



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Modelagem LUCC Multiescalas: Modelos em escala macroregional, regional e local

Evaldinolia Gilbertoni Moreira Pinto

Proposta de Tese de Doutorado em Computação Aplicada, orientada pelos Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro e Dr. Gilberto Câmara

INPE
São José dos Campos
2006

*"Todo este sangue de mil raças / corre em minhas veias / sou brasileiro /
mas do Brasil sem colarinho / do Brasil negro / do Brasil índio."*

Sérgio Milliet

RESUMO

Representar fenômenos geográficos naturais e humanos na forma de modelos espaciais dinâmicos é um grande anseio dos pesquisadores na área de Geoinformação, e obter ferramentas computacionais capazes de representá-los é um grande desafio. Dentre os modelos dinâmicos que necessitam destas ferramentas, encontram-se os modelos LUCC, cujos objetivos são aprofundar o entendimento dos processos de mudanças de uso e cobertura em diversos níveis (local, regional e global) e melhorar os meios de projetar mudanças, através de diferentes abordagens de modelagem. Representação multiescalar nas dimensões espacial, temporal e analítica é requerida para modelos ambientais realísticos, especialmente em estudos de LUCC. Considerando a flexibilidade do ambiente TerraME que permite gerar modelos LUCC combinando diferentes abordagens e escalas, facilitando o desenvolvimento de modelos integrados, propõe-se a exploração do potencial do ambiente TerraME para gerar modelos inovadores em LUCC. Esta proposta de trabalho insere-se no contexto de ambientes computacionais utilizados para criação de modelos LUCC, e avança no sentido de uma análise comparativa de modelos gerados a partir de diferentes suportes computacionais implementados no ambiente TerraME. Como consequência busca-se o desenvolvimento de modelos que possibilitem um melhor entendimento da ocupação da Amazônia Brasileira servindo de suporte para o planejamento de ações do governo nessa região. Além disso, explorar a fundamentação teórica do nested-CA para melhor empregar suas propriedades no desenvolvimento de modelos LUCC é um dos desafios da tese proposta.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	7
CAPÍTULO 1.....	8
INTRODUÇÃO	8
1.1 Hipótese.....	11
1.2 Objetivo Geral	11
1.2.1 Objetivos Específicos.....	11
1.3 Contribuição desta proposta.....	11
1.4 Organização do texto	11
CAPÍTULO 2.....	12
REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1 Modelagem LUCC	12
2.1.1 Tipos de modelos LUCC.....	12
2.1.1.1 Modelos estocásticos.....	12
2.1.1.2 Modelos estatísticos (empíricos).....	13
2.1.1.3 Modelos de Otimização.....	13
2.1.1.4 Modelos de Processo Dinâmicos.....	14
2.1.1.5 Modelos baseados em Autômatos Celulares.....	15
2.1.1.6 Modelos baseados em Agentes	17
2.1.1.7 Modelos Híbridos/Integrados	19
2.2 Processos clássicos de modelagem	24
2.3 Validação de modelos	25
CAPÍTULO 3.....	26
O AMBIENTE DE MODELAGEM TerraME.....	26
3.1 Visão geral do TerraME (<i>Terra Modeling Environment</i>)	26
3.2 Nested-CA.....	26
3.3 Módulos e Serviços em TerraME.....	28
3.3.1 Representação de serviços no modelo	29
3.4 Arquitetura	30
3.5 Linguagem de modelagem TerraME (<i>TerraME modeling language</i>).....	31
3.5.1.1 Exemplo de modelo dinâmico espacial: Equilíbrio hidrológico	32
CAPÍTULO 4.....	38
DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO.....	38
4.1 Delimitação da área de estudo e escalas.....	38
4.2 Etapas do trabalho	39
4.2.1 Análise e especificação de modelos em TerraME	39
4.2.2 Implementação de modelos em TerraME	40
4.2.3 Procedimentos para comparação dos modelos.....	41
4.3 Síntese da metodologia (fluxograma)	42
CAPÍTULO 5.....	43
CRONOGRAMA	43

CAPÍTULO 6.....	44
CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Generalização comuns em AC [baseado em Couclelis, (1997)].....	16
FIGURA 2.2 Representação espacial e interdependências em modelos ABM-LUCC [Fonte: Tomas Berger, in Parker (2002)].....	18
FIGURA 2.3 Modelo conceitual do LUCITA [Fonte: Deadman (2002)]	19
FIGURA 2.4 Representação esquemática de modelos que combinam projeção de quantidade e localização de mudanças [Fonte: Verburg (2002)]	20
FIGURA 3.1 Limitações e alternativas para modelos LUCC [Fonte: (Carneiro, 2006)].....	27
FIGURA 3.2 Um AC aninhado como uma composição de ambientes celulares [Fonte: (Carneiro, 2006)]	27
FIGURA 3.3 Módulos e serviços em TerraME [Fonte: (Carneiro, 2006)]	29
FIGURA 3.4 Arquitetura do software TerraME [Fonte: (Carneiro, 2006)].....	31
FIGURA 3.5 Modelo de chuva e equilíbrio da água [Fonte: (Carneiro, 2006)]	32
FIGURA 4.1 Área de estudo	38
FIGURA 4.2 Visão esquemática da implementação dos modelos propostos em TerraME.....	40
FIGURA 4.3 Um método de comparação	42
FIGURA 4.4 Fluxograma da metodologia de trabalho.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABM-LUCC	- Modelos Baseados em Agentes para LUCC
AC	- Autômatos Celulares
API	- <i>Application Programming Interface</i>
CLUE	- <i>Conversion of Land Use and its Effects</i>
CLUE-S	- <i>Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent</i>
GIS	- <i>Geographic Information System</i>
LUCC	- <i>Land Use and Cover Change</i>
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Nested-CA	- <i>Nested Cellular Automata</i>
TerraME	- <i>Terra Modeling Environment</i>
REPAST	- <i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i>
RIKS	- <i>Research Institute for Knowledge Systems</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Grande parte dos fenômenos geográficos naturais e humanos que se deseja representar no computador tem dimensões espaciais e temporais. Exemplos são: escoamento de água da chuva, planejamento urbano, dispersão de sementes e crescimento populacional. A representação destes fenômenos na forma de modelos espaciais dinâmicos é uma área de pesquisa emergente em Geoinformação. Para simular este conjunto de fenômenos, é necessário desenvolver técnicas e abstrações que possam tratar apropriadamente suas componentes espacial e temporal (Pedrosa; Câmara, 2002).

Um dos grandes desafios na área de modelagem dinâmica é ter disponíveis ferramentas computacionais capazes de representar processos do tipo espaço-temporais, isto é, transformar as atuais tecnologias de Geoinformação de estáticas para dinâmicas capazes de representar estes processos (Pedrosa *et al.*, 2002).

Segundo Costanza (1998), os modelos computacionais são ferramentas úteis para complementar a capacidade mental de modelagem, de forma a permitir tomadas de decisão mais informadas.

Dentre os modelos dinâmicos que necessitam destas ferramentas, encontram-se os modelos LUCC (Mudanças de Uso e Cobertura da Terra - *Land Use and Cover Change*¹), cujos objetivos são aprofundar o entendimento dos processos de mudanças de uso e cobertura em diversos níveis (local, regional e global) e melhorar os meios de projetar mudanças, através de diferentes abordagens de modelagem. Modelos LUCC podem ajudar na avaliação de possíveis cenários definidos a partir da seleção de um conjunto de regras. Estes cenários auxiliam nos processos de tomada de decisão.

¹ Cobertura da Terra se refere aos seus atributos físicos (por exemplo, floresta, água, gramíneas, áreas construídas, etc.). Uso da Terra se refere ao uso humano de tais atributos (por exemplo, recreação, proteção, pastagem, área residencial, área comercial, etc.). Mudanças de Uso e Cobertura da Terra se referem tanto à conversão entre classes (por exemplo, processos de desertificação e desflorestamento), quanto à alterações nessas classes (ex: intensificação de uso agrícola, degradação da cobertura vegetal). Para uma revisão completa sobre teorias de mudanças de uso e cobertura e métodos associados, consultar Briassoulis 2000 e Gutman, 2004.

O desenvolvimento de modelos computacionais espaço-temporais para modelos Lucc pode contribuir para:

- Organizar o conhecimento sobre os processos de mudança em diferentes escalas;
- Auxiliar a organização de conhecimentos sobre atores e processos;
- Explicitar e validar hipóteses sobre fatores;
- Avaliar as conseqüências das diferentes opções de ação pública, através da construção de cenários e encorajando a produção de indicadores quantitativos que possam ser utilizados pelo governo e pela sociedade (Aguar, 2006).

A questão da escala de estudo é essencial para modelagem Lucc. De acordo com Gibson et al. (2000), a escala é composta pelas “dimensões espacial, temporal, quantitativa ou analítica usadas para medir e estudar qualquer fenômeno”. Todas as escalas possuem extensão e resolução. No caso de escalas espaciais, extensão se refere à dimensão da área de estudo, e resolução à precisão da medida (exemplo: resolução do *pixel*; unidade administrativa, no caso de dados de censo). A escala na qual o processo é estudado afeta a explicação encontrada para o fenômeno. Relacionamentos entre o uso da terra e as forças determinantes estabelecidas em estudos locais não podem ser diretamente extrapolados para escalas regionais, devido a propriedades como não linearidade, emergência e comportamento coletivo (Verburg et al., 2004). Em diferentes escalas, processos diferentes podem ter influência dominante sobre o sistema de uso da terra (Gibson et al., 2000). Dinâmicas regionais afetam (e são afetadas por) condições locais em interações *top-down* e *bottom-up* (Verburg et al., 2004).

Assim, uma representação multiescalar nas dimensões de espaço, temporais e analíticas é requerida para modelos ambientais realísticos, especialmente em estudos de Lucc.

Uma grande variedade de modelos Lucc pode ser encontrada na literatura, com objetivos, técnicas, embasamento teórico e tradições de modelagem distintas (Briassoulis, 2000). Por exemplo, em termos de técnica de modelagem, destacam-se modelos baseados em Autômatos Celulares, baseados em Agentes, Estatísticos, de Otimização, e modelos integrados, que combinam algumas dessas abordagens (Veldkamp; Lambin, 2001a) (Lambin et al., 2000). A escolha de técnicas e abordagens alternativas de modelagem depende do processo que está sendo analisado, dos

objetivos da modelagem, e da escala de estudo. Portanto, a escolha de uma única extensão e resolução em cada dimensão de escala (espacial, temporal e analítica) não é suficiente para simular processos geográficos e reproduzir padrões espaciais (Carneiro, 2006).

Com base nisso, Carneiro (2006) desenvolveu um arcabouço de modelagem genérico denominado TerraME, que possibilita a construção de modelos em múltiplas escalas, combinando diferentes abordagens. Neste ambiente Carneiro (2006), propôs o autômato celular aninhado (*nested-CA*), que combina a teoria autômato híbrido com teoria de agente situado. Uma característica importante deste modelo computacional é dar suporte à modelagem multiescalar, pois permite definir escalas independentemente e então aninhá-las para formar um modelo multiescalar. Cada escala é modelada por um único AC aninhado que inclui todas as suas dimensões: analítico, espacial e temporal.

O desenvolvimento do arcabouço computacional TerraME foi o passo inicial do desenvolvimento de modelos LUCC multiescala. Para completar este desenvolvimento, é necessário explorar melhor a fundamentação teórica de *nested-CA*. Assim, esta proposta de tese irá explorar o potencial do ambiente TerraME para propor modelos inovadores em LUCC.

Esta proposta de tese parte dos seguintes pressupostos:

- (1) o estudo multiescalar, multilocalidades e multiprocessos auxilia no entendimento das interações intra-regionais em processos LUCC;
- (2) modelos LUCC desenvolvidos a partir de *nested-CA* são mais expressivos por permitirem a representação multiescalar, tornando possível o estudo de multilocalidades e multiprocessos;

A idéia central do trabalho é modelar processos de mudanças de uso e cobertura do solo em diferentes escalas no ambiente TerraME, utilizando-se a gama de conceitos e recursos disponíveis neste, e comparar os modelos resultantes com modelos similares encontrados na literatura. O principal desafio será desenvolver métodos de comparação entre estes modelos.

1.1 Hipótese

A flexibilidade do ambiente TerraME permite gerar modelos LUCC combinando diferentes abordagens e escalas, e facilita o desenvolvimento de modelos integrados.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral desta proposta de tese é desenvolver modelos LUCC no ambiente TerraME, e compará-los com os modelos LUCC similares, baseados em diferentes abordagens e para diferentes escalas.

1.2.1 Objetivos Específicos

1) Desenvolver modelos de mudança de uso na Amazônia, adequados para descrever processos em diferentes escalas de estudo. Estes modelos deverão buscar aprimorar aplicações anteriores de modelos LUCC descritas na literatura utilizando os recursos disponíveis em TerraME.

2) Desenvolver uma metodologia de avaliação dos modelos propostos, com base nas métricas de validação de modelos LUCC.

1.3 Contribuição desta proposta

A contribuição desta proposta está no desenvolvimento de uma metodologia de avaliação e comparação da expressividade de modelos LUCC no ambiente TerraME.

1.4 Organização do texto

O texto está organizado como se segue. Os capítulos 2 e 3 trazem a fundamentação teórica desta proposta de tese. No Capítulo 2, é feita uma breve revisão sobre modelos LUCC. O Capítulo 3 aborda o ambiente de modelagem TerraME. Os detalhes desta proposta de tese são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5, encontram-se os mecanismos de avaliação e o cronograma das atividades. No Capítulo 6, estão as considerações finais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Modelagem LUCC

Uma grande variedade de modelos LUCC pode ser encontrada na literatura, com objetivos, técnicas, embasamento teórico e tradições de modelagem distintas. Uma revisão extensa de teorias de uso da terra e técnicas de modelagem pode ser vista em Briassoulis (2000). Irwin (2001) apresenta uma revisão de modelos de uso da terra baseados na teoria econômica. Uma revisão dos modelos baseados em agentes pode ser encontrada em Parker (2001). Brown (1994), Lambin (1997), Kaimowitz (1998) e Barbier (2001) apresentam revisões de modelos de desflorestamento. Eastman (2005) apresenta uma comparação técnica dos mecanismos internos de nove modelos de mudança no uso da terra. Lambin (2000) discute a aplicação de modelos LUCC de estudos intensificados de uso da terra. Veldkamp (2001a) e Verburg (2004) discutem prioridade na pesquisa de modelos LUCC, focando em modelos projetivos espacialmente explícitos. Veldkamp (2001b) discute tópicos de escala também nos modelos espacialmente explícitos.

Segundo Lambin (2001a) e Veldkamp (2001b), modelos LUCC podem ser categorizados de acordo com a técnica de modelagem empregada, em: (a) modelos estocásticos, (b) modelos estatísticos, (c) modelos de otimização, (d) modelos de processo/dinâmicos, (e) modelos baseados em autômatos celulares e agentes, e (f) modelos híbridos/integrados.

2.1.1 Tipos de modelos LUCC

2.1.1.1 Modelos estocásticos

Baseiam-se principalmente em modelos de Probabilidade de Transição entre diferentes classes de uso/cobertura. São empregados para fins de mudanças de uso/cobertura sendo normalmente utilizados para projetar, de modo agregado, a quantidade de determinado tipo de uso/cobertura. Isto é feito num determinado passo do modelo, com base nas probabilidades de transição estimadas em dados

históricos de mudança uso/cobertura (por exemplo, dados multitemporais obtidos a partir imagens de Sensoriamento Remoto).

Os modelos estocásticos possuem grande simplicidade operacional, pois: não consideram causas/fatores determinantes da mudança (“drivers”); desconsideram heterogeneidade temporal do processo; assumem a estacionariedade nos seus modelos e não consideram restrições em termos da quantidade total de área disponível. Dessa forma só podem ser aplicados para projeções de curto prazo. Diversas alterações foram propostas para minimizar estas limitações, descritas em Lambin (1997). Em especial, Turner (1987) propôs levar em consideração os efeitos de vizinhança para tornar o modelo espacial.

2.1.1.2 Modelos estatísticos (empíricos)

Visam a identificar explicitamente as relações entre fatores determinantes e mudanças de uso/cobertura usando técnicas de análise estatística multivariada. As relações estatísticas estabelecidas não podem ser tomadas como relações causais, e não podem ser extrapoladas para outras áreas de estudo². Estes modelos esclarecem a importância de diferentes fatores no processo de mudança em determinado momento e região, mas possuem poder projetivo de curto prazo, como mencionado anteriormente, devido à não estacionariedade temporal dos processos de mudança de uso/cobertura.

2.1.1.3 Modelos de Otimização

Empregam técnicas de otimização em modelos de mudança, usualmente Programação Linear no nível micro-econômico (local), e modelos de equilíbrio geral, no nível macro-econômico (nacional) (Lambin *et al.*, 2001b) (Kaimowitz, 1998).

De acordo com Veldkamp (2001b), modelos de Programação Linear otimizam a configuração do uso da terra de acordo com um número de objetivos técnicos, de segurança alimentar, ambientais e/ou econômicos. Os resultados da execução de um modelo de Programação Linear são valores otimizados dos objetivos e conjunto ótimo de variáveis de decisão. Este tipo de modelo, por dar pouca importância ao

² Um subconjunto importante desta categoria consiste da categoria de modelos **econométricos**, que buscam explicar mudanças de uso com base em uma ou mais equações que expressem as relações entre a demanda e produção e seus fatores determinantes (normalmente através de modelos de regressão linear), com maior ênfase a fatores econômicos.

papel de instituições, populações e fatores biofísicos, leva à existência de comportamentos economicamente não ótimos. A maior parte destes modelos foi desenvolvida para a escala micro/local, logo existem problemas quando se deseja aplicá-los para outras escalas.

Modelos de otimização apresentam como desvantagem a definição um tanto arbitrária das funções objetivas e o fato das pessoas apresentarem, em muitos casos, comportamento economicamente não ótimo, devido às diferenças em valores, atitudes e culturas, por exemplo. Enquanto em níveis agregados estas diferenças podem não ser significativas, elas se tornam mais relevantes quando se está interessado em escalas mais finas e na diversidade entre atores.

2.1.1.4 Modelos de Processo Dinâmicos

Padrões de mudanças de cobertura são causados por interações entre processos sócio-econômicos e biofísicos no tempo e espaço. Modelos de simulação dinâmicos baseados em processos buscando reproduzi-los e seguir sua evolução. Enfatizam a interação entre os vários componentes formando o sistema, e são baseados no conhecimento a priori dos fatores determinantes e suas interações com as mudanças no sistema.

São modelos importantes para fazer projeções a longo prazo sobre o sistema de uso devido à não heterogeneidade temporal dos processos. Evidências mostram que mudanças de uso/cobertura são persistentes por períodos de 10 a 15 anos, no entanto certos eventos podem alterar tendências rapidamente. Mudanças nas condições políticas, econômicas e institucionais (fatores subjacentes) podem alterar significativamente as taxas e direção de mudanças de uso/cobertura; mudanças no sistema podem ocorrer uma vez que algum limiar é ultrapassado, ou serem iniciadas por eventos biofísicos (ex: seca) ou sócio-econômicos (ex: inovação tecnológica). Entender os tipos de influências que levam as tendências do sistema de uso a divergir rapidamente é importante.

Um exemplo interessante pode ser encontrado em Stéphenne e Lambin (2001), que descreve um modelo dinâmico para os países Sudano-Sahelian da África, denominado SALU. O objetivo deste modelo é a estimativa de área para diferentes tipos de uso: vegetação para extração de carvão vegetal, agricultura (subsistência e mercado) e pastagens. Dois processos são modelados: (1) expansão da agricultura e

desflorestamento, e (2) intensificação da agricultura, que irão influenciar temporalmente a quantidade de terra utilizada para cada um dos usos. Além disso, o modelo gera alguns indicadores, como produtividade e degradação do solo. (Stephenne; Lambin, 2001).

2.1.1.5 Modelos baseados em Autômatos Celulares

Modelos baseados em Autômatos Celulares fazem parte de um conjunto maior de modelos espaciais cuja base é uma partição do espaço em células regulares ou irregulares, que podem ser denominados **Modelos Celulares**³. Autômatos Celulares (AC) são definidos formalmente por uma matriz de células, uma relação de vizinhança entre células; um conjunto de estados discretos; um conjunto de regras de transição entre estados; e um incremento discreto de tempo. Na sua formulação original, as regras do AC são uniformes em todo o espaço, e todas as mudanças são causadas por fatores locais. Autômatos Celulares têm sido explorados desde os anos 50 na área de Ciência da Computação, e seu poder reside na sua simplicidade formal e nos padrões complexos que podem emergir de tal simplicidade.

Diversas modificações na concepção básica dos AC foram propostas para que pudessem ser utilizados em aplicações de modelagem de mudanças de uso/cobertura (urbana e regional) de modo mais realista, como discutido em Couclelis (1997). Exemplos de modificações propostas nos denominados AC generalizados são: a utilização de regras probabilísticas no lugar de regras determinísticas; não uniformidade de regras e vizinhanças; incorporação de efeitos de *distance-dacay* nas relações de vizinhança; passos de tempo variáveis; abertura a influências externas, em especial a restrições de demanda. A Figura 2.1 ilustra as modificações mais comuns.

Cabe notar que Couclelis (1997) coloca também que, embora tais modificações sejam necessárias do ponto de vista de tornar os AC aplicáveis a problemas reais, podem acabar gerando sistemas com estruturas muito complicadas. Pode-se perder umas das características principais dos AC, o contraste entre sua estrutura simples e os padrões complexos e surpreendentes que podem surgir a partir de tal estrutura. Por outro lado, segundo Briassoulis (2000), os AC generalizados apresentam grande potencial

³ Modelos em todas as categorias acima podem ser considerados modelos celulares se a unidade mínima de análise for uma célula.

para dar suporte ao teste de hipóteses/teorias alternativas através da definição das regras de transição apropriadas para aplicações e contextos distintos.

Discussões interessantes sobre a aplicabilidade de modelos AC a questões urbanas e regionais podem ser encontrados em Torrens (2001). Exemplos de modelos AC são Clarke (1998) (regras determinísticas para crescimento urbano em São Francisco) e os diversos modelos desenvolvidos pelo RIKS (Research Institute for Knowledge Systems), por exemplo, o modelo SimLucia (White; Engelen, 1997), para uma ilha do Caribe.

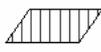
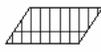
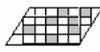
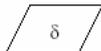
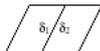
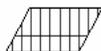
Espaço	Estrutura	Regular 	irregular 
	Propriedades	Uniforme 	não uniforme 
Vizinhança		Estacionária 	não estacionária 
Função de Transição		Universal δ 	não universal δ_1, δ_2 
Tempo		Regularidade ----->	irregularidade - - - - ->
Sistema		Fechado 	aberto 

FIGURA 2.1 Generalização comuns em AC [baseado em Couclelis, (1997)]

Parker (2002) discute a aplicabilidade dos AC para modelar o processo de decisão humana. Para ele, autômatos celulares são úteis, em linhas gerais, para modelar os aspectos ecológicos das mudanças de uso/cobertura, porém enfrentam problemas em incorporar o processo de decisão humana, embora em algumas aplicações considere-se que, indiretamente, as células sejam coincidentes com unidades de produção ou propriedades (ex: em aplicações urbanas correspondam a diferentes lotes) e que as regras de transição sejam proxies do processo de decisão dos proprietários. No entanto, em LUCC, pode ser necessário modelar atores (agentes) móveis que atuam em diferentes partes do espaço, a heterogeneidade de agentes, agentes organizados em redes sociais e instituições, e agentes que controlam porções grandes e variáveis

(no tempo) do espaço. Para suprir estas necessidades, surgiram os Modelos Baseados em Agentes para LUCC.

2.1.1.6 Modelos baseados em Agentes

Modelos Baseados em Agentes originaram-se também na área de Ciência da Computação, posteriormente aos ACs. Agentes consistem de entidades autônomas capazes de tomar decisões; são compostos de regras que traduzem informações internas ou externas em estados, decisões ou ações. De acordo com Torrens (2001), agentes são bastante similares aos autômatos, porém com características menos bem definidas formalmente, com possibilidade de mobilidade.

Modelos Baseados Agentes para LUCC (ABM-LUCC) combinam Modelos Baseados em Agentes e Modelos Celulares, incorporando ligações endógenas entre o processo de decisão humano (referentes direta ou indiretamente ao sistema de uso) e suas interações com o ambiente. Neste caso, os agentes (por exemplo, populações migrantes, proprietário de terra, ou governo local) tomam decisões com base em regras internas e condições locais. Os ABM-LUCC consistem de:

- Entidades autônomas capazes de tomar decisões (agentes);
- Um ambiente onde os agentes interagem em um espaço celular; podendo ser um autômato celular (AC);
- Regras que definem o relacionamento entre os agentes e o ambiente;
- Regras que determinam a seqüência de eventos/ações no modelo.

Um agente pode representar um proprietário de terra ou entidades num nível hierárquico mais alto, como uma associação de pequenos produtores ou o governo local. O processo de decisão do agente (por exemplo, o proprietário de terra) leva em consideração, além do seu conhecimento individual e valores, as condições do ambiente (ex: condições biofísicas, como a qualidade do solo), assim como as decisões dos agentes vizinhos e as interações com outros níveis hierárquicos (ex: governo local). Por outro lado, processos biofísicos, como erosão e crescimento da vegetação secundária, podem ser incorporados como modelos celulares, em alguns casos como modelos AC. A figura abaixo ilustra estes conceitos.

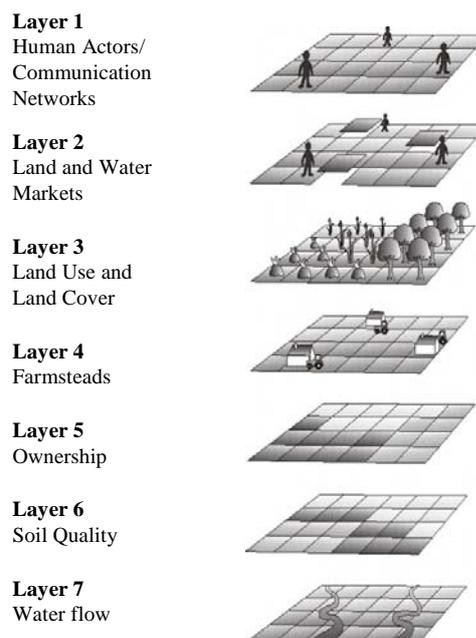


FIGURA 2.2 Representação espacial e interdependências em modelos ABM-LUCC [Fonte: Tomas Berger, in Parker (2002)]

Como mencionado anteriormente, existe um grande esforço da comunidade científica no sentido de explorar as potencialidades deste tipo de modelo. Entre elas, estão a capacidade de:

- modelar de forma integrada os sistemas Humano-Ambiental;
- representar complexidade (heterogeneidade e interdependências), emergência e dinâmica entre escalas;
- examinar trajetórias dinâmicas de mudanças, sem as restrições de condições de equilíbrio impostas por, por exemplo, modelos de otimização e econométricos;
- serem utilizados como laboratórios computacionais para condução de experimentos e desenvolvimento de modelos teóricos;
- finalmente, serem utilizados para o apoio a tomada de decisão e construção de cenários.

As aplicações existentes são normalmente em escala local, mas algumas incluem interações multiescala.

Agentes são normalmente implementados como objetos, em linguagens de programação Orientadas a Objetos. A maior parte das pesquisas em andamento utiliza plataformas de simulação existentes, como SWARM, RePast, Ascape e CORMAs. Em Parker (2002) é apresentada uma comparação entre as plataformas utilizadas. Alguns projetos implementam soluções de implementação próprias.

Um exemplo é o modelo computacional LUCITA, que foi desenvolvido para explorar relações homem-ambiente em uma área de pequenas propriedades na Amazônia Brasileira (Altamira/Pará). LUCITA é um modelo espacialmente explícito, composto de dois submodelos que interagem através da paisagem representada por um *raster* (Figura 2.3). Estes dois subsistemas representam o sistema natural da região, e uma coleção de proprietários individuais que tomam decisões sobre suas fazendas. LUCITA foi inicialmente escrito em JAVA usando o *toolkit Repast*. A simulação permite que o usuário altere a composição demográfica, assim como os recursos de trabalho e capital, para observar as mudanças resultantes no uso e cobertura da terra em cada propriedade.

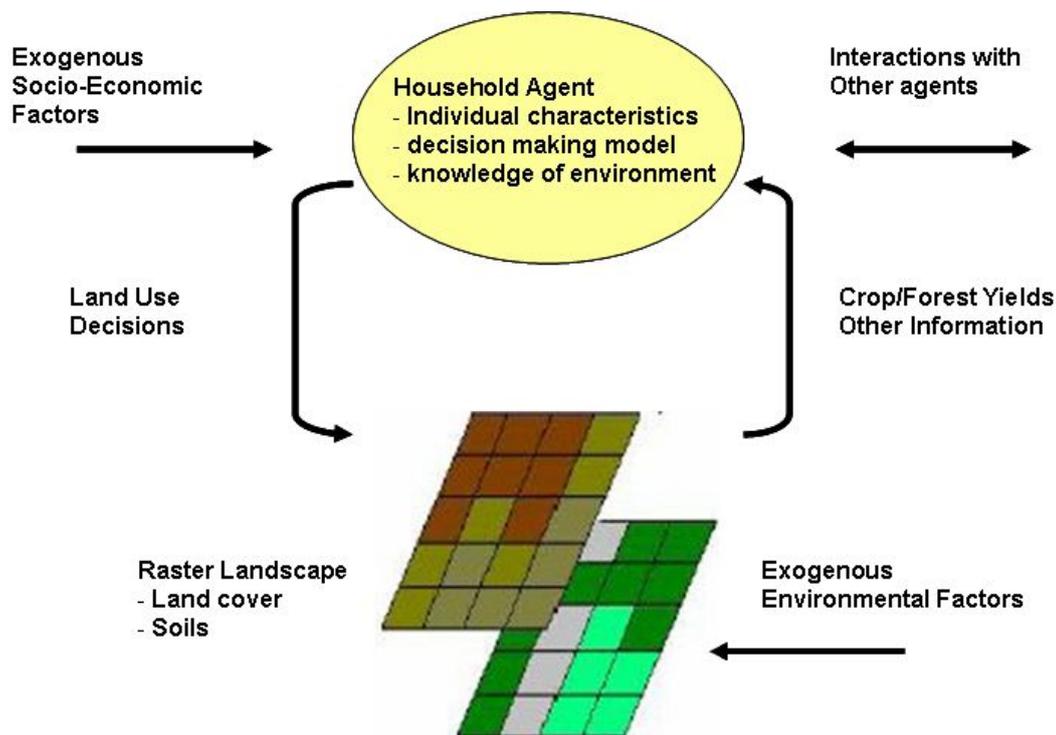


FIGURA 2.3 Modelo conceitual do LUCITA [Fonte: Deadman (2002)]

2.1.1.7 Modelos Híbridos/Integrados

Estes modelos combinam, num mesmo arcabouço, diversas das técnicas de modelagem utilizadas nas demais categorias. Em muitos casos, uma denominação

mais apropriada seria "Modelo Híbrido", pois o nível de integração entre componentes nem sempre é alto Lambin (2000); muitos modelos existentes consistem de subsistemas ligados, mas não fortemente integrados.

O termo modelos integrados também pode ser entendido como a integração das dimensões Social, Econômica, Ambiental e Institucional de um problema.

Muitos modelos LUCC são constituídos de submodelos que atuam em múltiplas escalas, estruturados hierarquicamente, combinando uma ou mais das técnicas de modelagem LUCC descritas nas seções anteriores, com outras para outros subsistemas. Nestes modelos, a quantidade total de mudança por tipo de uso é projetada para toda a área (demanda) no nível mais alto. Posteriormente, esta quantidade total, é alocada a um espaço celular, nos níveis mais baixos, de acordo com processos de alocação que consideram, entre outros, uma superfície de probabilidade ou de potencial de mudança. Esta superfície é calculada de acordo com a técnica de modelagem empregada na concepção do modelo (autômato celular generalizado, modelo estatístico, etc.). A Figura 2.4 ilustra estes passos.

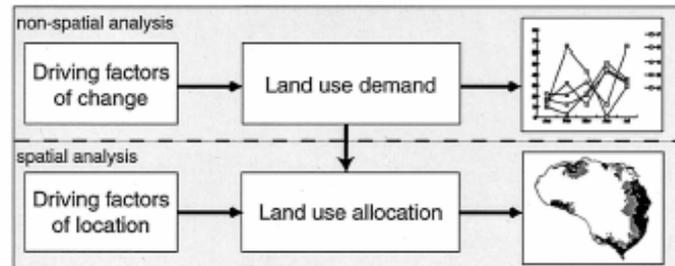


FIGURA 2.4 Representação esquemática de modelos que combinam projeção de quantidade e localização de mudanças [Fonte: Verburg (2002)]

A seguir serão discutidos alguns exemplos deste tipo de modelo que empregam técnicas e abordagens distintas.

a) **CLUE** (*Conversion of Land Use and its Effects*)/**CLUE-S** (*Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*): arcabouços de modelagem desenvolvidos na Wageningen University, também na Holanda (Veldkamp; Fresco, 1996); (Verburg et al., 1999); (Verburg et al., 2002), para quantificar relações entre uso do solo e seus fatores determinantes através de relações estatísticas quantificadas empiricamente em combinação com modelagem dinâmica. Em contraste com os modelos estatísticos

descritos na Seção 2.1.1.2, através dos quais é possível gerar superfícies de probabilidade/potencial de mudança, mas somente para cada tipo de uso independentemente, os modelos da família CLUE são capazes de simular dinamicamente a competição entre diversos tipos de uso com base nestas superfícies. A seguir são apresentadas brevemente as diferenças entre as duas versões do arcabouço:

a.1) CLUE: desenvolvido para aplicações a nível nacional e continental, aplicado a América Central (Kok; Veldkamp, 2001), Equador (De Koning *et al.*, 1999), China (Verburg; Veldkamp, 2001), Java e Indonésia (Verburg *et al.*, 1999). É uma das primeiras tentativas no sentido de modelar fatores determinantes em múltiplas escalas e as interações entre escalas. Isto é realizado da seguinte maneira: espaço é dividido em células contendo informações sobre as proporções de cada classe de uso/cobertura na célula, agregadas em diversas escalas (nas aplicações acima, células de 7 km x 7 km a 32 x 32 km, na resolução mais fina, foram utilizadas, normalmente geradas com base em dados de censo). Posteriormente, análises de regressão linear são realizadas, de modo independente, em diversas escalas. O modelo trabalha em três níveis (nacional para cálculo de demanda, resolução grossa e resolução fina para alocação), organizado em dois módulos principais⁴:

- Módulo de Demanda: em termos nacional, são calculadas demandas por diferentes produtos agro-pecuários por modelos não espacializados, transformadas por demanda por terra para diferentes tipos de uso; para o cálculo da demandas, diversas alternativas podem ser aplicadas, desde simples projeções de tendências até modelos econômicos complexos para projeção de taxas de mudança.
- Módulo de Alocação: de modo espacializado, esta demanda é alocada às diversas células, inicialmente numa escala mais grosseira, com base em superfícies de regressão (equivalente ao erro da regressão) para cada tipo de uso, que indicam áreas com maior tendência a mudança, calculadas com base nos fatores e coeficientes de regressão definidos pela análise estatística para esta escala; a alocação na escala mais fina (utilizando os fatores e equações definidos para esta escala) é então realizada do mesmo modo, levando também em consideração a alocação realizada na escala mais grosseira; a competição entre classes é controlada pela área disponível em cada célula. Logo, mesmo com demanda e potencial de mudança para, por exemplo, aumento da proporção de determinada classe, podem ocorrer mudanças na direção oposta; o modelo também possui

⁴ Em algumas aplicações, foi desenvolvido também um módulo de Crescimento Populacional, distribuído depois pelas células.

mecanismos *bottom-up*, permitindo a alocação de mudanças independente de demanda (desenvolvimentos autônomos).

a.2) **CLUE-S:** de maneira semelhante, a demanda é calculada a nível nacional (externamente), mas possui apenas um nível especializado para alocação de mudanças. Foi projetado para análises mais regionais, para dados de SIG com resolução da ordem de metros, gerados com base em imagens de Sensoriamento Remoto. Neste caso, as células são classificadas como pertencendo a apenas uma classe de uso (variáveis categóricas), e métodos de regressão logística são aplicados para calcular a probabilidade de cada célula pertencer a determinado tipo de uso⁵. Além das relações estatísticas empregadas no processo de alocação e competição entre classes, este modelo incorpora regras para restrição de transições em áreas protegidas e zoneamentos, definição de transições possíveis e elasticidade (resistência) a mudanças; Isto é, o CLUE-S combina relações estatísticas com algum conhecimento de processo de dinâmica temporal, incorporado através de regras e determinados parâmetros do modelo. Cabe notar que nos modelos da família CLUE as relações de vizinhança não são consideradas no processo de alocação diretamente (como em modelos baseados em autômatos celulares), mas podem ser consideradas no cálculo de alguns dos fatores condicionantes (ex: pressão populacional da vizinhança), em especial no CLUE-S, que não considera explicitamente múltiplas escalas, de modo que estes fatores reflitam influências regionais (de outro nível da hierarquia), não apenas locais.

b) **Dinâmica:** desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG - <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>), composto por dois módulos:

- Módulo central é um Autômato celular Generalizado, no qual superfícies de Probabilidade de Transição entre determinadas classes de uso (ex: Floresta para Desflorestado; Desflorestado para Vegetação Secundária), calculada com base em Regressão Logística (Soares, 2002) ou na técnica estatística de Pesos de Evidência (Almeida, 2002), para definição das relações entre a ocorrência de transições e fatores condicionantes. Uma vez calculadas as superfícies de Probabilidades, o sistema utiliza dois métodos para seleção de locais de mudança e competição entre transições na mesma célula (restrito à demanda por transições, definidas com base em modelos

⁵ Notar que os modelos da família CLUE utilizam o estado do sistema de uso em um ponto no tempo para estabelecimento das relações estatísticas (dados *cross-section*), não mudanças em determinado período.

externos), denominados *Patcher* (para criação de novos núcleos) e *Expander* (para expansão de manchas existentes).

- Modulo para Construção de Estradas, que estende a rede rodoviária a partir das estradas existentes, considerando: o nível de atratividade da região; um custo da superfície, que é utilizado para definir o caminho da nova estrada; a densidade de estradas por área, o tamanho médio de um novo segmento em cada passo do modelo. Combinando estes parâmetros, o construtor pode replicar diferentes padrões de colonização, como espinha de peixe ou orgânico, como em Machadinho, em Rondônia.
- Cálculo de demanda: A demanda por diferentes transições é obtida através de matrizes de probabilidade de transição históricas que podem ser calculadas de diversas formas (ex: simples extrapolação de mudanças observadas em dados históricos - Modelo Probabilístico). Recentemente, para analisar o impacto do asfaltamento da BR-163, foi desenvolvido um modelo de simulação dinâmica para cálculo destas probabilidades, no qual são consideradas variáveis como crescimento populacional urbano e rural, capital social, incluindo ação de movimentos sociais e ONG, políticas governamentais e atuação de instituições; investimentos sociais e em infra-estrutura; Governança é visto como um estoque; a região foi subdividida em 4 sub-regiões, cada sub-região tendo seu valor inicial, e a governança flui de uma região para outra como função do *welfare* (bem-estar) que é uma variável exógena (Soares-Filho *et al.*, 2002).

Na linha de pesquisa de modelos multiagentes, várias iniciativas contemplam a concepção de modelos integrados, em especial a integração entre processos biofísicos (ex: erosão) através de modelos celulares, e o processo de decisão sobre o uso da terra. Algumas propostas prevêm também a utilização de modelos integrados em múltiplas escalas, como, por exemplo, o modelo *SprawlSim* (Torrens, 2002), que visa facilitar o entendimento de questões relacionadas ao fenômeno de *urban sprawl* em cidades dos EUA, formado por modelos em diversos níveis. Estes níveis vão desde o regional (ex: crescimento e declínio sócio-econômico), meso (ex: formação de novos núcleos de desenvolvimento nas bordas da cidade), ao nível de lotes individuais e dos indivíduos que os ocupam (ex: locação residencial), combinando no nível mais baixo um autômato celular para transição de uso e modelos de agentes que interagem com estes.

2.2 Processos clássicos de modelagem

Em geral na construção do modelo são adotados os seguintes passos: a *priori* – conceituação, escolha do tipo de modelo e aspectos computacionais e a *posteriori* – calibração/verificação e validação.

No processo de modelagem de fenômenos espaciais segundo Carneiro (2003) envolve as fases de construção da base de dados, construção do modelo, parametrização do modelo e calibração/verificação e validação do modelo.

- **Construção da base de dados:** esta etapa implica na aquisição e conversão de uma série temporal de dados espaciais para o estabelecimento de uma base de dados. Estes dados permitem validar o modelo e explicar o processo de mudança que devem ser armazenados em escalas e formatos adequados.
- **Construção do Modelo:** é nesta etapa que as abordagens teórica e metodológica que influenciarão o modelo são selecionadas e utilizadas na definição das entidades que participarão do modelo e das regras que regem a sua dinâmica.
- **Parametrização do Modelo:** consiste, essencialmente, (i) na definição do estado inicial para a execução do modelo, que é determinado pela escolha do tempo “t”, a partir do qual seus estados deverão evoluir; (ii) na definição da resolução espacial a ser utilizada (ou de várias resoluções), e (iii) na extensão da área de estudo a ser considerada (ou das várias extensões).
- **Calibração/Verificação:** o objetivo principal da calibração do modelo e da sua verificação é a obtenção de estimativas para os parâmetros do modelo e também comparar uma previsão das respostas do modelo com as respostas observadas experimentalmente;
- **Validação do Modelo:** Para Rykiel Jr (1996) validação é a demonstração de que um dado modelo, dentro do seu domínio de aplicabilidade, possui um espectro satisfatório de precisão, compatível com a aplicação prevista para o modelo.
- **Execução e Visualização do Modelo e Análise de Relatórios:** nesta fase, os modelos dos processos são colocados em execução sobre o espaço de células de maneira iterativa, gerando relatórios e dados espaço-temporais que registram a dinâmica do modelo para uma posterior análise.

- **Projeção de Cenários:** nesta etapa, são construídos cenários que permitem ao modelador verificar o impacto de algumas hipóteses por ele formuladas sobre o fenômeno modelado. Nos autômatos celulares, estas hipóteses são representadas na forma de restrições, isto é, regras definidas sobre os estados das células que têm o poder de impedir ou forçar uma determinada regra de transição.

O processo de modelagem não precisa envolver todas as fases descritas acima e tampouco possui uma seqüência preestabelecida para isto, podendo algumas fases serem realizadas de forma concorrente (Carneiro, 2003).

2.3 Validação de modelos

Validar modelos não significa dizer que o modelo contém alguma verdade absoluta ou que seja o melhor modelo disponível, mas que é aceitável para uso na aplicação que foi criado. Colocado em termos operacionais, validação envolve a comparação dos dados modelizados com aqueles obtidos pela observação ou medidos no sistema real.

Podem ser encontrados na literatura vários métodos para calibrar e validar modelos espacialmente explícitos (Costanza, 1989); (Pontius, 2000); (Pontius, 2002); (Pontius *et al.*, 2004); Herold (2005). Para Veldkamp (2001a) uma ferramenta para desenvolvimento de modelo dinâmico espacial deve prover métodos automáticos para calibração, verificação e validação de modelo. Mas não há uma abordagem totalmente aceita para validação de modelos, pois até mesmo os conceitos para validação têm elementos subjetivos fortes e fica claro que uma definição funcional requer o estabelecimento de uma convenção que é um padrão geralmente aceito (Costanza, 1989).

CAPÍTULO 3

O AMBIENTE DE MODELAGEM TerraME

3.1 Visão geral do TerraME (*Terra Modeling Environment*)

TerraME é um ambiente de modelagem de domínio público utilizado para a construção de modelos espaciais dinâmicos. Sua arquitetura suporta a construção de modelos espaciais dinâmicos, empíricos e teóricos, contínuos ou discretos, multiescalar e pode ser aplicado a diferentes domínios de conhecimento. É baseado em um modelo de autômatos celulares aninhados. O objetivo do TerraME é fornecer suporte computacional necessário às áreas de pesquisa da rede GEOMA (Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental da Amazônia): física ambiental, áreas alagadas, biodiversidade, LUCC, dinâmica populacional e clima. Seu principal requisito é modelar e simular a diversidade espaço-temporal da região amazônica em termos de: atores, processos, velocidade de mudanças e relações de conectividade (Carneiro *et al.*, 2004).

O TerraME permite a construção de modelos com comportamentos heterogêneos no espaço e no tempo, espaços não-isotrópicos e multiescalar. Permite ainda a construção de modelos complexos e integrados, utilizando modelos aninhados, onde os agentes podem se comunicar. A arquitetura da TerraME é fortemente acoplada com a biblioteca TerraLib (Câmara *et al.*, 2000) O ambiente de TerraME implementa o modelo de Nested-CA e serviços para análise de dados de espaços-temporais e gerenciamento, desenvolvimento de modelo, simulação, e avaliação. Além disso, TerraME implementa métodos de calibração e de validação para avaliação de modelos dinâmicos espacialmente explícitos (Costanza, 1989), (Pontius, 2002) e (Pontius *et al.*, 2004).

3.2 Nested-CA

Devido à necessidade de adequar suporte computacional para modelagem multiescala Carneiro (2006), propôs um novo tipo de AC, chamado autômatos celulares aninhados (*Nested Cellular Automata*). O autor se baseou nas limitações observadas nos outros modelos computacionais propostas como extensão ao modelo AC para modelagem LUCC na literatura, como mostra a Figura 3.1.

Modelo	Limitação para modelos LUCC	Alternativa
AC estendido	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de um conjunto de regras em todo espaço celular 	uso de modelos baseados em agente imerso dentro um espaço celular (Parker, Berger et al. 2001; Batty 2005)
Baseado em agentes que usam uma única escala	<ul style="list-style-type: none"> • Não representar comportamento dependente de escala aspecto crucial de paisagem e dinâmica humana 	Modelo CA em camadas (Straatman, Hagen et al. 2001)
Modelo AC em camadas	<ul style="list-style-type: none"> • Requer uma decisão sobre a estratificação do espaço onde cada célula é dependente de uma célula pai e controles várias células filhas • A CA estendido em camadas falha em prover apoio adequado para modelagem em multiescala já que controla só camadas de resoluções espaciais fixas 	<i>nested-CA</i>

FIGURA 3.1 Limitações e alternativas para modelos LUCC [Fonte: (Carneiro, 2006)]

A idéia do *Nested-CA* é permitir embutir espaços celulares em outros espaços celulares. As construções de AC em blocos aninhados são chamadas de ambientes celulares (ou ambientes). Um ambiente está composto de um espaço celular e de uma ou mais máquinas de estados que operam neste espaço. Os ambientes podem ser aninhados, como mostrado na Figura 3.2.

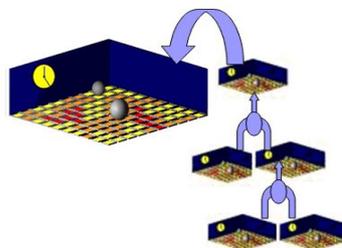


FIGURA 3.2 Um AC aninhado como uma composição de ambientes celulares [Fonte: (Carneiro, 2006)]

O conceito de ambientes aninhados é apropriado para análise multiescalar, pois permite associar cada processo à escala de espaço apropriada. Cada processo é representado por seu próprio conjunto de regras, associado a um ambiente cujo espaço celular tem resolução espacial adequada e um conjunto de atributos de célula. Esta flexibilidade permite que processos diferentes operem na mesma paisagem, com escala de espaço diferente. Em um AC aninhado, “processos espaciais vêm antes das estruturas espaciais” (Carneiro, 2006). Além disso, os processos podem se comunicar por meio de mensagem.

Nested-CA satisfaz os seguintes requisitos:

- Permite o desenvolvimento de modelos espaciais dinâmicos complexos organizados de forma hierárquicas em apenas um AC;
- Possível construir modelos com diferentes partições espaciais geográficas com vários atores e processos;
- Simula comportamentos discretos e contínuos;
- Relação de vizinhança pode ser definida em topologia isotrópica e não estacionária;
- *Iterators* espacial reproduzido como diferentes mudanças de padrões espaciais;
- Modelo *nested-CA* suporta o desenvolvimento de modelos LUCC baseados em AC tradicional e abordagens baseadas em agentes;
- *Nested-CA* é uma modelo de computação satisfatório para suportar múltiplaescala no desenvolvimento de modelos de mudança e avaliação ambiental;
- Modelos baseados em agente e baseados em AC para simulação de mudança ambiental podem ser expressos como especialização do modelo de *nested-CA*.

3.3 Módulos e Serviços em TerraME

Os serviço de modelagem LUCC providos pela arquitetura de TerraME é distribuído dentro dos módulos de software. Foram desenvolvidos dois destes módulos: Framework TerraME e o intérpretador TerraME. Os outros módulos são a biblioteca TerraLib GIS e a aplicação TerraView GIS (Câmara, Souza al de et. 2000), a linguagem de programação LUA (Ierusalimschy, Figueiredo al de et. 1996), e a plataforma de desenvolvimento Eclipse (Bott 1989). Para descrever os modelos pode-se usar qualquer editor. Preferivelmente, o software Eclipse deveria ser usado, pois tem um *plugin* grátis para LUA que pode ser configurado para invocar o intérprete de TerraME. Deste modo, o modelador desenvolve, executa e depura o modelo dentro um integrado ambiente.

O código fonte do modelo é enviado ao interpretador TerraME. O intérprete TerraME é a aplicação que colocar todos os modelos de serviços junto, provendo a checagem da sintaxe e semântica do modelo, modelo de simulação e avaliação modelo. Recebe

um conjunto de arquivos de texto contendo modelos descritos em linguagem de modelagem TerraME e os executa na ordem que eles foram passados como parâmetros.

A interface TerraME/LUA registra novos tipos para modelagem dinâmico espacial na máquina virtual interpretador LUA. O interpretador LUA chama as funções providas pelo framework TerraME com implementação destes tipos.

Para gerenciamento de dados e análise, TerraME lê dados de entrada do modelo e salva a saída no banco de dado espaço-temporal TerraLib. Este banco de dados pode ser construído usando a aplicação de TerraView. A API TerraLib provê vários métodos para o cálculo de atributo de célula avalia dados *raster* e vetoriais. TerraView provê questões espaciais e funcionalidades estatísticas espaciais (Figura 3.3).

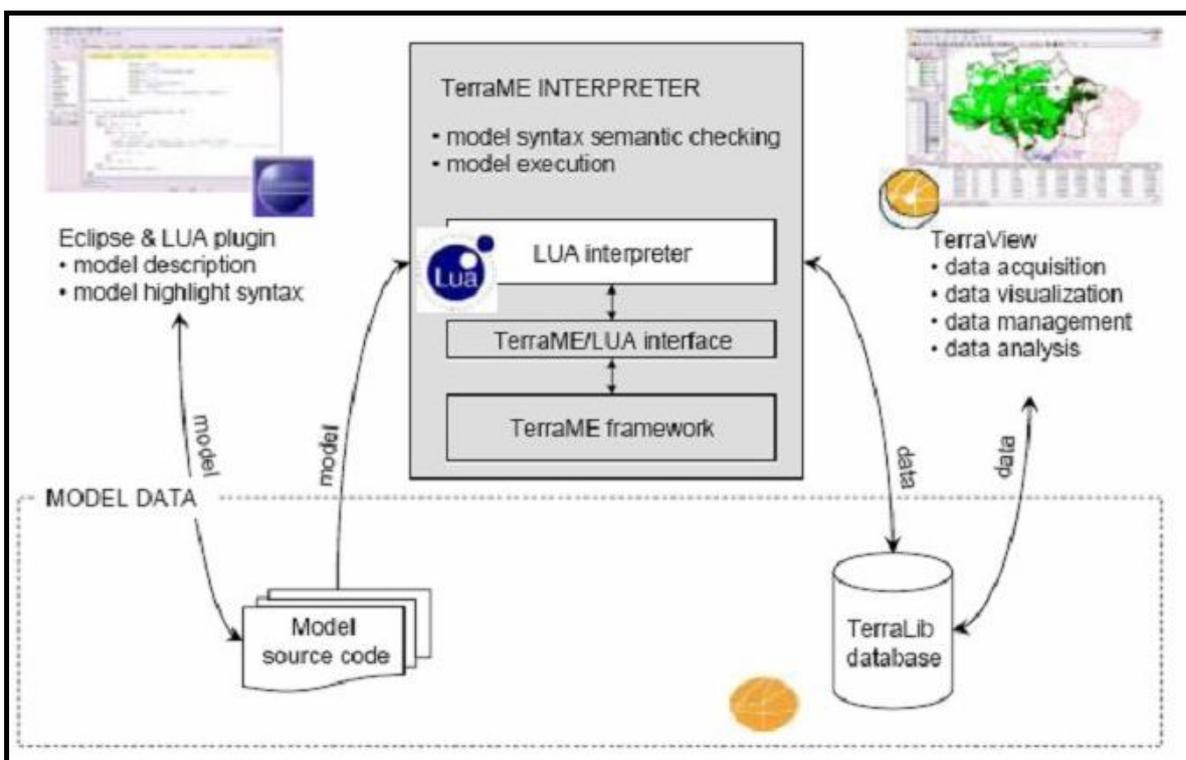


FIGURA 3.3 Módulos e serviços em TerraME [Fonte: (Carneiro, 2006)]

3.3.1 Representação de serviços no modelo

- Escala - implementada como uma combinação de modelos que podem ser aninhados permitindo o desenvolvimento de modelo multiescala. Quando executado, simula suas escalas internas executando cada modelo em ordem cronológica.

- Autômato (autômato local e global) - representa os sistemas biofísico e socioeconômico ou atores que causam as mudanças. Quando simulado, eles avaliam suas regras sobre o espaço celular, possibilita mudança dos valores do atributo de célula.
- Espaço celular - define quais propriedades serão acessíveis ao autômato em cada localização espacial.
- Tempo - determinam a ordem na quais os autômatos serão simulados. Quando executado, eles avançam o relógio de simulação e executam os modelos que devem ser simulados nesse momento.

3.4 Arquitetura

Arquitetura de TerraME é estendida em camadas. As camadas mais baixas provêm serviços básicos em cima das quais são implementados serviços de camada superiores. Na primeira camada, TerraLib oferece típico gerenciamento de dados espaciais e serviços de análise e funções adicionais para manipulação de dados temporal.

O arcabouço TerraME é um código aberto ANSI C++ e é portátil para sistemas operacionais Windows e Unix. Pode ser usado diretamente para o desenvolvimento de modelo e como o desenvolvimento de modelos em C++ pode ser um desafio para não programadores, TerraME provê uma linguagem de alto-nível para modelagem.

A terceira camada da arquitetura implementa o TerraME que modela a linguagem, o intérprete e ambiente de execução. A interface de TerraME/LUA estende LUA com novos tipos de dados para modelar a dinâmica espacial e serviços para o modelo de simulação e avaliação.

Usando a biblioteca de LUA API, ela exporta a API framework TerraME para o interpretador LUA de forma que os tipos de TerraME passa a ser reconhecido. Se preciso for, outras aplicações C ou C++ (como bibliotecas estatísticas) pode ter suas APIs exportadas para o interpretador LUA e integrado na arquitetura. A última camada, chamada camada de aplicação, é onde os modelos de usuário final ficam situados (Figura 3.4).

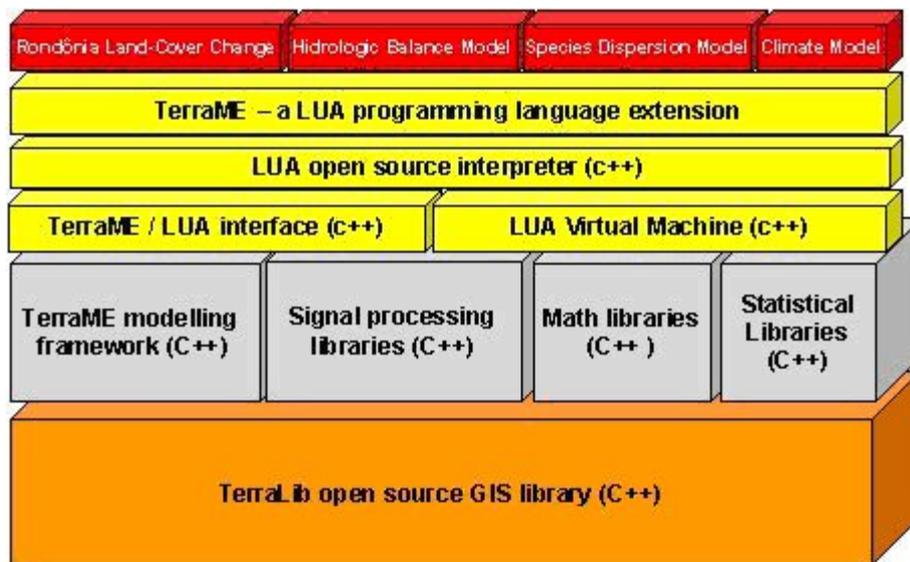


FIGURA 3.4 Arquitetura do software TerraME [Fonte: (Carneiro, 2006)]

3.5 Linguagem de modelagem TerraME (*TerraME modeling language*)

A linguagem de programação de alto nível TerraME, é uma extensão de LUA (Ierusalimschy *et al.*, 1996). Uma característica fundamental de LUA é que as variáveis não têm tipo: os tipos estão associados aos dados armazenados na variável, isto é, LUA é uma linguagem dinamicamente tipada. Funções em LUA são consideradas valores de primeira classe, isto significa que funções podem ser armazenadas em variáveis, passadas como parâmetros para outras funções, ou retornadas como resultados. O tipo *table* (tabela) é o tipo mais expressivo da linguagem. As tabelas em LUA permitem a construção de vetores convencionais, listas e registros numa mesma estrutura. A possibilidade de atribuição múltipla permite a troca de valores armazenados em duas variáveis com um único comando.

LUA oferece diversos mecanismos inovadores; porém, o mais importante é sua economia de conceitos, que a torna significativamente mais simples e menor que outras linguagens com recursos semelhantes. Entre outras estruturas que contribuem para isso, podemos destacar o mecanismo de tabelas e sua identificação com o conceito de objetos, e o mecanismo de *fallbacks* (*tag method*) (Ierusalimschy *et al.*, 1996).

Na linha de Engenharia de Software, o principal impacto de LUA foi promover o método "*bottom-up*" de desenvolvimento, com uso intensivo de componentes. O uso de LUA como "*glue-language*" permite que partes significativas de um sistema

possam ser desenvolvidas como bibliotecas, com um pequeno roteiro em LUA definindo a arquitetura final de uma aplicação.

LUA garante ainda uma programação com alto nível de abstração, já que o programador não precisa se preocupar com detalhes como declaração de variáveis e gerenciamento de memória. Com estruturas internas dinâmicas e coleta automática de lixo, o programador usa livremente as diversas opções de estruturação de dados e deixa a cargo da própria linguagem as tarefas de re-alocação e liberação de memória.

Para permitir a descrição do modelo dinâmico espacial como ACs aninhado, foram incluídos novos tipos LUA que usam o mecanismo de constructor. Estes valores são: *Scale*, *CellularSpace*, *Cell*, *Neighborhood*, *SpatialIterator*, *GlobalAutomaton*, *LocalAutomaton*, *ControlMode*, *JumpCondition*, *FlowCondition*, *Timer*, *Event* and *Message*. Maiores detalhes em Carneiro (2006).

3.5.1.1 Exemplo de modelo dinâmico espacial: Equilíbrio hidrológico

Este exemplo considera um processo de equilíbrio hidrológico simples que simula a drenagem superficial da chuva em um terreno.

Primeiro passo: definição da dimensão analítica

O modelo é composto de dois autômatos: global, que simula a chuva e um local, que simula o processo de equilíbrio da água, como a Figura 4.3 abaixo.

- Autômato global (chuva) possui *control mode*, com um *flow condition*: uma constante *rain*.
- Autômato local (equilíbrio da água) tem dois *control modes*: *dry* e *wet*.

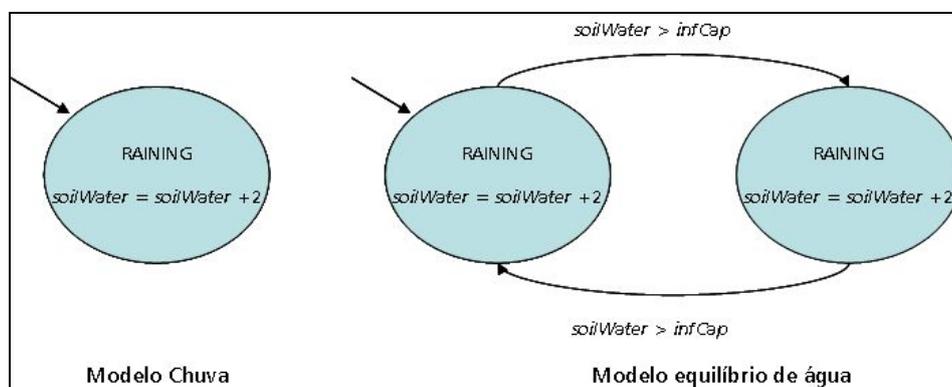


FIGURA 3.5 Modelo de chuva e equilíbrio da água [Fonte: (Carneiro, 2006)]

Segundo passo: determinação da extensão e resolução do espaço celular e do escalonador de eventos discretos usado no modelo. Espaço regular de 90 x 90 m e vizinhança de Von Neumam de 3 x 3, composta de oito células imediatamente adjacentes. Os atributos da célula são: quantidade de água no solo (*soilWater*), elevação da célula (altitude), e capacidade de infiltração da célula (*infCap*). A capacidade de infiltração de 0.5 mm/h foi considerada para todas as células e a quantidade inicial de água é zero para cada célula. A condição de *flow* do autômato chuva é de 2 mm para iniciar a simulação.

Terceiro passo: definição da resolução temporal, neste exemplo, é de 1 min e a inserção de um escalonador de evento discreto com dois pares (*event, message*).

O código em LUA/TerraME desse modelo fica da forma apresentada abaixo:

- Espaço celular na TerraLib

```
csCabecaDeBoi = CellularSpace
{
    dbType = "ADO",
    host = "amazonas",
    database = "c:\\cabecaDeBoi.mdb",
    user = "",
    password = "",
    layer = "cellsPosses90x90",
    theme = "cells",
    select = { "altimetria", "qtdeAgua", "capInf" }
}
```

- Carregar o espaço celular na TerraLib

```
csCabecaDeBoi:load();
```

- Criação da vizinhança de Von Neumam para as células

```
for i, cell in ipairs( csCabecaDeBoi.cells ) do
    neigh = Neighbourhood();
    lin = -1;
    while ( lin <= 1 ) do
        col = -1;
        while ( col <= 1 ) do
            -- add nieghbour
            index = TeCoord{x=(cell.x + col), y= (cell.y +lin);
            neigh:addCell( index, csCabecaDeBoi, 1/9 ); -- wheight = 0.111111 (9
            neighbours)
            col = col + 1;
        end
        lin = lin + 1;
    end
```

```

end
cell:addNeighbourhood( neigh );
end

```

- O ambiente "Cabeça de Boi"

```

cabecaDeBoi = Environment{

  id = "CabeçaDeBoi",

  -- Adds the cellular space to this environment
  cs = csCabeçaDeBoi,

  -- The rain GLOBAL agent
  agRain = GlobalAgent{

    it = SpatialIterator{ csCabeçaDeBoi, function( cell ) return
(cell.altimetria >= 255); end },

    ControlMode{
      id = "working",
      Flow{
        function(event, agent, cell)
          cell.qtdeAgua = cell.past.qtdeAgua + 2;
          return 0;
        end
      }
    }
  }
}

```

- O agente LOCAL do equilíbrio da água do solo

```

agWaterBalance = LocalAgent{

  it = SpatialIterator{
    csCabeçaDeBoi,
    function( cell ) return true; end
  },

  ControlMode{
    id = "dry",
    Jump{
      function( event, agent, cell )
        return cell.qtdeAgua > cell.capInf;
      end,
      target = "wet"
    }
  },

  ControlMode{
    id = "wet",
    Jump{

```

```

function( event, agent, cell )
    return cell.qtdeAgua <= cell.capInf;
end,
target = "dry"
},

```

```

Flow{
    function( event, agent, cell )

        -- calculates the water overflow
        overflow = cell.qtdeAgua - cell.capInf;
        cell.qtdeAgua = cell.capInf;

        -- gets the first cell neighbourhood
        n = cell:getNeighbourhood(0);

        -- how many neighbours are lower than the cell?
        n:first();
        countNeigh = 0;
        height = cell.altimetria;
        while ( not n:last() ) do
            neigh = n:getNeighbour();
            if (cell ~= neigh) and (height >= neigh.altimetria)then
                countNeigh = countNeigh + 1;
            end
            n:next();
        end

        -- send water to the neighbours
        n:first();
        while( not n:last() )do
            neigh = n:getNeighbour();
            if(cell ~= neigh) and (height >= neigh.altimetria)then
                neigh.qtdeAgua = neigh.qtdeAgua + overflow /
countNeigh;
            end;
            n:next();
        end
        return 0;
    end
}
},

time = Timer{
    Pair{
        Event{ time = 1985, period = 1.0 },
        Message{
            function( event )
                cabecaDeBoi.agRain:execute( event );
                print("\tchouveu");
            }
        }
    }
}

```



```
cabecaDeBoi:config(1987);  
cabecaDeBoi:execute();
```

O TerraME, através da sua estrutura, permite um fácil desenvolvimento do modelo integrado. Isto porque as construções de modelos espaciais dinâmicos são organizadas hierarquicamente de forma simples, o que possibilita a incorporação de partições espaciais geográficas diferentes. Um exemplo disto é o caso de atores específicos e processos que agem no espaço geográfico em diferentes escalas espaciais e resoluções temporais. Além disto, este ambiente de modelagem é fortemente acoplado a um SIG, o que é desejável para representar fenômenos espaciais.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

4.1 Delimitação da área de estudo e escalas

A área de estudo será a Amazônia Legal Brasileira em três grupos de escala: macro, meso e micro (FIGURA 4.1). Esta área foi escolhida por que se trata de uma área já estudada e, conseqüentemente, ter uma base de dados pronta e de fácil acesso. Em nível macro, a área será a Amazônia estudada por Aguiar (2006). Nas escalas meso e micro, as áreas serão Rondônia estudada por Soler (2005) e a área de Transamazônica/Altamira (Deadman *et al.*, 2002), respectivamente. Pretende-se trabalhar também uma aplicação urbana, que terá como a área de Bauru estudada por Almeida (2003). A resolução e extensão exatas serão definidas no decorrer do trabalho.

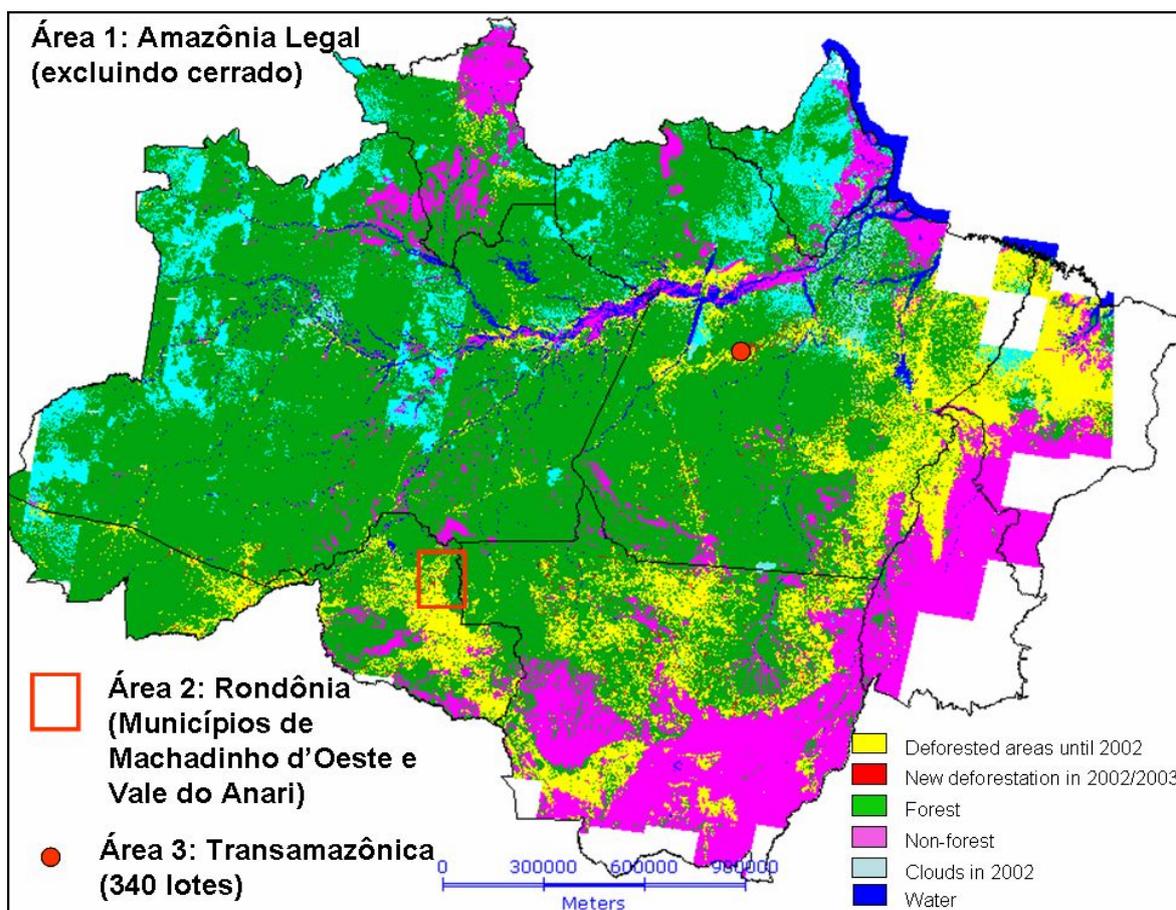


FIGURA 4.1 Área de estudo

4.2 Etapas do trabalho

4.2.1 Análise e especificação de modelos em TerraME

Nessa fase do trabalho, será feita uma análise de algumas aplicações de modelos de mudança e uso de cobertura da terra existentes, suas limitações e quais recursos do TerraME poderiam torná-los mais expressivos. Inicialmente, serão analisados 3 modelos desenvolvidos para escalas distintas como ilustra a Figura 4.2.

- **Escala macro: Amazônia.** Nesta escala pretende-se implementar em TerraME um modelo similar ao utilizado por Aguiar (2006). Neste trabalho, a autora apresentou uma adaptação do modelo CLUE para a Amazônia, visando explorar como fatores alternativos, políticas públicas e condições de mercado que influenciam o processo de ocupação na região. A análise estatística utilizará um banco de dados espacial (células de 100 x 100 km² e 25 x 25 km²) com 40 variáveis ambientais, demográficas, de estrutura agrária, tecnológicas, e indicadores de conectividade a mercados como variáveis independentes, e variáveis de uso e cobertura da terra (desflorestamento, pastagem, agricultura temporária e permanente) como variáveis dependentes. Projeções serão realizadas de 1997 a 2020.
- **Escala meso – CLUE-S em Rondônia.** Na meso escala, propõe-se desenvolver um modelo computacional em TerraME com base no estudo sendo realizado por Luciana Soler (Tese de Doutorado em andamento - Universidade de Wageningen/INPE) no nordeste de Rondônia, que utiliza o modelo computacional CLUE-S Verburg (2002), descrito na Seção 2.1.1.7. O objetivo do estudo é investigar e incorporar ao CLUE-S alguns dos mecanismos de retro-alimentação ("*feedbacks*") que ocorrem entre as atividades humanas e os processos de dinâmica do uso e cobertura da terra. A escala deste estudo será compatível com a estrutura fundiária da região (Soler *et al.*, 2005). A área de estudo corresponde aos municípios de Machadinho d'Oeste e Vale do Anari.
- **Escala micro – LUCITA no Pará/Transamazônica:** nesta escala, será analisada a implementação em TerraME dos conceitos explorados em uma simulação baseada em agentes para análise de mudanças de uso da terra na região de Altamira, no Estado do Pará, Brasil, com base no modelo computacional LUCITA, descrito na Seção 2.1.1.6. Esta região é caracterizada por pequenas propriedades de aproximadamente 100 ha.

Nesta simulação, os agentes individuais tomam decisões com base nas suas características próprias, e no contexto sócio-econômico e ambiental (Deadman *et al.*, 2002). Simulações cobrem o período de 1970 a 2000 e 344 propriedades individuais são modeladas.

Opcionalmente um modelo pra área urbana baseado em CA (DINAMICA) será analisado e implementado.

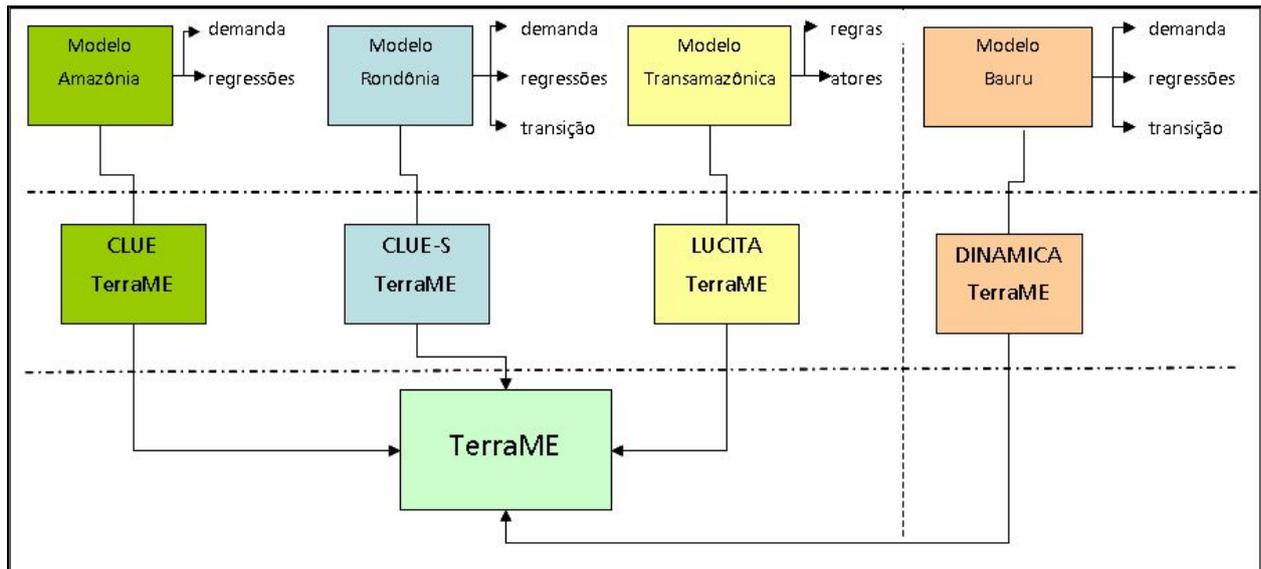


FIGURA 4.2 Visão esquemática da implementação dos modelos propostos em TerraME

Eventualmente, será analisada a possibilidade de acoplamento dinâmico dos modelos para escalas distintas, utilizando os recursos de aninhamento dos modelos em TerraME. Por exemplo, o CLUE trabalha em 3 escalas atualmente. Apenas para as áreas dos estudos localizados, uma quarta escala poderia ser acrescentada, acoplada a algumas células da análise regional, visando analisar o balanço entre os mecanismos *topdown* (influência regional e de contexto nos padrões locais) e *bottom-up* (influência das decisões locais nos padrões regionais). O sistema distribuiria a demanda para as escalas regionais, como na versão atual, e então esta taxa de mudança seria alocada mais detalhadamente na quarta escala, considerando os fatores locais empregados na análise estatística, e modelos de alocação apropriados.

4.2.2 Implementação de modelos em TerraME

Neste trabalho, nos propomos a implementar as estruturas de modelagem similares ao CLUE, CLUE-S e LUCITA, parametrizados para as aplicações acima, na Amazônia,

Rondônia e Transamazônica, respectivamente. Essas estruturas serão modificadas para torná-las mais expressivas, utilizando os recursos de TerraME, como resultado da análise do item 4.2.1.

Para implementar um modelo em TerraME, não existe uma seqüência de passos predefinida. Devem ser observadas as especificações do modelo e então buscar, dentre as estruturas computacionais disponíveis neste ambiente. Para modelar usando *nested-CA* algumas orientações podem ser observadas:

1. Identificar os processos que têm regras globais e comportamento global como agentes e modelá-los como um autômato global.
2. Identificar os processos cujos estados são regras dependentes de localização e modelá-los como autômato local.
3. Para cada autômato, definir o comportamento discreto que usa *jump condition* e os tipos diferentes tipos de comportamento contínuo usando condições de fluxo.
4. Para cada autômato, definir os métodos que serão usados para intercomunicação.
5. Criar um ou mais *nested-CAs*, cada um com sua resolução espaço-temporal e extensão, definindo um espaço celular (resolução espacial e extensão espacial) e um escalonador (*scheduler*) de evento.
6. Associar cada autômato a um *nested-CA*.
7. Inserir um *nested-CA* dentro de outro, se requer modelagem multiescalar.

4.2.3 Procedimentos para comparação dos modelos

Usando o mesmo conjunto de dados das aplicações apresentadas no item 4.2.1. Inicialmente pretende-se avaliar a utilização das métricas Pontius (2004) em cada uma das aplicações para comparar os resultados. A definição de quais métricas utilizar ficará em aberto, pois ainda não sabemos neste momento quais as métricas mais adequadas: se as que capturam a componente espacial do dado; identificam as fontes de erros em quantidade ou localização; comparam o modelo a um modelo

nulo; comparam o modelo a um modelo aleatório e/ou realizam análises em múltiplas escalas.

Outras formas de comparação serão também pesquisadas no decorrer do trabalho, que permitam avaliar os modelos que representam diferentes aspectos dos processos de mudança do uso da Terra na Amazônia não facilmente analisados através de métodos quantitativos.

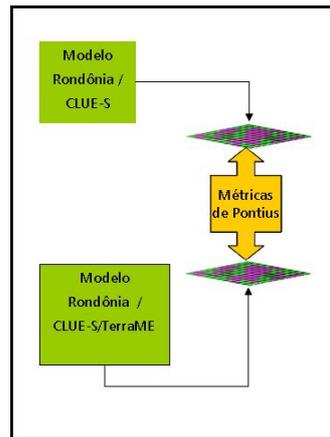


FIGURA 4.3 Um método de comparação

4.3 Síntese da metodologia (fluxograma)

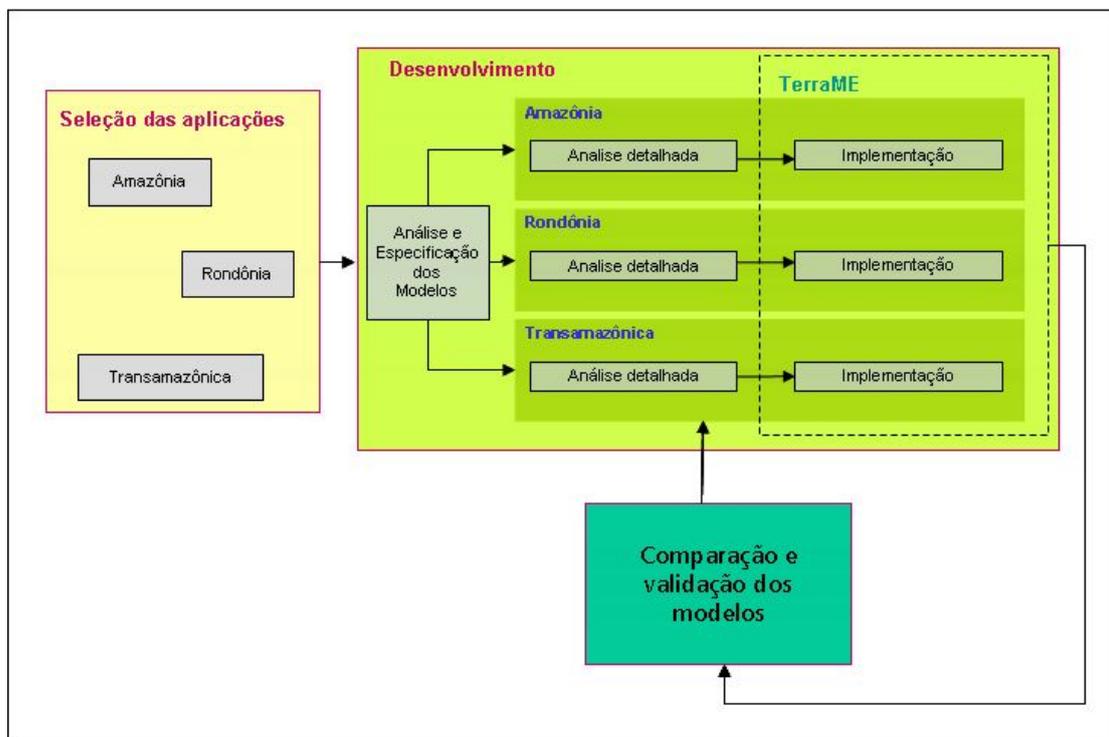


FIGURA 4.4 Fluxograma da metodologia de trabalho

CAPÍTULO 5

CRONOGRAMA

		Set 2006	Out- Dez 2006	Jan- Mar 2007	Abr- Jun 2007	Jul- Set 2007	Out- Dez 2007
Desenvolvimento de modelos no TerraME							
Análise e especificação dos modelos		X	X				
Implementação dos modelos	Amazônia		X				
	Rondônia			X			
	Transamazônica			X			
Comparação dos modelos							
Validação					X		
Documentação do trabalho							
Redação de artigos	Artigo sobre modelo macro Amazônia em TerraME. Proposta de submissão: A ser definido. Data prevista: Janeiro, 2007		X				
	Artigo sobre modelagem multi-agente em TerraME. Proposta de submissão: A ser definido. Data prevista: Abril, 2007			X			
	Opcional: modelagem meso-escala (Rondônia) em TerraME – incorporando feedbacks. Proposta de submissão: A ser definido. Data prevista: Junho, 2007				X		
Redação da Tese					X	X	X
Defesa da Tese							X

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos reforçam a tese que modelos LUCC deveriam tentar representar os múltiplos aspectos da interação entre o homem e o meio ambiente em diferentes escalas espaciais e temporais. O entendimento do conceito escala pode elucidar as causas e conseqüências de mudança ambiental, pois estes podem ser medidos ao longo de múltiplas escalas. A necessidade de adequar suporte computacional para expressar mais realisticamente os modelos LUCC é uma constatação.

Esta proposta de trabalho insere-se no contexto de modelos computacionais utilizados para criação de modelos LUCC e avança no sentido de uma análise comparativa de modelos gerados a partir de diferentes suportes computacionais no ambiente TerraME. Como conseqüência do desenvolvimento dos modelos propostos visa-se um melhor entendimento da ocupação da Amazônia Brasileira servindo de suporte para o planejamento de ações do governo nessa região. Além disso, explorar a fundamentação teórica do *nested-CA* para melhor empregar suas propriedades no desenvolvimento de modelos LUCC é um dos nossos objetivos.

Ao final deste trabalho, espera-se produzir um documento com conclusões acerca das vantagens e desvantagens do uso de determinados modelos computacionais a processos de modelos LUCC. Além disso, espera-se definir uma metodologia comparativa de modelos LUCC, o que será o grande desafio deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, A. P. D. D. **Modelagem de Mudança do Uso da Terra na Amazônia: Explorando a heterogeneidade intra-regional**. 173 p. (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

Almeida, C. **Modelagem Espacial Dinâmica como Ferramenta de Planejamento: Simulação de Mudanças de Uso do Solo em Bauru e Piracicaba (SP)**. 323 p. (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

Barbier, E. B.; Burgess, J. C. The economics of tropical deforestation. **Journal of Economic Surveys**, v. 15, n. 3, p. 413-433, 2001.

Briassoulis, H., 2000, **Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches**, Regional Research Institute, West Virginia University

Brown, K.; Pearce, D. **The causes of tropical deforestation, the economic and statistical analysis of factors giving rise to the loss of tropical forests**. London: University College London Press, 1994.

Câmara, G.; Souza, R.; Pedrosa, B.; Vinhas, L.; Monteiro, A. M.; Paiva, J.; Carvalho, M. T.; Gattass, M. TerraLib: Technology in Support of GIS Innovation. In: II Brazilian Symposium on Geoinformatics, GeoInfo2000, 2000, São Paulo.

Carneiro, T. Engenharia de *Software* aplicada à construção de modelos espaciais dinâmicos. 2003. Acesso em: ago/2006.

Carneiro, T. G.; Aguiar, A. P.; Escada, M. I.; Câmara, G.; Monteiro, A. M. A Modelling Environment for non-isotropic and non-homogeneous spatial dynamic models development. In: International Workshop on Integrated assessment of the land system: The future of land use, 2004, Amsterdam. Wageningen University,

Carneiro, T. G. d. S. **Nested-CA: A Foundation for Multiscale Modelling of Land Use and Land Cover Change**. 109 p. (Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

Clarke, K.; Gaydos, L. Loose Coupling A Cellular Automaton Model and GIS: Long-Term Growth Prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 7, p. 699-714, 1998.

Costanza, R. Model Goodness of Fit - a Multiple Resolution Procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, n. 3-4, p. 199-215, 1989.

Costanza, R.; Ruth, M. Using Dynamic Modeling to Scope Environmental Problems and Build Consensus. **Environmental Management**, v. 22, p. 183-195, 1998.

Couclelis, H. From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 24, p. 165-174, 1997. Conference Proceedings.

De Koning, G. H. J.; Verburg, P.; Veldkamp, A.; Fresco, L. O. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. **Agricultural Systems**, p. 77-93, 1999.

Deadman, P. J.; K. Lim, D. R.; E. Moran, E. B.; McCracken, S. **LUCITA: Multi-Agent Simulations of Land-Use Change near Altmira, Brazil**. In **Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change** LUCC Report Series, 2002. 59-63. p.

Eastman, J. R.; Solórzano, L. A.; Fossen, M. E. V. **Transition Potential Modeling for Land-Cover Change** GIS, Spatial Analysis, and Modeling. California: ESRI Press, 2005. 357-385 p.

Gibson, C.; Ostrom, E.; Ahn, T. K. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. **Ecological Economics**, v. 32, p. 217–239, 2000.

Gutman, G.; Janetos, A. C.; Justice, C. O.; Moran, E. F.; Mustard, J. F.; Rindfuss, R. R.; Skole, D.; Turner II, B. L.; Cochrane, M. A. **Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface** Remote Sensing and Digital Image Processing, 2004. 461 p.

Herold, M.; Couclelis, H.; Clarke, K. C. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 29, p. 369-399, 2005.

Ierusalimschy, R.; Figueiredo, L. H.; Celes, W. Lua-an extensible extension language. **Software: Practice & Experience**, v. 26, n. 6, p. 635-652, 1996.

Irwin, E.; Geoghegan, J. Irwin, E., Geoghegan, J. Theory, data, methods: developing spatially-explicit economic models of land use change. *Agric. Ecosyst. Environ.* 85, 7–24, 2001. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 7–24, 2001.

Kaimowitz, D., Angelsen, A. **Economic Models of Tropical Deforestation: A Review**. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR) 1998.

Kok, K.; Veldkamp, A. Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America. . **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 205–221, 2001.

Lambin, E. Modeling and Monitoring land-cover change processes in tropical regions. **Progress in Physical Geography**, v. 21, n. 3, p. 375-393, 1997.

Lambin, E.; Rounsevell, M. D. A.; Geist, H. J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 82, p. 321–331, 2000.

Lambin, E. F.; Geist, H. J. "Global land-use and cover change: What have we learned so far?" **Global Change Newsletter**, v. 46, 2001a.

Lambin, E. F.; Turner, B. L. I.; Geist, H. J.; Agbola, S. B.; Angelsen, A.; Bruce, J. W.; Coomes, O.; Dirzo, R.; Fischer, G.; Folke, C.; George, P. S.; Homewood, K.; Imbernon, J.; Leemans, R.; Li, X.; Moran, E. F.; Mortimore, M.; Ramakrishnan, P. S.; Richards J.F.; Skânes, H.; Steffen, W.; Stone, G. D.; Svedin, U.; Veldkamp, T. A.; Vogel, C.; Xu, J. The Causes of Land-Use and Land-Cover Change. Moving Beyond the Myths. **Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions**, v. 4, 2001b.

Parker, D.; Berger, T.; Manson, S.; McConnel, S. **Agent-Based Models of Land-Use /Land-Cover Change. Report and Review of an International Workshop**. Irvine, California, USA: LUCC Project, 2002. (LUCC Report Series no 6).

Parker, D. C.; Berger, T.; Manson, S.; McConnel, S. Report and Review of the International Workshop. In: **Agent-Based Models of Land-Use /Land-Cover Change.**, 2001, Irvine, California, USA. 2002.

Pedrosa, B.; Câmara, G. Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento. In: Meirelles, M.; Câmara, G. (Ed.). **Geomática: Fundamentos e Aplicações**. Brasília: EMBRAPA, 2002.

Pontius, G. R. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n. 8, p. 1011-1016, 2000.

Pontius, R. G. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 10, p. 1041-1049, 2002.

Pontius, R. G.; Huffaker, D.; Denman, K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. **Ecological Modelling**, v. 179, n. 4, p. 445-461, 2004.

Rykiel Jr, E. J. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling**, v. 90, p. 229-244, 1996.

Soares-Filho, B.; Cerqueira, G.; Pennachin, C. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217 – 235, 2002.

Soler, L. d. S.; Verburg, P.; Escada, M. I. S.; A., V.; Câmara, G. **Local resilience of the human-environmental system in the Brazilian Amazon under conditions of global climate change and large-scale deforestation**. São José dos Campos: INPE, 2005. 24 p.

Stephene, N.; Lambin, E. L. A dynamic simulation model of land-use changes in the Sudano-Sahelian countries of Africa. **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 85, p. 145–161, 2001.

Torrens, P. **SprawlSim: Modeling Sprawling Urban Growth Using Automata-Based Models**. California: University of California at Santa Barbara, 2002. 140 p. (6). Disponível em: <http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC>.

Torrens, P. M.; O'Sullivan, D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 28, p. 163-168, 2001.

Turner, M. G. Spatial simulation landscape changes in Georgia: A comparison of 3 transition models. **Landscape Ecology**, v. 1, n. 1, p. 29-36, 1987.

Veldkamp, A.; Fresco, L. CLUE: A Conceptual Model to Study the Conversion of Land Use and its Effects. **Ecological Modeling**, v. 85, p. 253-270, 1996.

Veldkamp, A.; Lambin, E. Predicting land-use change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 1-6, 2001a.

Veldkamp, A.; Verburg, P.; Kok, K.; De Koning, G.; Priess, J.; Bergsma, A. The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling **Environmental Modeling and Assessment**, v. 6, p. 111-121, 2001b.

Verburg, P.; De Koning, G.; Kok, K.; Veldkamp, A.; Bouma, J. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. **Ecological Modelling**, v. 116, p. 45-61, 1999.

Verburg, P.; Soepboer, W.; Veldkamp, A.; Limpiada, R.; Espaldon, V. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. **Environment Management**, v. 30, n. 3, p. 391-405, 2002.

Verburg, P.; Veldkamp, A. The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 177-190, 2001.

Verburg, P. H.; Schot, P. P.; Dijst, M. J.; Veldkamp, A. Land use change modelling: current practice and research priorities. **GeoJournal**, v. 61, n. 4, p. 309-324, 2004. Disponível em: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s10708-004-4946-y>

White, R.; Engelen, G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 24, p. 235-246, 1997.