

5 Uma Aplicação em Mudança na Cobertura do Solo

Neste capítulo, apresentaremos uma visão geral da TerraML através de um exemplo de um processo de mudança no uso e cobertura do solo relativo à evolução do desmatamento na Amazônia.

5.1 Apresentação do Problema

O processo de desflorestamento e colonização da Amazônia Brasileira (Figura 5.1 a) tem sido associado às mudanças climáticas globais, à alteração dos ciclos biogeoquímicos, à dinâmica de uso e cobertura da terra e à diminuição da biodiversidade. Esta diversidade de fatores produz padrões heterogêneos de ocupação, o que torna complexa a modelagem de uma área extensa da floresta. Por esta razão, neste exemplo estaremos nos restringindo à uma pequena área do estado de Rondônia (Figura 5.1 b).

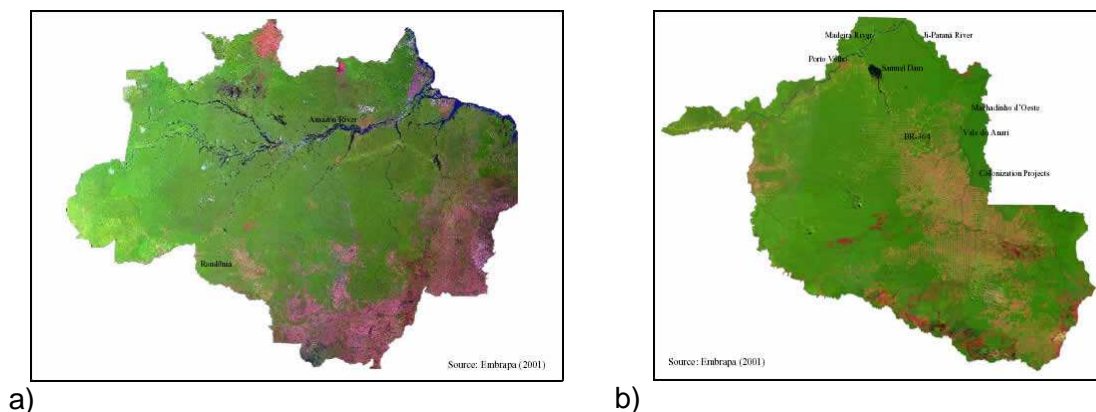


Figura 5.1 A Amazônia (a) e o Estado de Rondônia (b)

Em Rondônia cerca de 90% do desflorestamento tem-se concentrado nos limites de 100 km da malha rodoviária principal, ao redor dos eixos e pólos de desenvolvimento dos anos 70 e 80 (Alves 2002). Assim, as áreas mais desmatadas ocorrem ao redor das estradas principais e secundárias provocando o fenômeno conhecido como “espinha-de-peixe”, que pode ser observado na figura 5.2. Nesta figura, as áreas em verde correspondem a floresta e as áreas em rosa correspondem a desmatamento. As estradas são representadas por linhas vermelhas. Note que as áreas desmatadas se desenvolvem em sentido ortogonal à estrada principal.



Figura 5.2 Espinha-de-peixe

Nesta aplicação consideraremos a área em destaque na Figura 5.3 b, que corresponde à uma área de 496.125 km, mapeados em 2.450 células, distribuídas em 70 colunas por 35 linhas. Cada célula representa uma área de 450m x 450m.

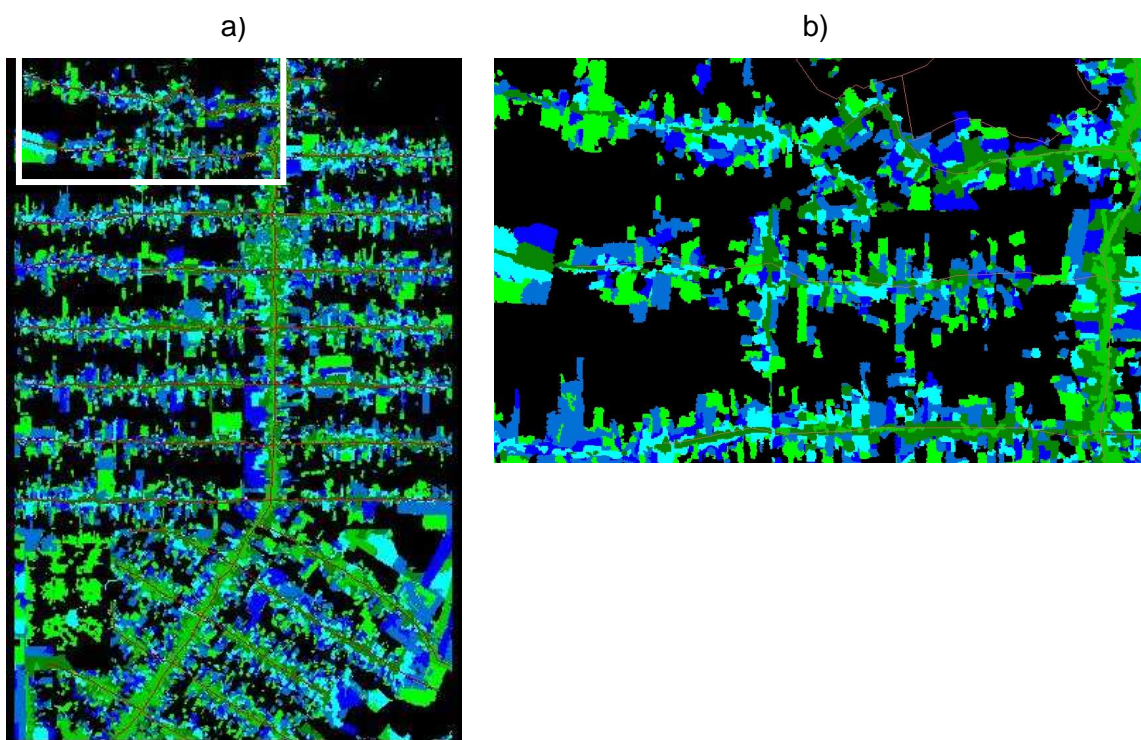


Figura 5.3 a) Detalhe da espinha-de-peixe b) zoom da área deste trabalho

Neste exemplo, dois tipos de cobertura do solo são possíveis :

- Floresta (preto)
- Desmatado (colorido, cada cor representa o desmatamento em um ano)

5.2 Metodologia

Na Figura 5.4, estão representadas as várias etapas seguidas desde a concepção do modelo até a sua execução. Algumas dessas etapas são repetidas ao longo das simulações e podem gerar dados que servem para realimentar o sistema.

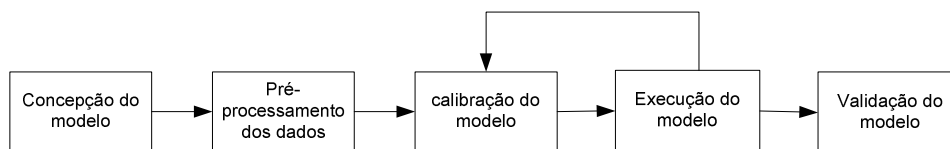


Figura 5.4 – Metodologia para simular mudanças em Rondônia

Na **concepção do modelo**, são definidas as equações que determinam o comportamento do modelo. Nesta aplicação, o estado de uma célula pode mudar em função da seguinte combinação de fatores uma demanda global fornecida, propriedades da célula (acessibilidade), e a influência de sua vizinhança (atratividade). Em seguida, ocorre o **pré-processamento dos dados**, dados são recuperados e convertidos para um formato adequado para o processamento do modelo.

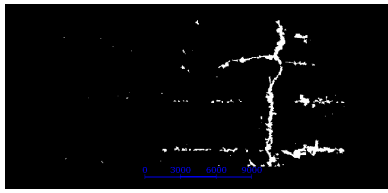
Durante a **calibração do modelo** são calculadas as variáveis utilizadas como parâmetros para a realização de ajustes. Essas variáveis expressam a demanda por ou restrições a determinadas mudanças. O Potencial de uma célula para mudança é um atributo dinâmico, i.e., que muda ao longo das várias simulações, por isto, tem que ser recalculado a cada iteração. Além disto, a demanda tem que ser atualizada sempre que ocorrem transições. A etapa **execução do modelo** consiste no processamento dos dados em si.

A **validação do modelo** é uma etapa complementar, consiste na comparação dos resultados gerados com dados reais.

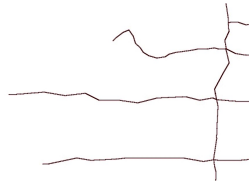
5.3 Entradas

Para este modelo foram utilizadas as seguintes informações como entradas do sistema:

- Imagem do uso do solo em 1985 (Figura 5.5 a)
- Mapa da rede de transporte 1985 e 1988 (rodovias principais e secundárias) (Figura 5.5 b)
- Mapa das unidades de conservação em 1985 (Figura 5.5 c)
- Vizinhança (matriz generalizada de vizinhança)



a) Cobertura do solo 1985



B) Estradas



c) Unidades de Conservação

Figura 5.5 – Os atributos das células

A imagem do uso do solo é utilizada para gerar as células e, juntamente com as demais entradas, preencher os atributos das células (Figura 5.6).

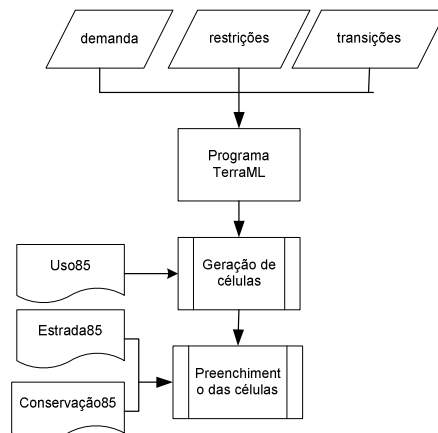


Figura 5.6 – Entradas do sistema

A vizinhança da célula em TerraML é definida a partir de uma matriz de proximidade, como discutido no capítulo 4. Desta forma, é possível capturar o fenômeno espinha-de-peixe pois pode-se definir como vizinhos de uma célula outras células ligadas à rede de transporte. Na Figura 5.7 é apresentado um esquema simplificado das vizinhanças de uma célula deste exemplo. Zonas de distâncias, representadas em cores diferentes, mostram os diferentes pesos de influência de cada célula vizinha.

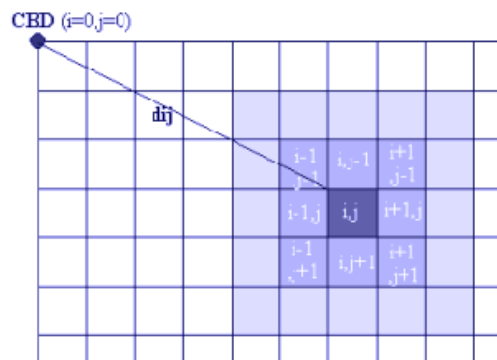


Figura 5.7 – Matriz de proximidade baseada em distância

5.4 MODELO

Nesta aplicação do TerraML definimos um modelo matemático baseado no modelo multi-escala desenvolvido pelo RIKS e apresentado no capítulo 2, seção 2.2.2. Neste modelo, o potencial de uma célula para o desflorestamento é calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Potencial} = \text{Acessibilidade} \cdot \text{Atratividade}$$

A acessibilidade de uma célula é uma medida da proximidade de uma célula em relação a uma rede de transporte e é expressa pela função *fuzzy*:

$$\text{Acessibilidade} = \frac{1}{(1 + \alpha(d - \beta)^2)} \quad \text{para } 0 \leq d \leq P$$

onde:

- d é a distância euclidiana da célula à rodovia mais próxima
- α é um parâmetro que governa a forma da função (senoidal, nesta aplicação)
- β é um parâmetro que indica o valor do ponto central da *Acessibilidade*

A atratividade de uma célula para o desmatamento é calculada por:

$$\text{Atratividade} = \sum_k \text{peso} * \text{uso} \quad 0 \leq \text{Atratividade} \leq 1$$

onde:

- peso = parâmetro de peso aplicado a célula vizinha não desmatada
- k = número de vizinhos da célula
- uso = 1, se a célula vizinha está desmatada; 0, caso contrário.

5.5 Restrições

As restrições entram no modelo como um instrumento de controle. Nesta aplicação temos como restrição a demanda pelo desmatamento. Deixado a si mesmo, o sistema poderia expandir o desmatamento a níveis exagerados, o que não corresponderia à realidade. A demanda por células desmatadas é um valor pré-determinado, uma entrada que deve ser informada no documento TerraML. Esta informação é útil para controlar o número de transições por passos. A variável dinâmica atratividade é um

mecanismo auxiliar de controle, pois serve de parâmetro para selecionar as células a serem alteradas. Neste exemplo foi utilizada uma imagem obtida no ano 2000 para determinar a demanda.

5.6 Especificação em TerraML

A Figura 5.8 apresenta o código TerraML para esta simulação. A explicação detalhada de cada uma das seções deste código é apresentada nas próximas seções.

```
<cellprocessor author="bianca" date="11/06/03" model="LUCC Rondonia" >

  <input>
    <database host="localhost" path="c:/tese_dados/"
      name="rondonia.mdb" user="" pass="" />
    <layer name="celulas450" layerid="46" />
    <table name="celulas450_dinamica" columns="35" lines="70" />
    <neighborhood name="c:/tese_dados/vizinho1.txt" zones="1" />
    <global name="demanda_total" value="700" />
    <global name="demanda" value="0" />
  </input>

  <control initime="1985" intervals="16" step="1" timeUnit="year">

    <mode name="global">
      <product attribute="demanda">
        <pair attribute="demanda" weight="0.0625" />
      </product>
    </mode>

    <mode name="local">
      <fuzzyL attribute="acessibilidade1" column="distancia_rod_princ"
        alpha="0.001" beta="500" />
      <fuzzyL attribute="acessibilidade2" column="distancia_rod_secund"
        alpha="0.001" beta="500" />
      <localMean attribute="atratividade" column="cobertura_solo" />
      <product attribute="potential">
        <pair attribute="acessibilidade1" weight="0.4" />
        <pair attribute="acessibilidade2" weight="0.4" />
        <pair attribute="atratividade" weight="0.2" />
      </product>
      <expander attribute="cobertura_solo" column="potencial" demand="demanda" />
    </mode>

    <transition from="global" to="local">
      <condition attribute="demanda" op="GT" value="0" />
    </transition>

  </control>
</cellprocessor>
```

Figura 5.8 – Um exemplo em TerraML para mudança no uso e cobertura do solo

5.6.1 Especificação dos dados de entrada

Na seção *input* estão relacionados os principais dados a serem recuperados do banco de dados e o arquivo de vizinhança. Neste exemplo, o banco de dados onde estão armazenadas as células é o arquivo `rondonia.mdb`, um banco Access.

Neste banco a tabela `celulas450` é o layer a partir do qual pode ser obtida a geometria das células (Tabela 5.1), e a tabela `celulas450_dinamica` é a tabela a partir da qual podem ser obtidos os atributos das células, tais como cobertura do solo (`cobertura_solo`), distância da célula à rodovia principal (`distancia_principal`), entre outros (Tabela 5.2). O arquivo de vizinhanças é um arquivo texto (Tabela 5.3), gerado por outro programa, que será utilizado para gerar a matriz de proximidade, cuja estrutura foi apresentada no capítulo 4. No caso desta aplicação, em particular, foi desenvolvido um programa em linguagem C++, utilizando as estruturas de dados de matriz de proximidade disponíveis no TerraLib. Entretanto, qualquer outro programa pode ser utilizado desde que gere um arquivo texto com o conteúdo especificado no dicionário de dados apresentado na tabela 5.4. A demanda global e inicial são variáveis globais, isto é, valores absolutos para o autômato como um todo.

Tabela 5.1 Layer Células450 do banco Rondônia.mdb

geom_id	object_id	lower_x	lower_y	upper_x	upper_y
1	C0000L0000	567675	8923725	568125	8924175
2	C0001L0000	568125	8923725	568575	8924175
3	C0002L0000	568575	8923725	569025	8924175
4	C0003L0000	569025	8923725	569475	8924175
5	C0004L0000	569475	8923725	569925	8924175
6	C0005L0000	569925	8923725	570375	8924175
7	C0006L0000	570375	8923725	570825	8924175
8	C0007L0000	570825	8923725	571275	8924175
9	C0008L0000	571275	8923725	571725	8924175
10	C0009L0000	571725	8923725	572175	8924175

Tabela 5.2 Atributos das células do banco Rondônia.mdb

object_id	initial_time	final_time	cobertura_solo	Unidade_conse	distancia_rod_p	distancia_rod_s
C0000L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	23414.688092	11021.05715
C0001L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	22964.693753	10691.58510
C0002L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	22514.699639	10371.17559
C0003L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	22064.705766	10060.6945
C0004L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	21614.712147	9761.08936
C0005L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	21164.7188	9473.39204
C0006L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	20714.725743	9198.71991
C0007L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	20264.732993	8938.27383
C0008L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	19814.740573	8693.33252
C0009L0000	1985-01-01	1985-12-31	0	0	19364.748453	8448.40121

Tabela 5.3 Arquivo de vizinhança

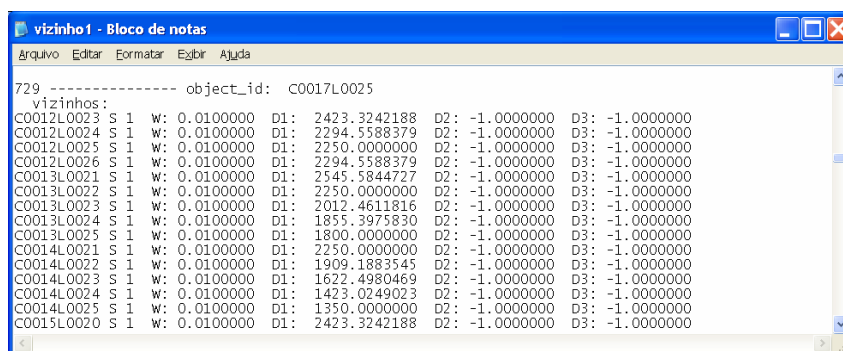


Tabela 5.4 Dicionário de dados dos arquivos do banco de dados rondonia.mdb

Tabela: Células450Teste3Células 46		
Atributo	Descrição	Tipo / Domínio
geom_id_	Identificador da geometria do objeto	Número inteiro
object_id	Identificador do objeto	String
lower_x	Coordenada x do canto inferior esquerdo	Número inteiro
lower_y	Coordenada y do canto inferior esquerdo	Número inteiro
upper_x	Coordenada x do canto superior direito	Número inteiro
upper_y	Coordenada y do canto superior direito	Número inteiro
col_number	Identificação da coluna da célula	Número inteiro
row_number	Identificação da linha da célula	Número inteiro
Tabela: Células450Dinâmica		
Atributo	Descrição	Tipo / Domínio
attr_id	Identificador do atributo	
object_id	Identificador do objeto	String
initial_time	Tempo inicial	Data
final_time	Tempo final	Data
cobertura_solo	Cobertura do solo	Número inteiro / 0 ou 1
unidade_ conservação	Unidade de conservação	Número inteiro / 0 ou 1
distancia_ rod_princip	Distância da célula à rodovia principal	Número real
distancia_ rod_secund	Distância da célula à rodovia secundária	Número real
Arquivo: Vizinho1.txt		
Atributo	Descrição	Tipo / Domínio
object_id	Identificador do objeto	string
s	Zona de distância	Número inteiro
w	Peso	Número real
d1	Distância entre as duas células vizinhas	Número real
d2	Distância das células vizinhas à rede de transporte (matriz de proximidade gerada pela rede de transporte)	Número real
d3	Distância das células vizinhas através da rede de transporte (matriz de proximidade gerada pela rede de transporte)	Número real

5.6.2 Definição dos modos de controle

No início da seção CONTROL são especificados os parâmetros temporais desta simulação. Neste exemplo, serão feitas 10 simulações a partir de “1985”, ano a ano (step).

Neste sistema existem dois modos de controle. O modo LOCAL e GLOBAL. No modo LOCAL estão especificadas as condições de fluxo, que têm que ser executadas para cada célula, em cada passo (step) da simulação. No modo global estão as equações que calibram o modelo, atualizam a demanda global e determinam a demanda para o próximo passo.

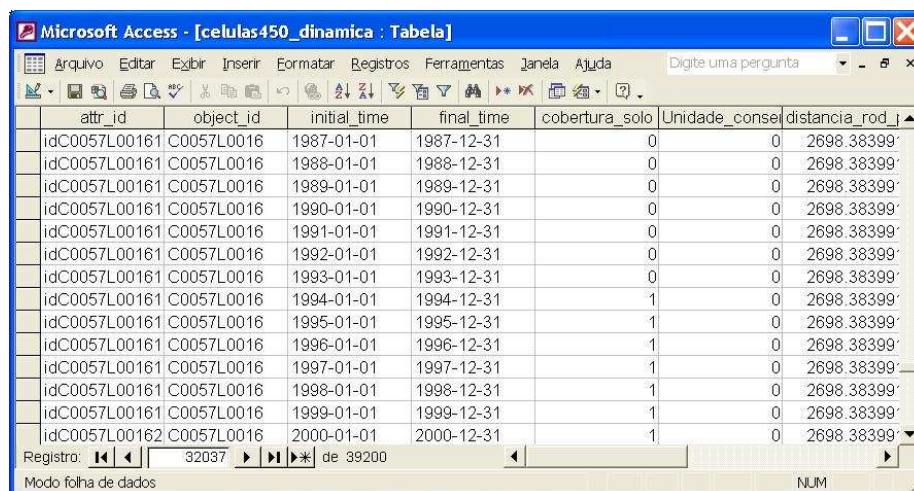
Neste exemplo o sistema transita do modo GLOBAL para o modo LOCAL enquanto houver demanda.

Os resultados gerados são gravados no mesmo banco rondonia.mdb. É gerada uma tabela para cada ano da simulação.

5.6.3 Resultados

Os resultados das simulações são armazenados na tabela de atributos dinâmicos das células. Por se tratar de um banco de dados temporal, para cada resultado gerado, é registrado o intervalo de tempo (initial_time e final_time). A Tabela 5.5 ilustra o caso da célula C0057L0016 (object_id). No período de 1986 a 1993 a célula não sofreu alteração no atributo cobertura_solo (0 = floresta). Em 1994, a célula tem seu valor de cobertura_solo alterado para 1 (desmatado) e permanece com este valor até o fim das simulações.

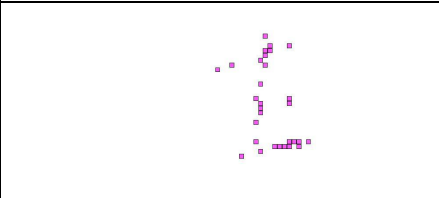
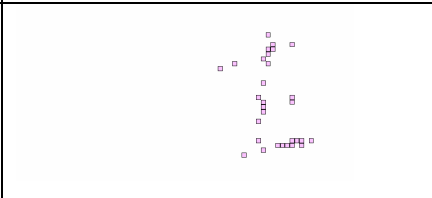
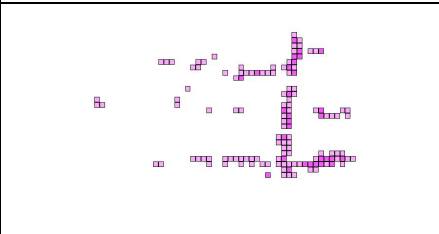
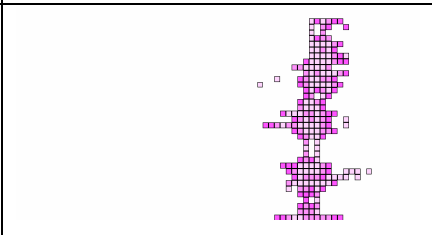
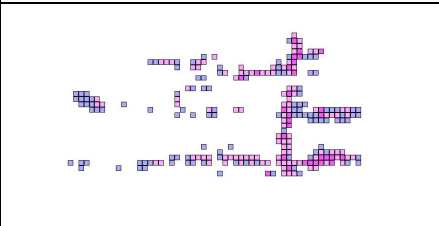
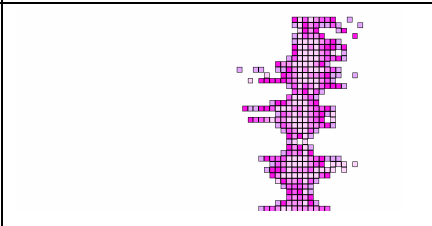
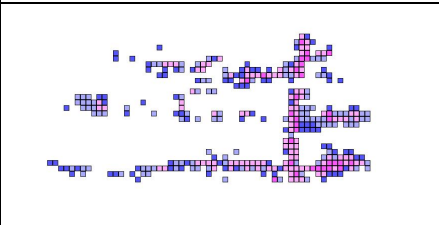
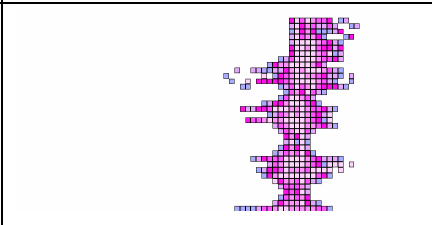
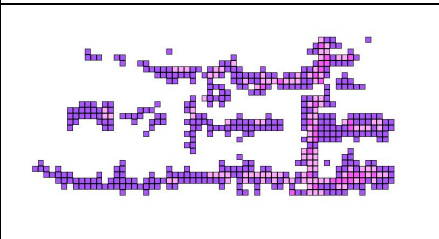
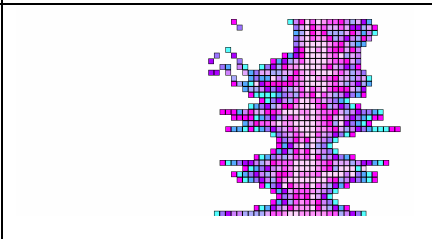
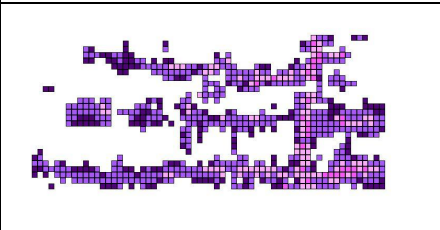
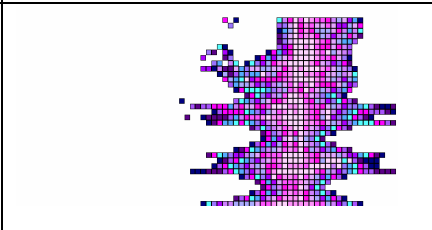
Tabela 5.5 Resultado da simulação para uma célula



attr_id	object_id	initial_time	final_time	cobertura_solo	Unidade_consel	distancia_rod_j
idC0057L00161	C0057L0016	1987-01-01	1987-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1988-01-01	1988-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1989-01-01	1989-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1990-01-01	1990-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1991-01-01	1991-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1992-01-01	1992-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1993-01-01	1993-12-31	0	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1994-01-01	1994-12-31	1	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1995-01-01	1995-12-31	1	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1996-01-01	1996-12-31	1	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1997-01-01	1997-12-31	1	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1998-01-01	1998-12-31	1	0	2698.38399
idC0057L00161	C0057L0016	1999-01-01	1999-12-31	1	0	2698.38399
idC0057L00162	C0057L0016	2000-01-01	2000-12-31	1	0	2698.38399

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados da simulação em TerraML (Figura 5.8). Estes resultados foram visualizados através do TerraView, uma ferramenta de visualização geográfica desenvolvida a partir da biblioteca TerraLib (TerraLib 2003).

Tabela 5.6 Comparação entre os resultados da simulação e o real

Ano	Real	Simulação
1985		
1988		
1991		
1994		
1997		
2000		

Através da comparação dos resultados pode-se concluir que o processador TerraML valoriza mais o efeito da vizinhança, do que a acessibilidade (proximidade de rodovias). Na Figura 5.8 pode-se verificar que, para esta simulação, foi atribuído o

peso de 0.4 para `acessibilidade1`, e 0.4 para `acessibilidade2`, totalizando 0.8 para `acessibilidade` de uma forma geral, contra 0.2 para `atratividade`, que incorpora o efeito dos vizinhos. Um dos motivos para as diferenças entre os resultados simulados e a evolução real do desmatamento é o fato da vizinhança das células, para esta aplicação, ter sido construída com base na distância entre as células. O mais adequado, neste caso, seria construir a vizinhança das células com base na rede de transporte. Outro motivo para as diferenças, entre o real e o simulado, está na simplicidade das equações introduzidas nesta aplicação. Um aperfeiçoamento necessário é a definição de novas equações que capturem de forma mais realista a evolução do desmatamento.

Em suma, os resultados dos experimentos realizados com TerraML não são conclusivos, mas são indicativos da capacidade do ambiente computacional. O ambiente trabalha com uma lógica simplificada, que pode ser refinada com a ampliação, em trabalhos futuros, do número de funções disponíveis.

6. Conclusões

6.1 Resultados Alcançados

TerraML foi desenvolvida com o objetivo de diminuir algumas das limitações existentes nos ambientes computacionais para modelagem dinâmica. Algumas destas limitações referem-se à estacionariedade das vizinhanças e à discretização do modelo de mudanças num espaço de estados finito, em função do paradigma de autômato celular clássico. Nestes dois aspectos, TerraML conseguiu avanços.

A primeira contribuição de TerraML é suportar qualquer vizinhança que possa ser representada por uma matriz de proximidade. Numa matriz de proximidade, uma célula pode ter qualquer número de vizinhos. E estes vizinhos podem variar não só em número, mas também em direção, ou seja, podem variar também na sua configuração espacial, isto é, podem apresentar formas diferentes de célula para célula. De uma forma geral, aplicações de geoprocessamento baseadas em autômatos celulares definem vizinhanças de configuração fixas, dos tipos Moore ou Von Neumann, com algumas variações no número de zonas de distâncias.

A segunda contribuição está em suportar um modelo de mudanças híbrido, com elementos contínuos e discretos, num espaço de estados infinito. TerraML utiliza os conceitos de autômatos celulares híbridos para representar o espaço e as transições de estado que nele ocorrem. Uma das vantagens desta abordagem de implementação está na flexibilidade para combinar elementos discretos e contínuos de forma integrada. Outra vantagem é a facilidade de implementação computacional, uma vez que existe uma relação direta entre os elementos do autômato híbrido, como as condições de fluxo e de mudança, e as estruturas de controle de repetição (*loops*) e comandos de seleção (*ifs*), existentes em qualquer ambiente de desenvolvimento de software.

Por fim, o fato de TerraML fazer parte da TerraLib traz, pelo menos, dois benefícios imediatos. O primeiro deles é o fato de contar com o respaldo de uma equipe de desenvolvimento com mais de 20 anos de experiência no desenvolvimento de aplicações geográficas. A segunda, é que um software com o “padrão de qualidade” TerraLib tem que atender requisitos rigorosos de eficiência e interoperabilidade devido ao ambiente colaborativo da biblioteca. Algumas das aplicações TerraLib são: conversor de formatos, analisador de dados em saúde pública, gerenciamento municipal (TerraCrime, TerraEmTransito) e modelagem dinâmica (TerraML).

6.2 Futuros Trabalhos

Uma tendência em sistemas sofisticados de computação é o uso de agentes. Agentes são componentes de software que podem ser dotados de conhecimentos e se adaptar a diferentes ambientes. O uso de agentes é uma das possibilidades de aperfeiçoamento do TerraML. Para isto, devem ser investigadas as arquiteturas de agentes, plataformas e "ferramentas" computacionais para a implementação de Sistemas Multi-Agentes, definir de estratégias de interação e negociação para a cooperação e a resolução de conflitos, manutenção de coerência em ambientes abertos e domínios de aplicação.

Uma questão crucial para sistemas de modelagem dinâmica é o modelo matemático em si. Em geral, os modelos são representações simplificadas da realidade, construídas muito mais sob as restrições do domínio da solução, do que sob as características das variáveis e leis que governam o comportamento do fenômeno que o modelo descreve. A evolução da computação tem propiciado o surgimento de tecnologias que permitem introduzir aperfeiçoamentos nas formas de tratar e embutir modelos em software. Um trabalho de investigação ou até mesmo a proposta de um "novo" modelo para mudança de uso do solo impulsionaria o desenvolvimento de novas funcionalidades e estruturas de dados e processos para o ambiente TerraML. Um outro aperfeiçoamento, não para o ambiente TerraML em particular, mas para sistemas de "vida artificial" em geral, é a exploração de técnicas e arquiteturas de processamento paralelo. O modelo celular é o ambiente ideal para que o paralelismo seja implementado, uma vez que células guardam poucas informações, estão altamente conectadas e realizam tarefas muito simples. Entretanto, as células são sempre em grande número, o que degrada o desempenho destes sistemas. Neste aspecto, o processamento paralelo pode ser a solução para tornar estes sistemas mais eficientes. Como no caso dos agentes, mencionado anteriormente, técnicas e arquiteturas de computação paralela devem ser estudadas para se verificar qual a solução ideal para um sistema de modelagem dinâmica.

7. Referências Bibliográficas

- Alves, D. S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazônia. International Journal of Remote Sensing 23: p. 2903-2908. 2002.
- Batty, M. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. Computers, Environment and Urban Systems 23: p. 205-233. 1999.
- Batty, M. GeoComputation Using Cellular Automata. GeoComputation. S. Openshaw and R. J. Abraham, Taylor&Francis: p. 95-126. 2000.
- Booch, G., I. Jacobson, et al. The Unified Modeling Language User Guide, Addison Wesley. 1998.
- Burrough, P. Dynamic Modelling And Geocomputation. Geocomputation: A Primer. P. Longley, M. Batty and R. McDonnel. London, John Wiley & Sons.1998.
- Burrough, P., McDonnel Principles of Geographical Information Systems. Oxford, Oxford University Press.1998.
- Câmara, A. S. Spatial Simulation Modelling. Spatial Analytical Perspectives on GIS. M. Fisher. London, Taylor & Francis: 213-218.1996.
- Câmara, G., Souza, R. C. M. et al. TerraLib: Technology in Support of GIS Inovation. Geoinfo 2000 - II Workshop Brasileiro de Geoinformação, São Paulo. 2000.
- Cerri, S., Fraternali, P. Designing Database Applications with Objects and Rules. The IDEA Methodology. Harlow, England, Addison Wesley Longman.1997.
- Couclelis, H. From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. Environment and Planning B: Planning and Design 24: 165-174.1997.
- Couclelis, H. Space, Time, Geography. Geographical Information Systems. P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire and D. Rhind. New York, John Wiley: 29-38.1999.
- Edelweiss, N., Oliveira, J. P. M. Modelagem de Aspectos Temporais de Sistemas de Informação. Recife, UFPE-DI.1994.
- Elmasri, R., Navathe, S. B. Fundamentals of Database Systems. USA, Addison Wesley. 2000.
- Engelen, G., White, R. et al. Exploratory Modelling of Socio-Economic Impacts of Climatic Change. Climate Change in the Intra-Americas Sea. M. G. A. (ed.). London: pp.306-324.1993.
- Engelen, G. Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems." Environmental Monitoring and Assessment 34: 203-214. 1995.
- Engelen, G., Uljee, I. et al. Vulnerability Assessment of Low-lying Coastal Areas and Small Islands to Climate Change and Sea Level Rise. Maastricht, The Netherlands, Report to UNEP - CAR/RCU, RIKS Publication 905000/9379. 1997.
- GNU. The GNU Project and the Free Software Foundation (FSF). www.gnu.org. 2003.
- Henzinger, T. A. The Theory of Hybrid Automata. Proceedings of the 11th Symposium on Logic in Computer Science (LICS'96).1996.
- Hornsby, K., Egenhofer, M. J. Qualitative Representation of Change. Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS, Proceedings of the International Conference COSIT '97, Berlim, Lecture Notes in Computer Science (Springer-Verlag). 1997.

- Lambin, E. F. Modeling Deforestation Processes - A Review, Trees series B: Research Report . European Commission, Luxembourg. 1994.
- Openshaw, S. GeoComputation. GeoComputation. S. O. a. R. J. Abrahart. London, Taylor & Francis: 413. 2000.
- O'Sullivan, D. Toward micro-scale spatial modeling of gentrification. Journal of Geographical Systems 4(3): 251-74. 2002.
- Parent, C., S. Spaccapietra, et al. (1999). Spatio-Temporal Conceptual Models: Data Structures + Space + Time. ACM GIS'99, Kansas City, MO USA.
- Peuquet, D. (2001). "Making Space for Time: Issues in Space-Time Data Representation." Geoinformatica 5(1): 11-32.
- Reis, E. J. and S. Margulis (1991). Options for Slowing Amazon Jungle Clearing. Global warming: economic policy responses. R. Dornbusch and J. M. Poterba. Cambridge, The MIT Press: 335-375.
- RIKS (2001). Research Institute for Knowledge Systems. Faculty of Spatial Science, University of Utrecht. www.riks.nl - maio 2001.
- Roy, G. G. and F. Snickars (1996). Citylife: A study of cellular automata in urban dynamics. Spatial Analytical Perspectives on GIS. M. Fisher. London, Taylor & Francis: 213-218.
- Sipper, M. The emergence of Cellular Computing. IEEE Computer 32(7): 18-26.1999.
- Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C. et al. DINAMICA: A New Model to Simulate and Study Landscape Dynamics. Ecological Modelling (in press). 2002.
- Santos, M. A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção. São Paulo, HUCITEC.1996.
- TerraLib TerraLib. <http://terralib.dpi.inpe.br>. 2003
- Soares Filho, B. S. Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. Tese de doutorado. Escola Politécnica. São Paulo, Universidade de São Paulo. 1998.
- Van Deursen, W. P. A. Geographical Information Systems and Dynamic Models. Faculty of Spatial Sciences. Rotterdam, The Netherlands, University of Utrecht: 126. 1995.
- Van Gorp, J., Bosch, J. On the Implementation of Finite State Machines. 3rd Annual IASTED International Conference Software Engineering and Applications, Scottsdale, Arizona, USA. 1999.
- W3C World Wide Web Consortium, www.w3.com. 2003.
- White, R., Engelen, G. Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modelling. Environment and Planning B: Planning and Design 24: 165-174.1997.
- Worboys, M. F. GIS - A Computing Perspective. Bristol, PA, Taylor & Francis Inc.1995.
- Zipf, A., Krüger, S. TGML - Extending GML by Temporal Constructs - A proposal for a SpatioTemporal Framework in XML. Proceedings of the ACM GIS 2001. The Ninth ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, Atlanta, USA. 2001.