultivo, a necessidade de irrigação e a melhor época de semeadura, conhecendo-se o clima da região. O clima também afeta a formação e a dinâmica dos diferentes ecossistemas do Brasil, sendo uma ferramenta importante para o estudo, o planejamento e a gestão ambiental¹³.

Os dados climáticos utilizados neste trabalho referem-se aos fatores de temperatura e precipitação, obtidos do site: <http://www.iwmi.org>, os quais correspondem as normais climatológicas, utilizadas para elaboração do Atlas *International Water Management Institute's* (IWMI) com dados direcionados às pesquisas climáticas e hidrológicas, possibilitando extrair informações como: nível de precipitação adequada para diferentes tipos de cultura, auxílio no planejamento do fornecimento de água, diferenças térmicas regionais, entre outros (NEW; LISTER e MAKIN, 2002). A resolução espacial original dos dados é de 10' de latitude/longitude, aproximadamente 18 km x 18 km no Equador. Estes dados correspondem a 221 pontos com Latitude, Longitude e Altitude das estações das normais climatológicas.

¹³ (Embrapa Monitoramento por Satélite), acessado em 30/07/2008.

Os mapas climáticos foram gerados buscando identificar as seguintes condições na BAT:

- Precipitação pluvial anual (mm).
- Total de precipitação pluvial no trimestre menos chuvoso (mm).
- Total de precipitação pluvial no trimestre mais chuvoso (mm).
- Temperatura do ar, média anual (°C).
- Média da Temperatura máxima anual (°C).
- Média da Temperatura mínima anual (°C).

Precipitação: entre os fatores climáticos que interferem na erosão hídrica, a chuva é o de maior importância, já que a água é o principal agente de desagregação e transporte das partículas do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). Assim, o assoreamento do Rio Taquari no Pantanal, decorrente da expansão desordenada da atividade agropecuária na Bacia do Rio Taquari, pode ter sido potencializado pela ocorrência de um período de chuvas mais erosivas nessa bacia, a partir de meados da década de 70 (século XX).

Estes dados representam a série histórica das normais climatológicas publicadas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (Brasil, 1992), em que o mapa de precipitação pluvial anual representa a soma das precipitações médias mensais, enquanto que, o mapa do trimestre menos chuvoso indica a quantidade de chuva contabilizada nos meses de junho, julho e agosto e o trimestre mais chuvoso expressa o total pluvial dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

Fez-se o teste de regressão linear considerando a precipitação como variável dependente e as latitudes, longitudes e altitudes como variáveis independentes, gerando os mapas topopluviais (mm) com as seguintes equações:

$$prp_{ano} = 3651,9 - 25,8 \times \text{longitude} - 42,2 \times \text{latitude} + 0,093 \times \text{altitude} \Rightarrow r^2 = 0,96 \quad (1)$$

$$prp_{trimesos} = -820,0 + 8,6 \times \text{longitude} + 23,3 \times \text{latitude} + 0,013 \times \text{altitude} \Rightarrow r^2 = 0,97 \quad (2)$$

$$prp_{trimaís} = 3420,3 - 32,6 \times \text{longitude} - 52,4 \times \text{latitude} + 0,014 \times \text{altitude} \Rightarrow r^2 = 0,99 \quad (3)$$

Temperatura: Procurando analisar a abrangência dos campos térmicos homogêneos em termos de temperatura do ar (médias, máximas e mínimas) fez-se o teste de regressão linear considerando a temperatura como variável dependente e as latitudes, longitudes e altitudes como variáveis independentes, gerando os mapas topotérmicos (°C) com as seguintes equações:

$$T_{\text{medio}} = 26,6498 - 0,0051 \times \text{altitude} \Rightarrow r^2 = 0,97 \quad (4)$$

$$T_{\text{max}} = 36,3832 - 0,1035 \times \text{latitude} - 0,0052 \times \text{altitude} \Rightarrow r^2 = 0,96 \quad (5)$$

$$T_{\text{min}} = 17,3381 - 0,0736 \times \text{latitude} - 0,005 \times \text{altitude} \Rightarrow r^2 = 0,98 \quad (6)$$

Ressalta-se que os valores de temperatura máxima e mínima foram calculados utilizando-se as equações (7) e (8), respectivamente:

$$T_{\text{max}} = T_{\text{med}} + 0,5 \times \text{dtr} \quad (7)$$

$$T_{\text{min}} = T_{\text{med}} - 0,5 \times \text{dtr} \quad (8)$$

Em que *dtr* representa a variação da temperatura média diária.

3.3 Integração de variáveis

Os mapas foram ajustados para o sistema de coordenada geográfica LatLong e datum WGS-84, no aplicativo TerraView 3.2.0 (<http://www.dpi.inpe.br/terraview>) com uma resolução espacial de 1 x 1 km², representada neste aplicativo pelo espaço celular, uma versão atual da biblioteca TerraLib.

Um espaço celular é uma estrutura matricial generalizada em que cada célula está associada a vários tipos de atributos (Câmara, 2003), estáticos (atributos que não variam no tempo) e dinâmicos (atributos que variam no tempo) possuindo um identificador único denominado *object_id*. O usuário escolhe a resolução espacial desejada e também a organização dos seus dados, conforme a Figura 12.

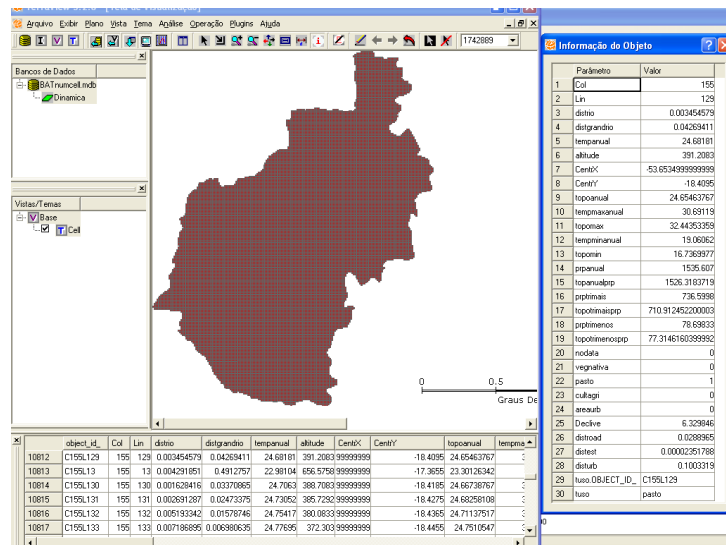


Figura 12 – Representação esquemática do espaço celular na Bacia do Alto Taquari (BAT).

As informações de todos os *layers*¹⁴ foram inseridas no espaço celular através de um *plugin*, denominado “preenchimento celular”, o qual possui a função de preencher completamente as células do espaço celular da área de trabalho, permitindo a captura das informações (matriciais ou vetoriais) por meio de operações escolhidas pelos usuários, como: média, máxima e mínima dos valores, mínima distância, ausência ou presença, porcentagem, classe majoritária, entre outros (Tabela 3). Atualmente o TerraView é o único SIG que possui este tipo de ferramenta.

Tabela 3 – Descrição dos atributos no espaço celular

Atributos do espaço celular	Descrição	Operações realizadas
altitude	altitude em metros	
declive	declividade em graus	
tempmax	média anual das temperaturas máximas (°C)	
tempmin	média anual das temperaturas mínimas (°C)	
tempanual	média anual das temperaturas médias (°C)	Média
prpтрiseco	precipitação pluvial do trimestre mais seco: junho, julho e agosto	
prpтрiumido	precipitação pluvial do trimestre mais úmido: dezembro, janeiro, fevereiro	
prpanual	precipitação pluvial anual	
classes de uso	agricultura, cerrado, pasto e área urbana	Porcentagem

Após a integração de variáveis utilizou-se o Modelo dinâmico TerraME, responsável pelas simulações de mudanças climáticas.

¹⁴ Exemplos de layers: Mapa de solo, mapa de vegetação, mapa de dados cadastrais.

3. 4 Considerações Finais

A disponibilidade de dados, os recursos computacionais em Sistemas de informações geográficas (SIGs), o desenvolvimento de ferramentas em modelagem dinâmica no Brasil, algumas disponibilizadas gratuitamente, juntamente com a inserção da proposta de trabalho em consonância com projetos de pesquisa da Embrapa Solos e UERJ, possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

4 CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA BACIA DO ALTO TAQUARI, MS

4.1 Introdução

A Bacia do Alto Taquari está localizada entre os paralelos 17°06' e 19°48' Sul e os meridianos 53°06' e 55°06' Oeste, na região Centro-Oeste do Brasil com 86,5% de sua superfície no estado de Mato Grosso do Sul (MS) e, apenas 13,5% no Mato Grosso (MT). Faz parte da Bacia do rio Taquari, a qual está dividida em Bacia do Médio Taquari e Bacia do Alto Taquari, com nascentes nos municípios do Alto-Araguaia (MT) e Alto Taquari (MT). Com uma área de aproximadamente 28 mil km² a BAT é composta parcialmente pelos municípios de Alcinópolis, Camapuã, Costa Rica, Coxim, Pedro Gomes, Rio Verde de Mato Grosso e São Gabriel d'Oeste, no estado de Mato Grosso do Sul (MS), e no Estado de Mato Grosso (MT) pelo Alto Araguaia e Alto Taquari (Figura 13).

Galdino et al (2006) citam que o processo erosivo é o problema ambiental de maior expressão na BAT. Essa problemática pode ser agravada predominantemente por fatores como: fragilidade dos solos, intensidade de tráfego de máquinas agrícolas nas épocas chuvosas, altas temperaturas seguidas de fortes pancadas de chuva, condições topográficas e manejo inadequado.

Com o apoio de ferramentas de Sistemas de informação geográfica (SIGs) e de modelos de simulação da dinâmica de variáveis espaço-temporais é possível representar fenômenos estáticos e dinâmicos e simular cenários que possam auxiliar os tomadores de decisão. O desenvolvimento por Carneiro (2006) do aplicativo TerraME (Modelling Environment) tem permitido aplicações (AGUIAR, 2006; JESUS, 2008) sob diferentes tipos de efeitos de mudanças. Tomando por base as projeções de mudanças climáticas (IPCC, 2007), objetivou-se utilizar o suporte tecnológico dessa ferramenta para simular cenários topo-climáticos na Bacia do Alto Taquari, diante das frequentes ameaças de flexibilização nas leis ambientais no Estado de Mato Grosso do Sul.

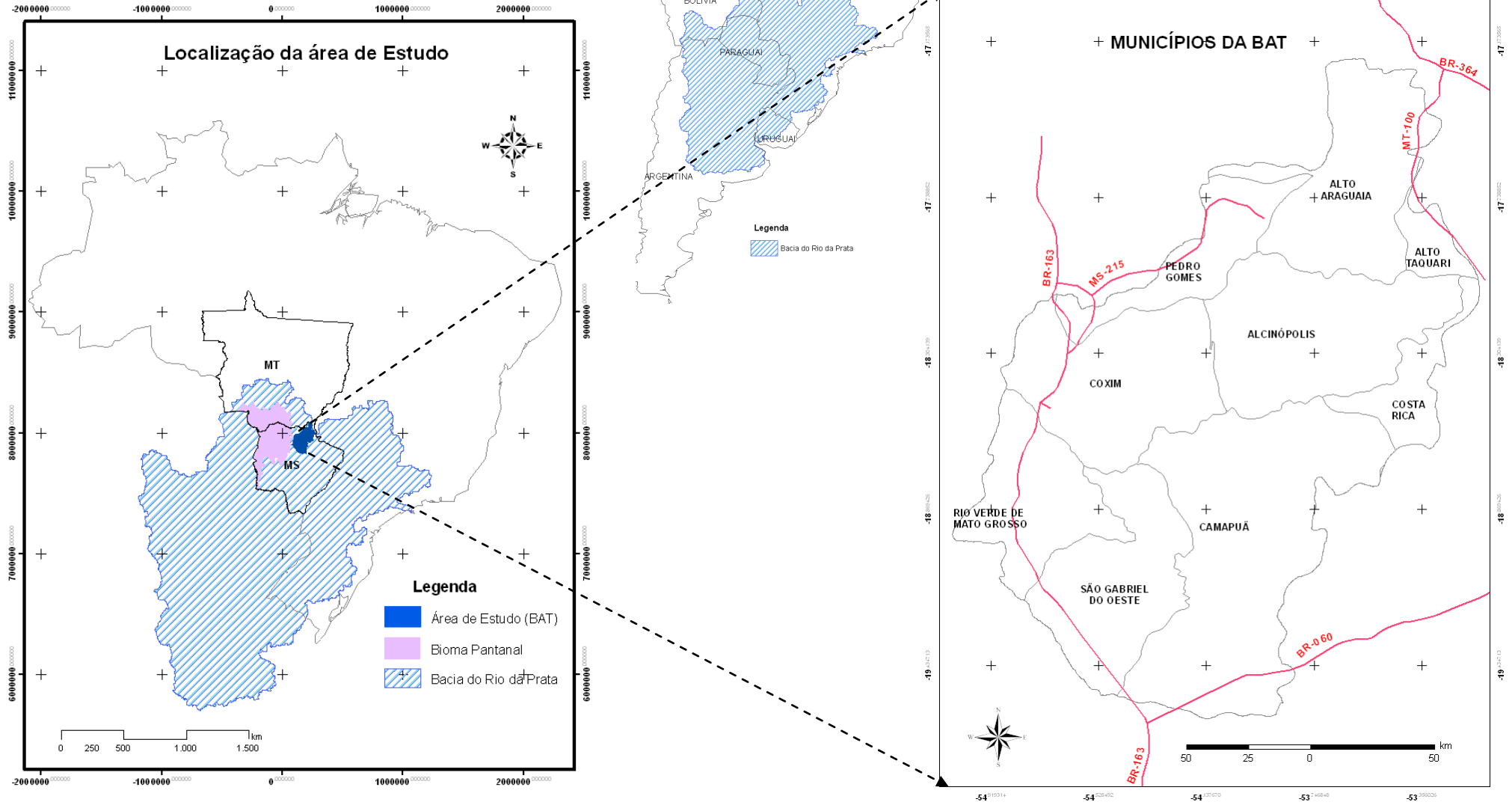


Figura 13 - Localização da Bacia do Alto Taquari (BAT).

4.2 Características da rede de drenagem na área de estudo

A BAT integra quatro sub-bacias hidrográficas: sub-bacia do Rio Taquari que ocupa aproximadamente 44% da área de estudo, sub-bacia do Rio Coxim ocupando aproximadamente 27%, sub-bacia do Rio Jauru com 23% e a sub-bacia do Rio Verde que ocupa apenas 6% da BAT. Na Figura 14 observa-se que a sub-bacia do Rio Taquari que abastece os municípios de Alto Araguaia, Pedro Gomes e Coxim direciona seu fluxo para as áreas mais baixas do Bioma Pantanal. Estudos de Godoy et al. (2002) apontam que a ocorrência de cheias intensas observadas a partir do ano hidrológico 1973/74 foi relacionada não apenas ao aumento da precipitação pluvial, mas à expansão da atividade agropecuária nessa região. Nos dados apresentados por esses autores verificou-se que a vazão do rio Coxim no ano hidrológico de 1968/96 era inferior a $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e sofreu aumentos gradativos nos 18 anos avaliados, sendo que em 1983/84 o fluxo atingiu valores próximos a $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A sub-bacia do Rio Verde por ser a menor rede de drenagem pode também sofrer conseqüências danosas quanto a disponibilidade hídrica ao município.

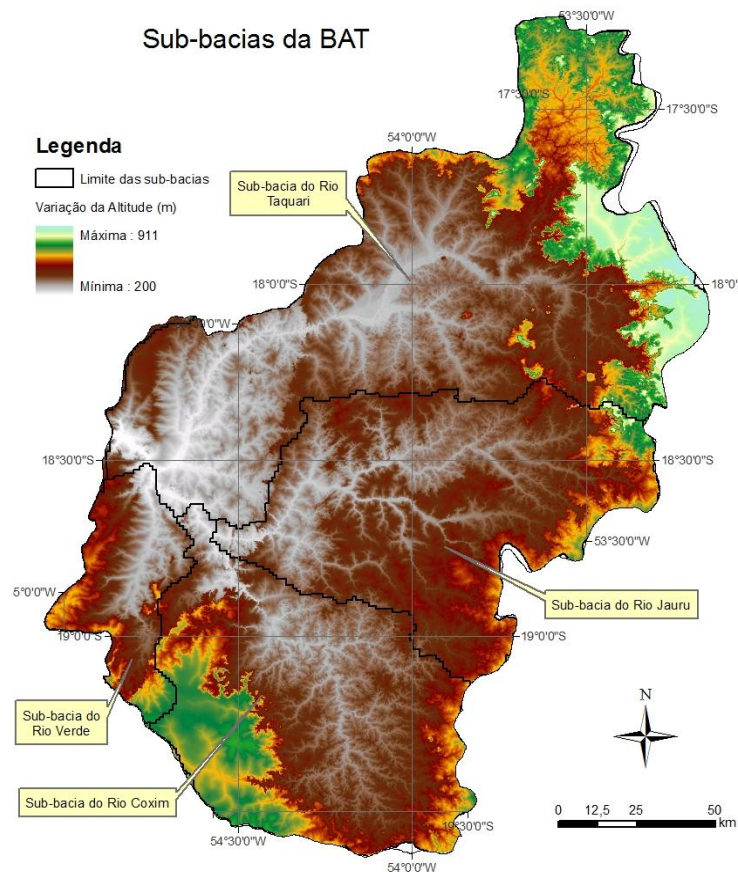


Figura 14 - Modelo Digital de Elevação (MDE) com a divisão das sub-bacias da Bacia do Alto Taquari (BAT).

4.3 Relevo da área de estudo

As menores elevações encontram-se entre 200 e 300 m, representando 6% da bacia. Na sub-bacia do rio Taquari se localizam as maiores altitudes, entre 500 a 900 m e, representam 34% da BAT, localizadas na parte nordeste. Cerca de 60% da BAT possui altitudes médias entre 300 a 500 m (Figura 15). Ao avaliar a bacia como um todo, verifica-se que 94% da BAT possui altitudes variando entre 300 a 900m, caracterizando-a como uma bacia de planalto. Observando a Figura 16 percebe-se que predominam as cores amarelo-laranja, as quais indicam que 74% da BAT possuem relevo ondulado a suave ondulado. As cores mais claras indicam terreno forte ondulado (18%) e montanhoso (5%). Apenas 2% da BAT estão em terreno plano e 1% em escarpado.

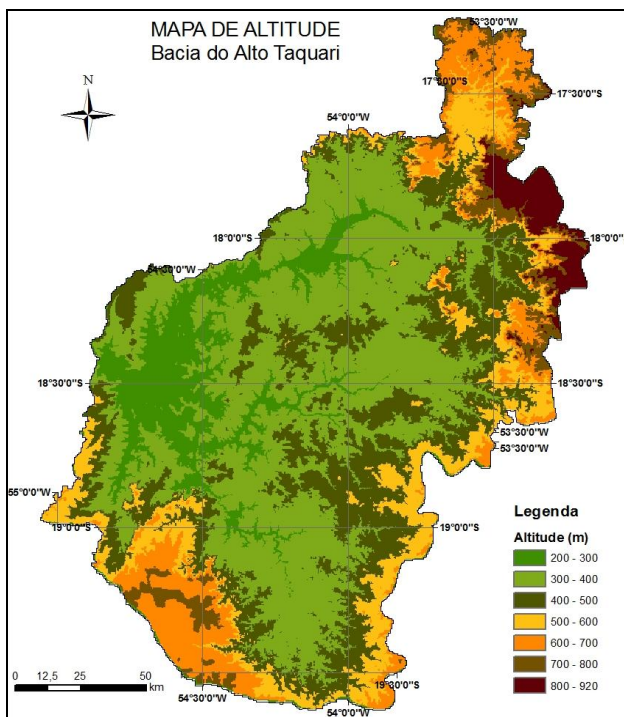


Figura 15 – Faixas de altitudes (m) na Bacia do Alto Taquari (BAT).

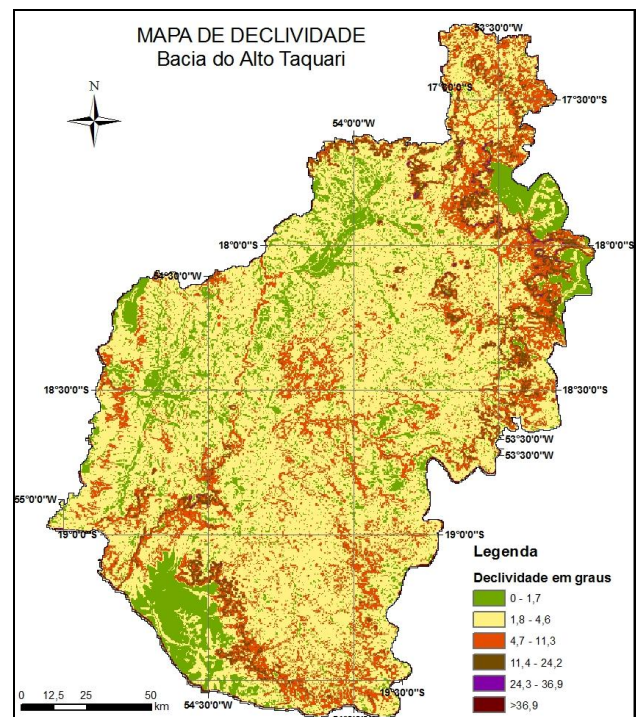


Figura 16 – Faixas de declividades na Bacia do Alto Taquari (BAT).

Segundo Galdino (2003), a BAT possui sete unidades ambientais naturais: Planalto do Rio Correntes, Chapada das Emas, Planalto do Taquari, Chapada de São Gabriel, Coxim, Campo Grande e Planalto de Maracaju. No Planalto do Taquari, predomina relevo pouco dissecado, circundado por escarpas erosivas, sendo o grau de erosão de alta a moderada, independente da cobertura vegetal em 95,3 % da área da BAT, conforme o referido autor.

Observando a Figura 16 são evidenciadas essas afirmações de Galdino (2003), pois as cores mais escuras, tendendo ao marrom, circundam as áreas mais claras. Realmente, eventos de chuvas fortes nesse tipo de relevo ganham energia cinética nas escarpas, intensificando o efeito da erosividade do fluxo pluvial na BAT. Neste sentido, práticas de conservação do solo devem ser priorizadas, ganhando importância agrícola e ambiental nessas áreas.

4.4 Evolução da população na BAT e seu entorno

Na Figura 17 nota-se que o município de Coxim é o mais populoso na Bacia do Alto Taquari, mas os municípios de São Gabriel do Oeste e Rio Verde de Mato Grosso tiveram as maiores taxas de crescimento entre 1995 a 2001. Todavia, o município de São Gabriel do Oeste apresentou o maior salto populacional entre 2001 a 2007. Esses valores indicam que está havendo outros interesses migratórios para esse município, possivelmente, impulsionados pelo setor sucroalcooleiro.

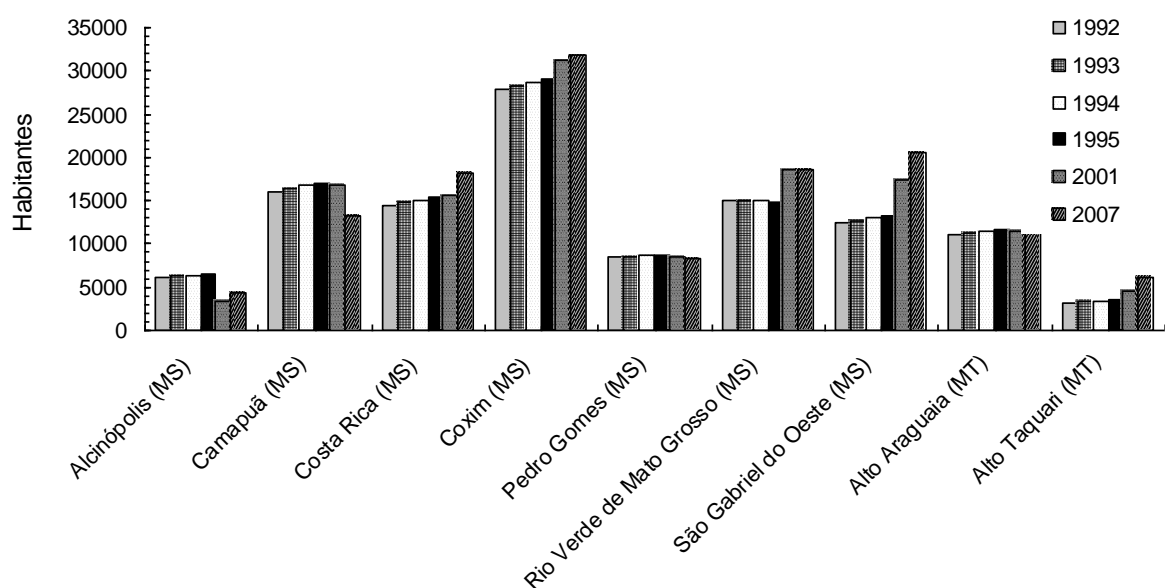


Figura 17 – Evolução da população por município na Bacia do Alto Taquari.

4.5 Uso e cobertura do solo

As informações de uso foram obtidas a partir da imagem classificada do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de 2001 (cedida pelo Projeto Sensor - Embrapa Solos). No ano de 2001, com base na classificação de Jonathan (2005), a agricultura representava 7% de toda área de estudo, com

dominância das pastagens, representada por 54% e a vegetação de cerrado representada por 38%, apenas 1% da BAT era utilizada por áreas urbanas (Figura 18).

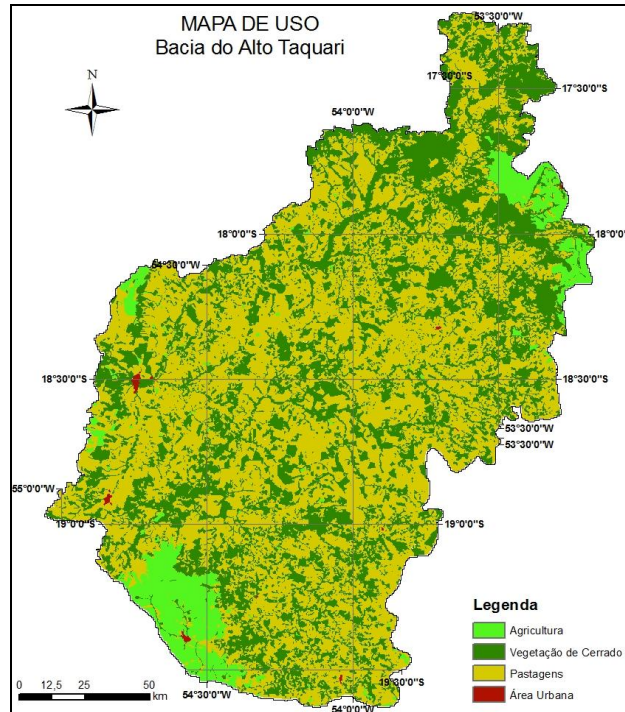


Figura 18 - Mapa de uso do solo de 2001 na Bacia do Alto Taquari.

4.5.1 Cultivos agrícolas na área de estudo

Comparando as informações apresentadas na Figura 19 com os dados apresentados na Figura 20 observa-se que a partir do ano 2000 houve um aumento da área cultivada com cana-de-açúcar nos Estado de Mato Grosso e Goiás. Em Mato Grosso do Sul o cultivo de soja ainda é o mais expressivo, em termos de aumento de área cultivada, na região. Percebe-se nitidamente na Figura 19 o aumento da área cultivada com cana-de-açúcar no estado de Mato Grosso, representada no gráfico pela cor verde mais forte, indicando que a parte norte da BAT pode estar sob efeitos de forças direcionadoras relacionadas com a expansão dessa cultura na região.

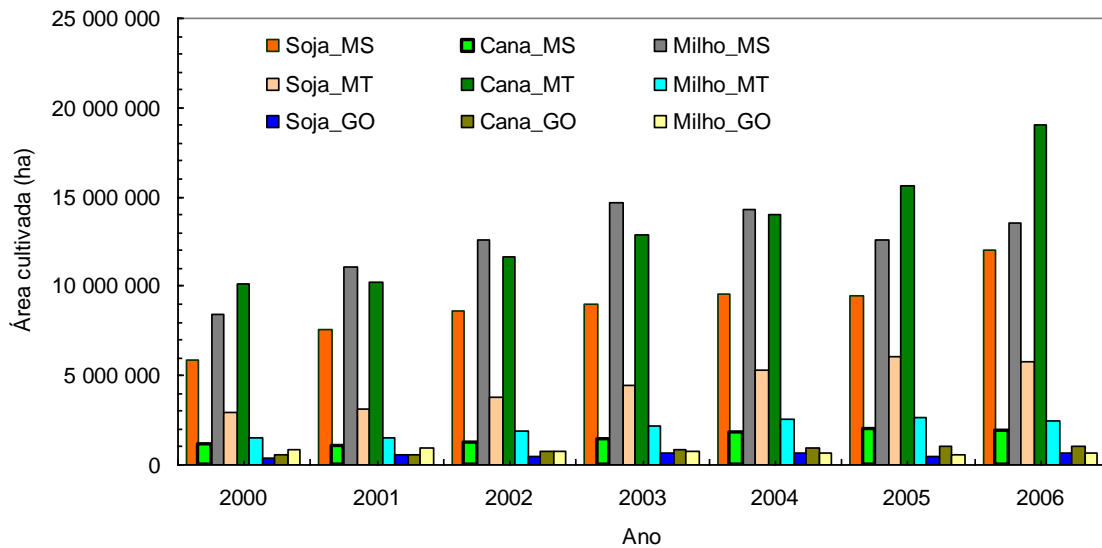


Figura 19 - Área cultivada com soja, milho e cana-de-açúcar nos Estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (2000-2006).

Ao avaliar a participação da cana-de-açúcar nos 10 estados mais produtores do país (Figura 20), nota-se que os Estados de Goiás e Mato Grosso, ainda possuem um baixo percentual comparado com os demais. Todavia, o alto rendimento dessa cultura no Centro-Oeste brasileiro (Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), bem próximo ao seu potencial genético, em torno de 80 t ha^{-1} , apresenta forte indício de expandir o setor sucroalcooleiro para essa região.

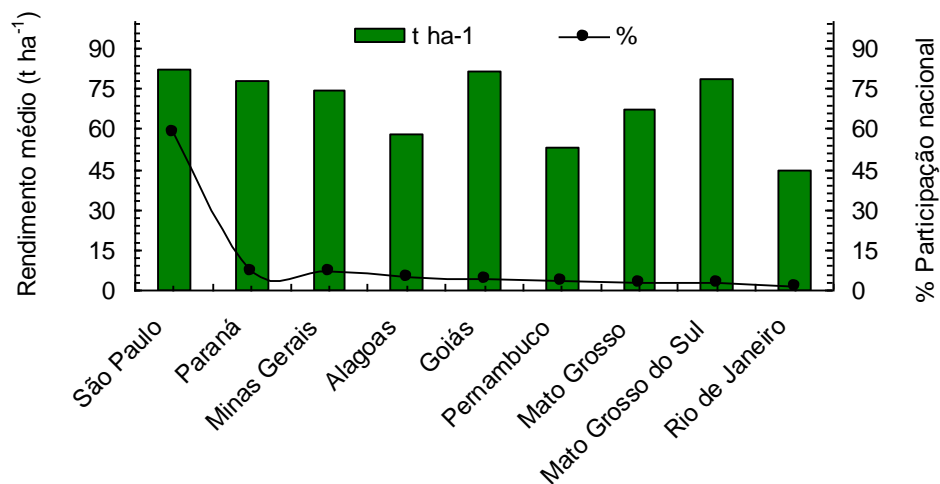
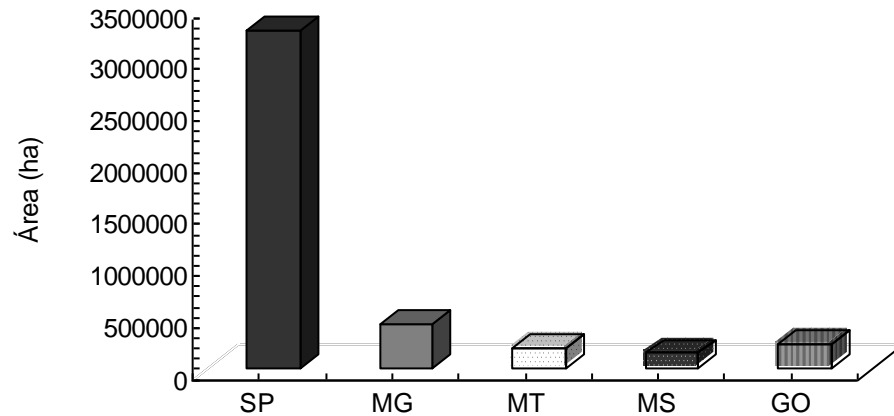


Figura 20 - Estados produtores de cana-de-açúcar no Brasil em 2006.

Verifica-se na Figura 21 que o estado de São Paulo possui a maior área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil. Com os incentivos do governo em busca de uma energia renovável, os dados apontam que está havendo um crescimento

superior a 10% ao ano e implantação de novas usinas, sendo praticamente mais de uma usina por mês no país.



Estados produtores de cana-de-açúcar, 2006

Figura 21 – Área plantada com cana-de-açúcar no Brasil.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com previsão de colheita de 473 milhões de toneladas de cana para o ano-safra em curso (2007/2008), com estimativas de produção em torno de 30 milhões de toneladas de açúcar e 21 bilhões de litros de álcool. Esses valores evidenciam o grande potencial de expansão da cana para novas áreas no território brasileiro. Na Figura 22 verifica-se que a partir de 2001 vem crescendo a produção de cana-de-açúcar em Goiás.

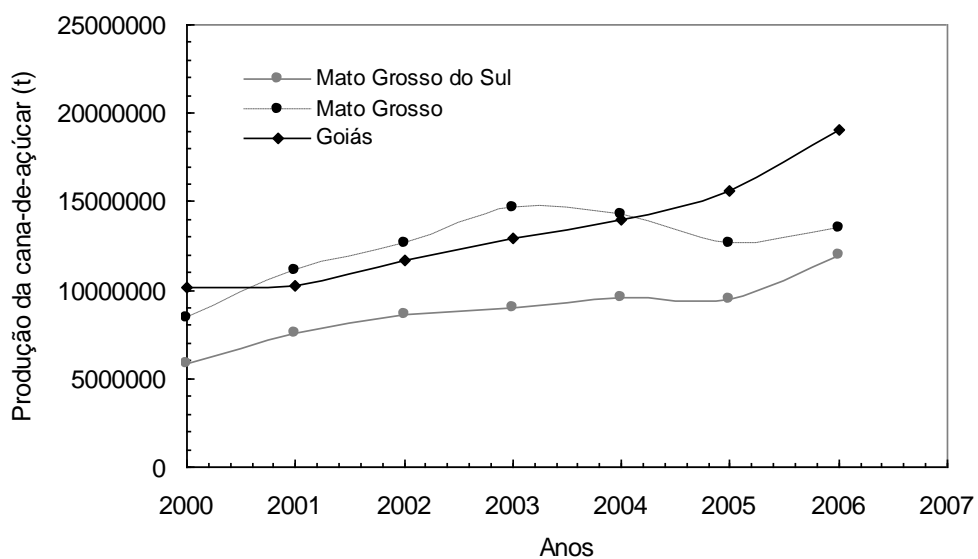


Figura 22 – Produção de cana-de-açúcar em Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, período de 2000 a 2006.

A ocorrência de usinas nos municípios representados na Figura 23, indica que a Bacia do Alto Taquari vem sofrendo pressões do setor sucroalcooleiro na sua porção Norte-Noroeste, representando ameaças a sustentabilidade da região.

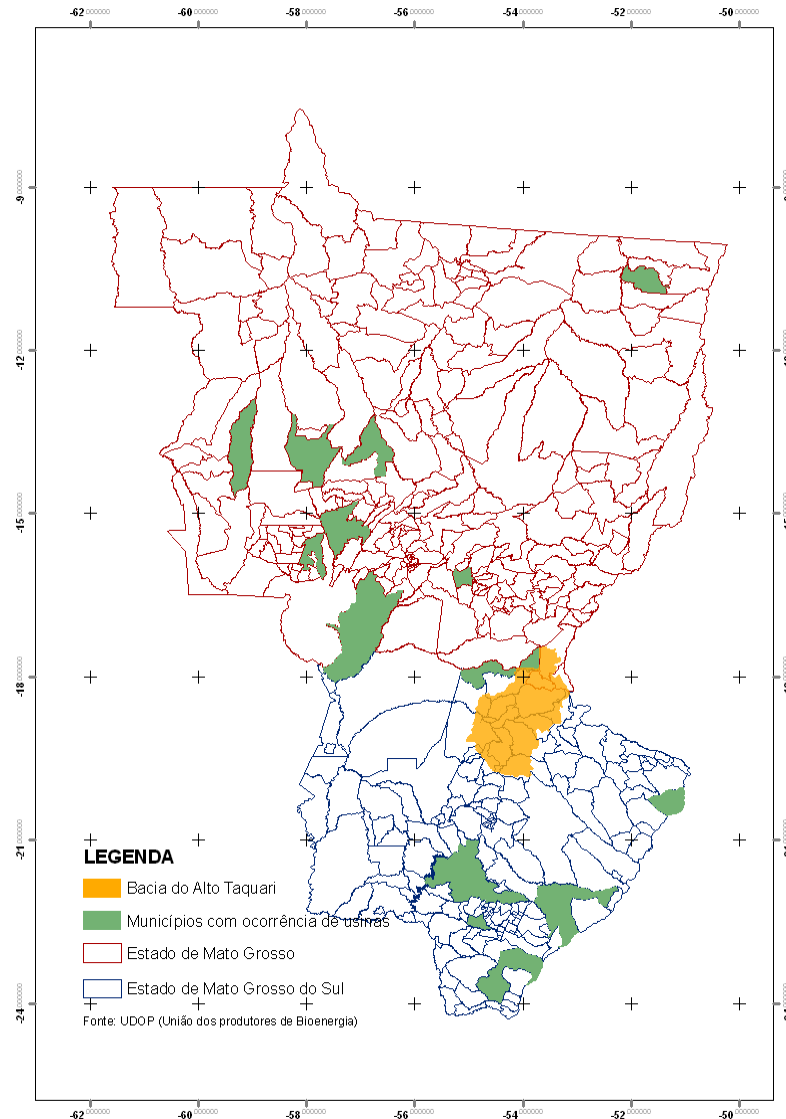


Figura 23 – Municípios com ocorrência de usinas nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

4.6 Condições termopluviais na área de estudo

Os dados analisados nesta pesquisa apontam que as condições das precipitações pluviais, em termos de média anual, variam de 1.430,0 a 1.630,0 mm, aproximadamente. Ao analisar o mapa topopluvial da BAT, nota-se que nas áreas de maiores altitudes ocorrem os maiores totais pluviais, identificados pelos tons de verde (Figura 24).

Ao analisar a dominância da água precipitada em termos de média anual nos municípios que integram a bacia, nota-se que Alcinópolis está inserido na faixa de 1.500,0 a 1.565,0 mm. Os municípios de Coxim e Camapuã encontram-se sob duas faixas pluviais, sendo a parte sul regida por totais médios que variam entre 1.460,0 a 1.500,0 mm, sendo o mesmo regime de São Gabriel do Oeste e de Rio Verde de Mato Grosso. Na parte norte as precipitações variam entre 1.500,0 a 1.530,0 mm. Observa-se que as áreas na BAT sob a jurisdição dos municípios do Alto Araguaia, Alto Taquari e Costa Rica contabilizam os maiores valores de precipitações durante o ano, incluídos na faixa de 1.560,0 a 1.630,0 mm.

No regime pluvial é possível identificar os efeitos da Zona de Convergência intertropical- ZCIT, que transporta ar quente e úmido na porção norte da BAT e ocasiona fortes chuvas, decorrentes de nuvens convectivas¹⁵.

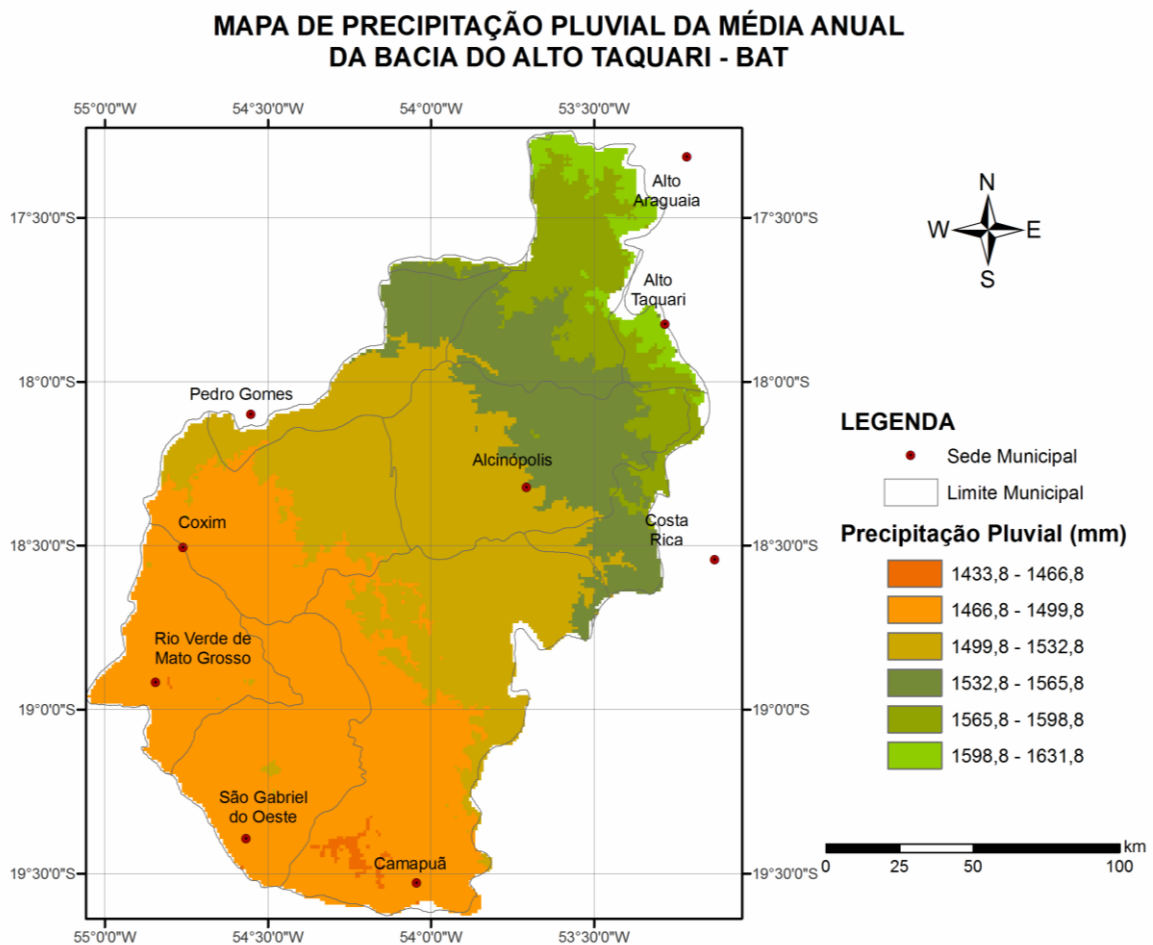


Figura 24 - Precipitação pluvial da média anual da Bacia do Alto Taquari.

¹⁵ Nuvens resultantes da convecção térmica com grande desenvolvimento vertical (Cúmulos e Cumulonimbos)

Computando os totais de precipitação pluvial no trimestre mais chuvoso na BAT que vai de dezembro a fevereiro, verifica-se que os maiores valores situam-se próximos a 782,0 mm e os menores, a 621,0 mm. A Figura 25 evidencia as gradações na oferta pluvial e mostra, praticamente, três regimes de chuva, um alto, na porção norte, um médio na porção central e um com mais baixa oferta. Todavia, ao se avaliar em termos de oferta pluvial média diária nesse trimestre dá uma idéia que nas áreas mais pluviosas recebem cerca de 9,0 mm ao dia e nas de menor oferta, em torno de 7,0 mm ao dia. Esses valores apontam indiretamente que nesse período a água precipitada atende a demanda evapotranspiratória da maioria das culturas na região. No trimestre menos chuvoso (junho a agosto) os totais mais elevados não ultrapassam os 115,0 mm e os mais baixos chegam a 53,0 mm (Figura 26). Ao avaliar em termos de oferta pluvial diária, identifica-se que a parte sul é a mais pluvial nesse período, mas as cotas são inferiores a 2,0 mm, indicando que nesse período a maioria dos cultivos agrícolas necessita de reposição hídrica para atender a demanda atmosférica da BAT.

Mapa de precipitação do trimestre mais chuvoso - dezembro, janeiro e fevereiro
Bacia do Alto Taquari - BAT

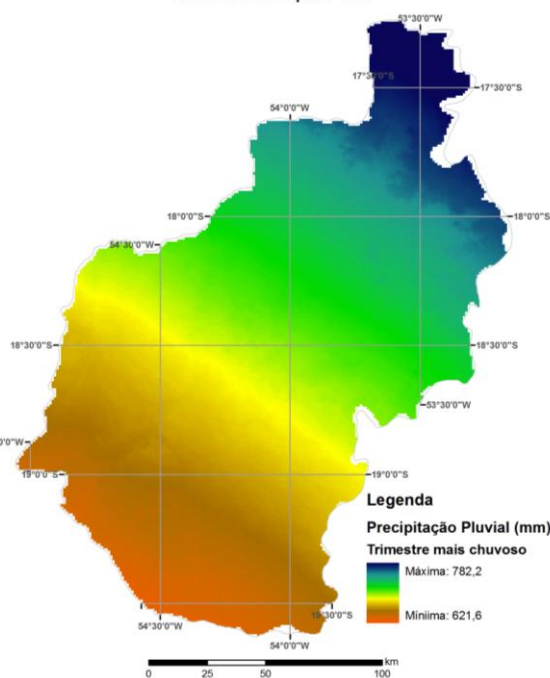


Figura 25 – Variação dos totais de precipitação no trimestre mais chuvoso na Bacia do Alto Taquari (BAT).

Mapa de precipitação do trimestre menos chuvoso - junho, julho e agosto
Bacia do Alto Taquari - BAT

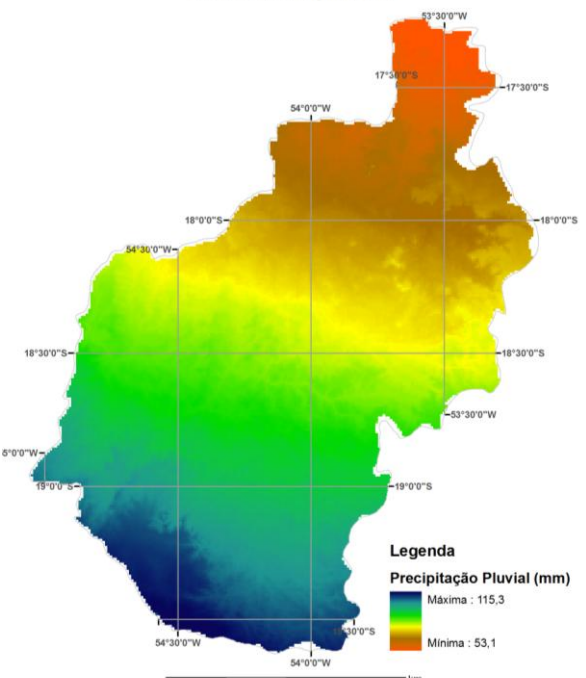


Figura 26 – Variação dos totais de precipitação no trimestre menos chuvoso na Bacia do Alto Taquari (BAT).

A amplitude térmica, em termos médios anuais na BAT é de 3,0°C, sendo que a menor temperatura é 22,0°C e a maior é de aproximadamente 26,0°C. As

temperaturas mais frias ocorrem na porção norte e sul da bacia, representadas por tons de azul, sendo que as mais frias ocorrem nas áreas indicadas pela cor azul mais intensa, na porção nordeste da BAT, na sub-bacia do Rio Taquari (Figura 27). As áreas mais quentes na BAT apresentam temperaturas máximas na faixa entre 33,4 a 33,6°C, representada no mapa pela cor vinho, na foz do rio Taquari (Figura 28). As áreas mais frias concentram-se na porção nordeste da BAT com mínimas entre 13,8 a 14,2°C (Figura 29). Essa estratificação, mesmo em termos médios evidencia que essas áreas apresentam potencial climático para introdução de culturas com necessidade de horas de frio nessa faixa térmica.

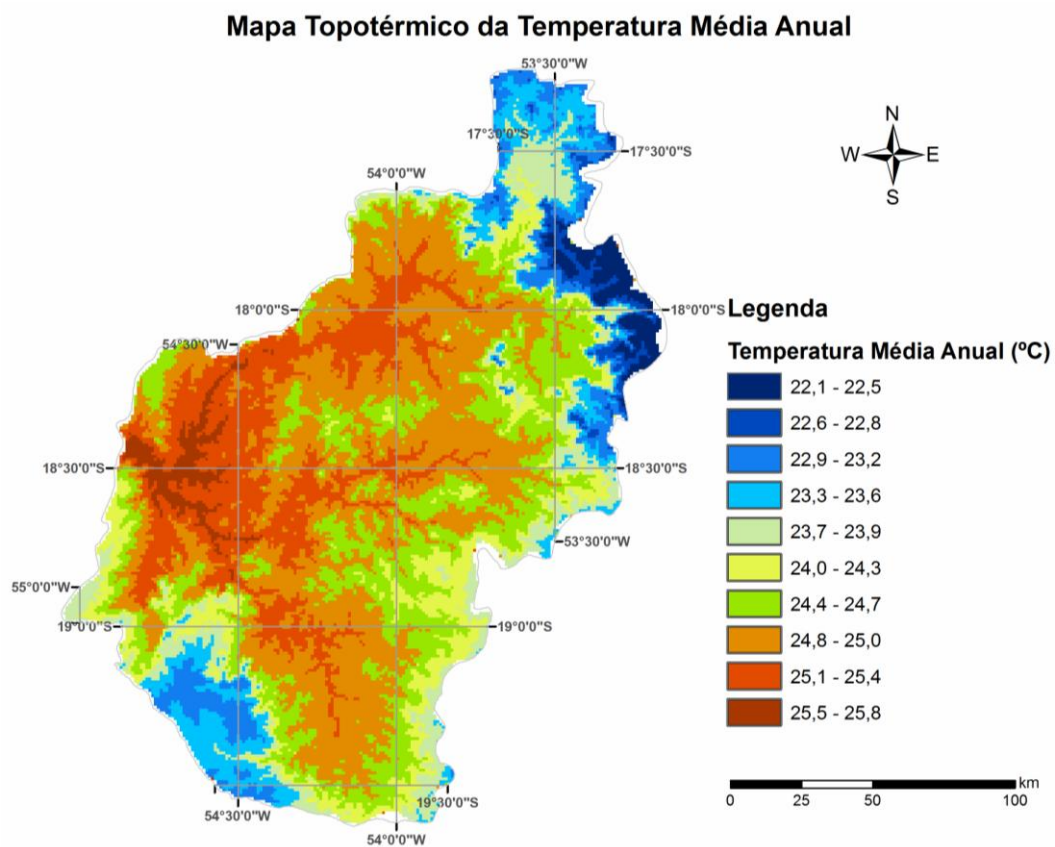


Figura 27 - Mapa de temperatura média anual na Bacia do Alto Taquari, MS.

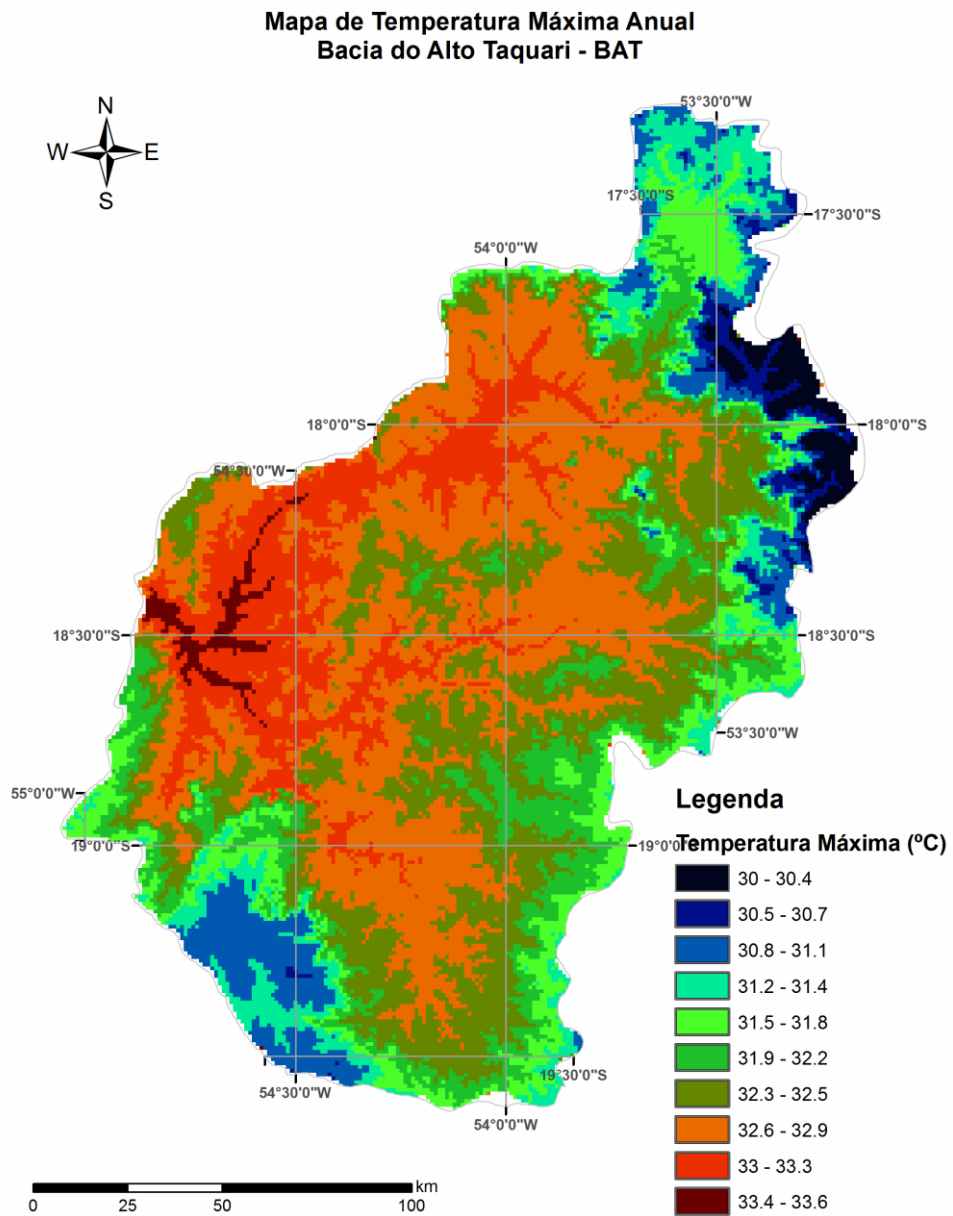


Figura 28 - Mapa de temperatura máxima anual na Bacia do Alto Taquari, MS.

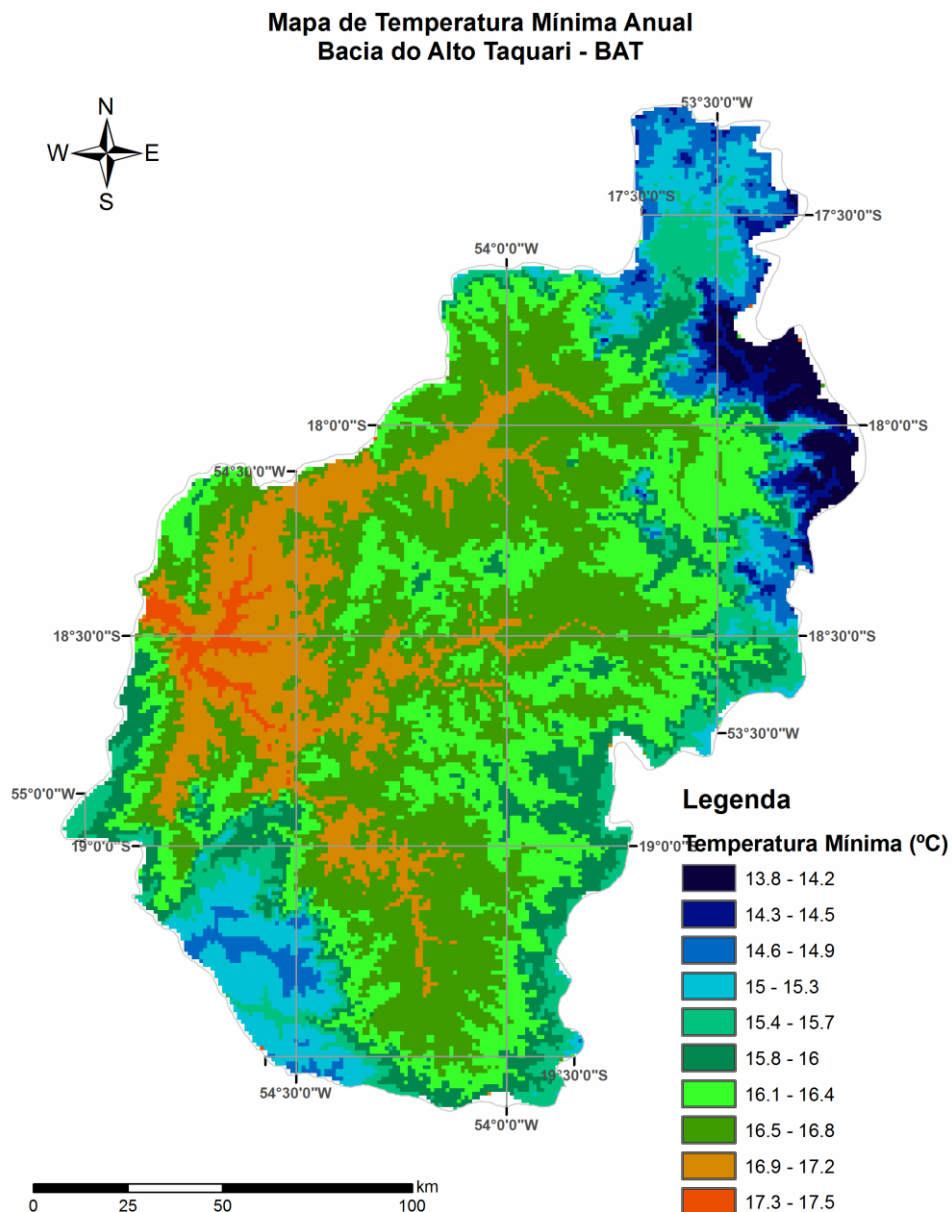


Figura 29 - Mapa de temperatura mínima anual na Bacia do Alto Taquari, MS.

4.7 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste capítulo indicam que a Bacia do alto Taquari (BAT) vem sofrendo pressões quanto ao uso do solo, principalmente, decorrentes do avanço da cana-de-açúcar na região. O alto rendimento da cultura, obtidos em 2006 no Mato Grosso do Sul refletem a fragilidade da BAT diante dos interesses do setor sucroalcooleiro, caso haja flexibilidade nas leis ambientais, capazes de permitir a implantação de canaviais na bacia.

Diante de efeitos da ação antrópica, as condições climáticas de uma região, podem apresentar desde pequenas variações até significativas mudanças, conforme os cenários climáticos. Nessa linha de raciocínio, o capítulo 5 apresenta cenários de mudanças climáticas.