Ministério da
Ciência, Tecnologia e Inovação

sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.12.21.47-TDI

RELAÇÃO ENTRE AGENTES E O ESPAÇO EM MODELOS DE MUDANÇA DE USO DA TERRA

Talita Oliveira Assis

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Ana Paula Dutra Aguiar, e Gilberto Câmara Neto, aprovada em 13 de abril de 2012.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C4JNKE>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Ministério da
Ciência, Tecnologia e Inovação

sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.12.21.47-TDI

RELAÇÃO ENTRE AGENTES E O ESPAÇO EM MODELOS DE MUDANÇA DE USO DA TERRA

Talita Oliveira Assis

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Ana Paula Dutra Aguiar, e Gilberto Câmara Neto, aprovada em 13 de abril de 2012.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C4JNKE>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Assis, Talita Oliveira.
As76r Relação entre agentes e o espaço em modelos de mudança de uso da terra / Talita Oliveira Assis. – São José dos Campos : INPE, 2012.
xviii + 69 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.12.21.47-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
Orientadores : Drs. Ana Paula Dutra Aguiar, e Gilberto Câmara Neto.

1. relações entre agentes. 2. ABM. 3. mudança de uso da terra. 4. TerraME. 5. modelagem espacial. I.Título.

CDU 004.42

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em

Computação Aplicada

Dra. Sandra Aparecida Sandri

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Gilberto Câmara

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Lúbia Vinhas

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. José Laurindo Campos dos Santos

Convidado(a) / INPA / Manaus - AM

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

( ) unanimidade

Aluno (a): Talita Oliveira Assis

São José dos Campos, 13 de abril de 2012

A meus pais Horácio e Maria Tereza e minha irmã Tainá,

amores da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por, no seu infinito amor e misericórdia, ter me concedido a vida e cobri-la de bênçãos todos os dias.

Aos meus pais e minha irmã Tainá, por serem meus exemplos, minha motivação e por estarem presentes sempre. Vocês são a materialização do amor Divino em minha vida. É fácil ter coragem tendo vocês ao meu lado.

Aos meus orientadores Gilberto e Ana Paula pela confiança em meu trabalho e pelas oportunidades que me têm propiciado.

Ao meu namorado André Gavlak, por ser meu grande companheiro e pela incrível sensação de paz que experimento quando estou ao seu lado. Também pelo apoio técnico que muitas vezes foi fundamental durante esta caminhada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Aos colegas do GEOMA, pelas valiosas discussões e pelos bons momentos que passamos em campo. Além de terem sido fundamentais na construção do meu trabalho foram muito importantes para o meu crescimento profissional.

Aos amigos e colegas do INPE que em diferentes momentos me acompanharam e auxiliaram. Em especial ao Pedro Andrade, pela paciência e pelas ideias que muito contribuíram para a construção deste trabalho.

Aos amigos Raian, Pedro, Cibele, Hiran, Darcy, Kleber, Rogério e agregados da diretoria do 93 por serem minha família joseense.

Às amigas que dividiram comigo minha casa e parte de minha vida: Thalyta, Camila, Carina e agregadas, em especial a grande amiga Aline.

Aos amigos que estão longe, principalmente meus amigos de Delfim Moreira e Manaus, meus refúgios quando a caminhada me parecia pesada. Em especial ao Cícero que acha que sou tão forte que às vezes acaba me convencendo.

A todos que de alguma maneira me ajudaram nesta caminhada.

RESUMO

Modelos baseados em agentes são fundamentados nas ações dos agentes, que podem influenciar tanto outros agentes, quanto o espaço onde interagem estabelecendo relações entre eles. No entanto, nos modelos de mudanças de uso e cobertura da terra existem necessidades especiais no que tange as relações e que, se contempladas, ajudariam a construir modelos capazes de explorar mais profundamente o comportamento dos agentes e sua influência sobre outros agentes e sobre seu ambiente de interação. Estas necessidades incluem a possibilidade de um mesmo agente influenciar as mudanças de uso da terra em vários lugares do espaço, podendo tomar diferentes decisões sobre cada um deles. Incluem também a construção de relações entre agentes de diferentes níveis hierárquicas, ou formadas a partir das relações topológicas entre as células do espaço sobre as quais tem influência. Este trabalho explora a representação das relações e propõe uma estrutura que contemple estas necessidades. Esta estrutura é então implementada no ambiente de modelagem TerraME para que possa ser avaliada. Um modelo baseado em um problema real é construído para que as relações sejam exploradas e desta forma seja verificada a consistência tanto da estrutura proposta quanto do impacto destas relações nos modelos de uso e cobertura da terra.

RELATIONS BETWEEN AGENTS AND SPACE IN AGENT BASED MODELS FOR LAND USE AND COVER CHANGE

ABSTRACT

Agent-based models are grounded on the agents' actions, which can influence other agents, as well the space where they interact. Therefore, relations can be established between these two entities. However, in land use and cover change models there are special requirements regarding the relations and if it is developed would help build models able to explore more deeply the behavior of agents and their influence on others agents and the environment. These requirements include the possibility of a single agent have influence over several cells of the space, could taking different decisions about each one. They also include the construction of relations between agents from different hierarchical levels or formed from the topological relations between cells in the area over which it has influence. This work proposes a structure of representation of relations covering these requests, which was subsequently implemented in TerraME modeling environment for being evaluated. A model based on a real problem was built to explore the relations and thus determine the consistency of the proposed structure and the impact of these relations in the land use and cover change models.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 - Relações entre entidades. a) célula-célula, b) célula-agente, c) agente célula, d) agente-agente (Andrade et al., 2009). 9
Figura 2.2 - Relações de vizinhança espacial entre células (adaptado de Aguiar et al., 2003) a) baseada em distância Euclidiana, b) baseada em uma rede de estradas. 9
Figura 2.3 - Principais componentes da arquitetura proposta (Andrade et al., 2009). 10
Figura 3.1 - Relação agente-célula entre fazendeiros e seus lotes 17
Figura 3.2 - Exemplo de relação entre células em diferentes escalas (MOREIRA et al., 2008) 19
Figura 3.3 - Possíveis relações entre agentes (Adaptado de Assis et al., 2010) 20
Figura 3.4 - Exemplo de carregamento das entidades e relações no TerraME. 23
Figura 3.5 - Funções para percorrer as relações 24
Figura 4.1 - Mapas de uso da terra no leste de Santarém: 1999 e 2007 (Coelho, 2009). 26
Figura 4.2 - Dinâmica da produção de soja em Santarém/Belterra. 27
Figura 4.3 - Mapa das comunidades afetadas pela expansão da soja na região de Santarém. 28
Figura 4.4 - Recorte da área 30
Figura 4.5 - Ambiente de interação do agente. a) Espaço celular irregular onde cada lote representa uma célula. b) Espaço celular regular de um hectare cada célula. 34
Figura 4.6 - Visão geral do modelo: Diagrama de atividades 35
Figura 4.7 - relações iniciais do modelo 36
Figura 4.8 - Novas relações do modelo em decorrência da venda do lote 37
Figura 4.9 - Decaimento da infraestrutura da comunidade em função da perda de sua população 40
Figura 4.10 - Limites entre as comunidades 43
Figura 4.11 - Relação entre os dois espaços celulares 44
Figura 4.12 - Criação das sociedades e carregamento das entidades espaciais 45
Figura 4.13 - Criação das sociedades 45
Figura 4.14 - Percorrimento das relações entre lotes e células para calcular o potencial do lote, soma dos potenciais das células com ele relacionadas 46
Figura 4.15 - Percorrimento da relação entre pequenos produtores e comunidades 46
Figura 4.16 - Reconfiguração das relações em função da compra do lote pelo grande produtor 47
Figura 4.17 - Superfície de potencial de compra dos lotes em t0 48
Figura 4.18 - Divisão entre as comunidades 52

Figura 4.19 - Comparação entre os resultados das diferentes simulações do modelo 52
Figura 4.20 - Porcentagem de lotes vendidos em cada comunidade..... 53
Figura 4.21 - Mapas reais dos lotes em 1999 e 2006 53
Figura 4.22 - Mapa de uso do solo simulado 2006..... 54
Figura A.1 - Simulação S1..... 63
Figura A.2 - Simulação S2..... 64
Figura A.3 - Simulação S3..... 65
Figura A.4 - Simulação S4..... 66
Figura A.5 - Simulação S5..... 67

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 4.1 - Agentes, seus atributos e ações 32
Tabela 4.2 - Células e seus atributos 34
Tabela 4.3 - Relações entre as entidades.....37
Tabela 4.4 - Escala de importância relativa de Saaty (2005). 42
Tabela 4.5 - Parâmetros das simulações 47
Tabela 4.6 - Atributos dos Grandes Produtores para simulações. 48
Tabela 4.7- Atributos das comunidades nas simulações (as células em cinza mostram os atributos trabalhados em cada simulação) 50
Tabela 4.8 - Matriz de comparação entre os indicadores..... 50
Tabela 4.9 - Importâncias relativas dos indicadores obtidos a partir da construção da AHP 51

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Pergunta Científica 3
1.1.1 Objetivos Específicos 3
1.2 Estrutura do documento 3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 5
2.1 Modelos baseados em agentes 5
2.2 Relações 6
2.3 Ferramentas 12
3 MÉTODOS 15
3.1 Formalização das Relações 15
3.2 Estrutura das Relações 15
3.2.1 Relações de Localização/Posse (*Placement)* 16
3.2.2 Relações de Vizinhança (Neighborhood) 18
3.2.3 Relações de Redes Sociais (*Social Network)* 19
3.3 Implementação em TerraME 20
4 PROVA DE CONCEITO 25
4.1 Área de Estudo 25
4.2 Objetivo do Modelo 29
4.3 Desenvolvimento conceitual do modelo 31
4.3.1 Agentes e o Espaço 31
4.3.2 Relações 36
4.3.3 Modelos de Decisão 38
4.3.3.1 Escolha do lote pelo grande produtor 38
4.4 Venda do lote pelo pequeno produtor 39
4.5 Implementação no TerraME 43
4.5.1 Criação dos espaços celulares 43
4.5.2 Criação dos agentes e dinâmica do modelo 44
4.5.3 Protocolo de modelagem: parametrização e simulações alternativas 47
4.6 Resultados 51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 57
APÊNDICE A 63
ANEXO A 69

1 INTRODUÇÃO

Mudanças de uso e cobertura da terra (Land Use and Cover Change - LUCC) são transformações na superfície terrestre associadas ao uso, pela humanidade, da cobertura natural do planeta. Estas mudanças são causadas por uma cadeia de interações entre fatores socioeconômicos, biofísicos e políticos (TURNER et al., 1995) tais como desmatamento, desertificação, urbanização ou intensificação da agricultura (LAMBIN et al., 2006). Seus impactos em escalas locais e globais (TURNER et al., 1995) motivam o estudo de suas causas e conseqüências (Verbug et al. (2004). Esta análise pode ser auxiliada por modelos que quantificam as relações entre as mudanças de uso e cobertura da terra e seus fatores determinantes, que têm por objetivo (PIJANOWSKIA et al., 2002): (a) Ajudar a organizar conhecimento e a entender fatores determinantes da dinâmica das mudanças de uso e cobertura; (b) Entender possíveis implicações econômicas e ambientais de processos de conversão atuais; (c) Possibilitar análise ex-ante de opções de políticas públicas nas trajetórias atuais.

Há uma grande variedade de modelos LUCC na literatura, com objetivos, técnicas, embasamento teórico e tradições de modelagem distintas (VERBURG et al., 2006; BRIASSOULIS, 2000). Dentre as diferentes abordagens, a modelagem baseada em agentes se destaca em artigos científicos recentes (PARKER et al., 2002). Os modelos baseados em agentes tentam identificar as entidades que realizam as mudanças de uso da terra descrevendo tanto as entidades em separado como suas interações (ANDRADE et al., 2008; GILBERT, 2008; MATTHEWS et al., 2007). Revisões de modelo baseados em agentes são encontradas em Parker et al. (2003) e Mattews et al. (2007).

Este trabalho adota a técnica de modelagem baseada em agentes para descrever mudanças de uso e cobertura da terra e tem como motivação principal tentar complementar outras abordagens propostas na literatura, como o uso de métodos estatísticos (KOK et al., 2001; VELDKAMP; FRESCO, 1996; VERBURG et al., 1999), que usam dados censitários, geográficos e de imagens de satélite para estabelecer relações de causa-efeito sobre uso da terra. É usual fazer uma análise estatística na qual as variáveis independentes

são dados como população, renda, estrutura agrária, produção e as variáveis dependentes são as mudanças na terra, como desmatamento. O grande desafio da análise estatística é sua validade temporal. Relações causais que são válidas em um ano podem mudar nos anos seguintes, devido à dinâmica dos atores que transformam a terra. O grande atrativo de modelos baseados em agentes é sua capacidade potencial de capturar mudanças que resultam de diferentes comportamentos e interações. Em situações dinâmicas, especialmente quando há mudança em políticas públicas, os modelos de agentes são muito atraentes para estudos científicos (LIM et al., 2002).

Nesta abordagem, os agentes executam suas ações a partir da percepção do ambiente e de estímulos de outros agentes que como consequência afetam outros agentes e o próprio ambiente (VIDAL et al., 2001). No entanto, para representar as entidades espaciais e suas relações em modelos de uso e cobertura da terra é preciso ir além de situar o agente no espaço. Deve-se representar como os agentes se apropriam do espaço, em especial como os produtores rurais decidem sobre como usam a terra em diferentes tipos de estabelecimentos rurais. Os estabelecimentos são a unidade básica de decisão de cada ator e possuem tamanhos, formas e características distintas e são modificados ou transacionados ao longo do tempo. As decisões de cada produtor, por sua vez, são influenciadas pelos vizinhos, por relações de parentesco, ou ainda por atores de outros níveis hierárquicos, como indústrias, associações, e órgãos do governo.

Este trabalho considera as necessidades de representar agentes em modelos de mudança de uso da terra e propõe uma estrutura de relações entre agentes, fundamentada em Torrens; Benenson (2005) e Andrade et al. (2008). Para validar esta proposta, esta estrutura é implementada no ambiente de modelagem TerraME (CARNEIRO, 2006) onde posteriormente é construído um modelo que simula o processo de expansão da agricultura mecanizada na região de Santarém, oeste do estado do Pará, para que a solução seja avaliada. O modelo explora as relações entre os pequenos e grandes produtores rurais e as comunidades.

1.1 Pergunta Científica

Que estrutura pode representar bem as relações entre agentes e o espaço geográfico para atender às necessidades de modelagem de mudanças de uso da terra?

1.1.1 Objetivos Específicos

a) analisar o estado da arte na representação de relações entre os agentes e espaço geográfico.
b) propor uma estrutura para modelos de agentes que atenda bem aos requisitos de modelagem LUCC. Argumentar que esta estrutura é inovadora em relação a propostas anteriores na literatura. Validar a estrutura proposta implementando-a em ambiente TerraME.
c) criar um modelo LUCC que explore estas relações para que a consistência da proposta seja verificada em um estudo de caso realista.

1.2 Estrutura do documento

Esta dissertação é estruturada da seguinte forma:

a) O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos modelos espaciais baseados em agentes e discute como esses modelos são implementados nas principais ferramentas de modelagem de agentes.
b) No Capítulo 3 é detalhada a metodologia. São discutidas as relações entre agentes e espaço, mostrando porque são necessárias para modelagem LUCC. Em seguida é mostrado como esta proposta foi implementada no ambiente TerraME (CARNEIRO, 2006).
c) No Capítulo 4 é apresentada a prova de conceito construída. São então apresentados a definição do objeto de estudo e sua área, o modelo conceitual, sua construção no TerraME e os resultados obtidos, correspondendo ao terceiro objetivo específico desta dissertação.
d) O Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Modelos baseados em agentes

Os modelos baseados em agentes buscam entender um determinado processo através da descrição das entidades nele envolvidas e das interações entre elas (GILBERT, 2008; MATTHEWS et al., 2007). Os agentes são os componentes centrais deste tipo de modelo e podem representar tanto pessoas, quanto células biológicas, animais, organizações, entre outros (PARKER, 2003). Estes agentes possuem, segundo Wooldridge; Jennings (1995), quatro características que os definem: a) autonomia: não há um controle global do que o agente faz; b) habilidade social: é possível interagir com outros agentes; c) reatividade: é possível reagir apropriadamente a estímulos vindos do seu ambiente e d) proatividade: existem objetivos que norteiam as decisões, mas os agentes tomam suas próprias iniciativas. Os agentes podem se mover de uma localidade para outra, trocar informações com outros agentes ou escolher e executar ações a partir da percepção do meio ou dos estímulos de outros agentes. Essas ações podem modificar o ambiente e influenciar outros agentes (BROWN et al., 2005; TORRENS; BENENSON, 2005; VIDAL et al., 2001).

Uma das grandes vantagens desse tipo de modelo é a possibilidade de incluir agentes heterogêneos em suas características e habilidades, tornando possível trabalhar diretamente com as conseqüências das suas interações (GILBERT, 2008). Esta abordagem permite uma exploração mais massiva das características dos agentes, seus processos de tomada de decisão, estruturas sociais e institucionais e comportamentos distintos entre agentes de diferentes localidades. Estas possibilidades fizeram com que tais modelos ganhassem espaço em diversas áreas da economia, ciências sociais, medicina e biologia.

Em estudos de mudanças de uso e cobertura da terra vários autores abordam a utilização de modelos baseados em agentes (DEADMAN et al., 2004; MATTHEWS, 2007; PARKER et al., 2003; VALBUENA, 2009) que podem ser usados para a explicação de padrões espaciais ou testes de conceitos das ciências sociais. Diversos modelos vêm utilizando esta abordagem, como Castela (2005), que utilizou *Role Playing Games* (RPG) para a criação de um

modelo para explorar decisões dos camponeses das montanhas ao norte do Vietnã e Bell (2011), que desenvolveu um modelo para analisar os impactos do licenciamento ambiental nos aspectos econômico, social e ambiental em Ji-paraná, Rondônia.

Nos modelos LUCC, a abordagem baseada em agentes consiste de entidades autônomas, um ambiente onde estas entidades interagem e regras que definem estas interações. A principal função do ambiente é prover um contexto espacial para os agentes (HUIGEN; FISCHER, 2003) que podem representar atores como produtores rurais, comunidades ou organizações governamentais, privadas ou sociedade civil. Os processos de tomadas de decisão dos agentes são normalmente heurísticos ou baseados em otimização (SCHREINEMACHERS; BERGER, 2006). Embora muitos modelos ainda sejam construídos com experimentos realizados em laboratórios há uma tendência atual de utilização de dados empíricos obtidos através de entrevistas, observação participativa, experimentos realizados em campo ou RPG que buscam reproduzir os possíveis comportamentos do agente (JANSSEN; OSTROM, 2006; ROBINSON et al. 2007).

2.2. Relações

Para que os processos espaciais sejam modelados é importante que haja integração entre a modelagem dos processos e as reais condições físicas e ambientais da região estudada. Este argumento é defendido por Brown (2005) que afirma que a utilização de dados espaciais reais nos modelos baseados em agentes pode aumentar a capacidade de representação dos padrões espaciais e dos processos temporais e, para isto, definem quatro tipos de relações através das quais agentes e dados espaciais podem interagir: identidade, causal, topológico e temporal. A relação de identidade é a associação entre agentes e feições espaciais. Nela cada agente pode estar associado a 0 ou N feições espaciais, assim como cada feição pode estar associada a 0 ou N agentes. A relação causal se dá quando os agentes agem de forma a afetar feições espaciais e/ou seus atributos sem que estejam associados a eles. Relações topológicas ocorrem quando um objeto depende de informações básicas sobre atributos físicos ou relações espaciais entre

feições para se movimentar. As ações dos agentes e as atualizações de atributos ou localização de feições ao banco de dados são sensíveis ao tempo, criando assim uma relação temporal.

Torrens; Benenson (2005) trabalham com relações semelhantes às de identidade e topologia definidas por Brown (2005). Segundo os autores, existem duas entidades básicas nos modelos que simulam processos geográficos: objetos fixos que representam o espaço geográfico (as células) e objetos não fixos que podem mudar sua localização ao longo do tempo (os agentes). Combinados, estas entidades podem formar quatro tipos de relações, ou seja, de conexões entre elas: CÉLULA-CÉLULA, CÉLULA-AGENTE, AGENTE-CÉLULA, AGENTE-AGENTE.

As entidades exploradas por Torrens; Benenson (2005) têm suas características geográficas definidas de forma direta ou indireta. O georeferenciamento direto é aplicado às células através de uma abordagem vetorial. Assim, vizinhanças entre as células podem ser construídas com base em distâncias simples ou redes complexas, baseadas conectividade, proximidade ou medidas de acessibilidade. Os agentes necessitam, no entanto, de georefenciamento indireto, no qual apontam para uma célula, compondo uma relação entre o agente e a célula. Portanto, a localização espacial não é um atributo do agente, mas da relação formada. Desta forma, duas entidades com georefenciamento indireto são vizinhas quando existe vizinhança entre as células para as quais elas apontam.

Para descrever estas relações Torrens; Benenson (2005) utilizam de uma abordagem líder/seguidor, onde o líder é o responsável por gerenciar a relação enquanto o seguidor é um objeto passivo invocado pelo líder quando necessário. As relações CÉLULA-CÉLULA já estão estabelecidas através da vizinhança espacial, sendo esta uma relação estática que contém dois seguidores. Nas relações AGENTE-CÉLULA, que definem sobre quais células um determinado agente tem controle, este é sempre o líder, responsável por criar atualizações da relação. As outras duas relações não se encaixam na definição de líder/seguidor. Por isto, para resolver uma relação CÉLULA-AGENTE os autores utilizam consultas reversas sobre a relação AGENTE-

CÉLULA e para obter uma relação AGENTE-AGENTE é necessária uma combinação das relações AGENTE-CÉLULA e CÉLULA-AGENTE .

Andrade et al.(2008) supõe necessários todos os quatro tipos de possíveis relações descritos por Torrens; Benenson (2005) e as divide em dois subgrupos: Localização (*Placement)*, que envolve duas entidades de tipos diferentes e Vizinhança (*Neighborhood)*, que envolve entidades de um mesmo tipo. CÉLULA-AGENTE e AGENTE-CÉLULA compõem o grupo de relações *de* Localização*.* CÉLULA-AGENTE (Figura 2.1b) armazena os agentes que pertencem a uma célula, podendo conter um ou mais agentes. Cada agente, entretanto, pode estar, no máximo, em um lugar em um dado tempo. AGENTE-CÉLULA (Figura 2.1c) armazena as células sobre as quais um determinado agente tem domínio. O grupo de relações de Vizinhança (*Neighborhood)* é composto pelas relações CÉLULA-CÉLULA e AGENTE-AGENTE. CÉLULA-CÉLULA (Figura 2.1a) é a relação de vizinhança entre as células, representando a proximidade espacial entre elas, seja esta definida por distância Euclidiana ou por métricas de distâncias relativas, como estradas, rios ou redes de conectividade. AGENTE-AGENTE (Figura 2.1d) relaciona agentes de mesmo tipo ou tipos diferentes. Estas relações podem ser baseadas em fatores como parentesco, confiança ou fatores externos como relações de mercado (ANDRADE et al., 2008).

Andrade et al. (2008) afirma ainda que as relações do grupo *de Vizinhança* podem conter pesos que indicam a intensidade da relação, podendo ser assimétricas pois o peso da relação de A para B pode ser diferente do peso da relação de B para A. Já as relações de Localização possuem peso sempre igual a 1, pois, ou um determinado agente e uma célula do espaço estão relacionados ou não.

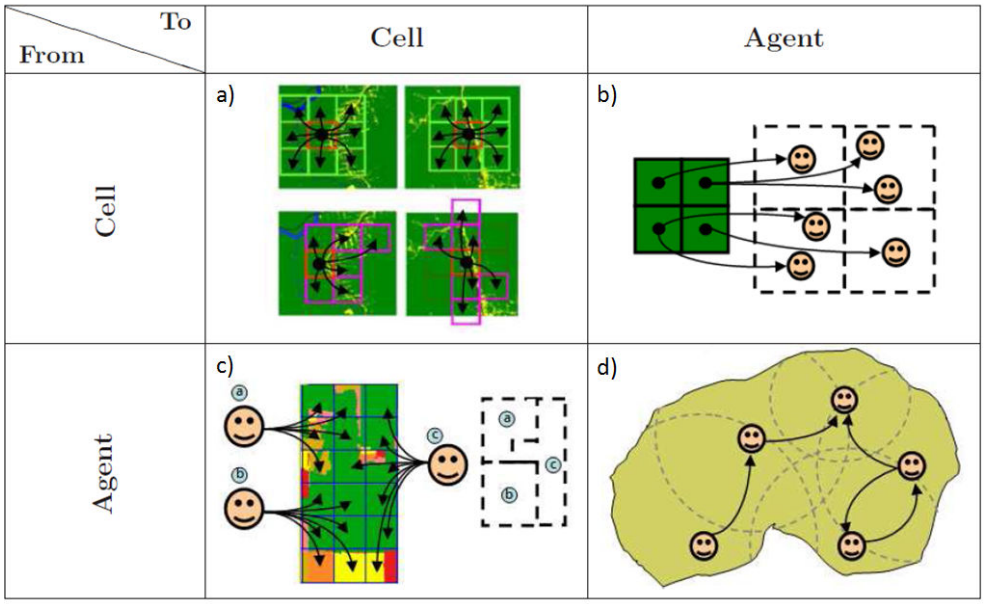

Figura 2.1 - Relações entre entidades. a) célula-célula, b) célula-agente, c) agente célula, d) agente-agente

Fonte: Andrade et al., 2009

Andrade et al. (2009) ao propor uma arquitetura para modelos baseados em agentes para simulação de fenômenos geoespaciais, discute a utilização da *Generalized Proximity Matrix* (GPM) (AGUIAR et al., 2003) como base para configurar todas as relações entre entidades discutidas acima. A GPM permite estabelecer relações entre conjuntos de entidades espaciais baseadas em distância Euclidiana (Figura 2.2a) ou relações geométricas (Figura 2.2b) obtendo como resultado grafos que conectam estas entidades, sendo possível alimentar cada uma das quatro relações.

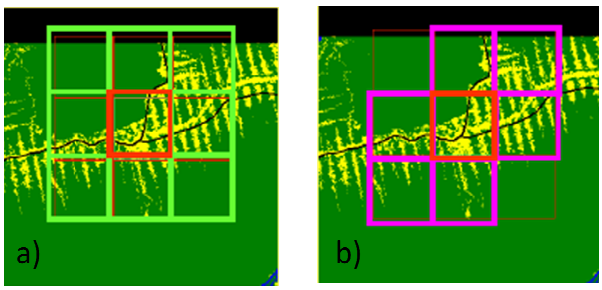

Figura 2.2 - Relações de vizinhança espacial entre células a) baseada em distância Euclidiana, b) baseada em uma rede de estradas.

Fonte: adaptado de Aguiar et al., 2003

Além disso, a GPM apresenta algumas estratégias específicas para objetos pertencentes a espaços celulares distintos, referentes à integração espacial entre espaços celulares de diferentes resoluções e extensões que podem estar conectados hierarquicamente, como nos casos de conexões entre países, estados e municípios ou através de uma rede, como redes de mercado (MOREIRA et al., 2008). Estas estratégias são particularmente interessantes no caso das relações de Localização, onde há a possibilidade de haver sobreposição entre as entidades, dificultando a utilização de vizinhança simples para a construção desta relação.

A arquitetura proposta por Andrade et al. (2009), ilustrada na Figura 2.3, é composta de: (i) agente, que segundo definido em Andrade et al. (2008) contém as mesmas propriedades da camada de informação na qual está contido; (ii) célula; (iii) sociedade (conjunto de agentes com mesmas propriedades); (iv) espaço celular (conjunto de células com mesmas propriedades); (v) grupos e (vi) trajetórias (subconjuntos de sociedade e espaço celular, respectivamente, que podem ser usados para construir relações de localização e vizinhança*)* e (vii) dados geoespaciais, usados para alimentar as entidades e relações do modelo.

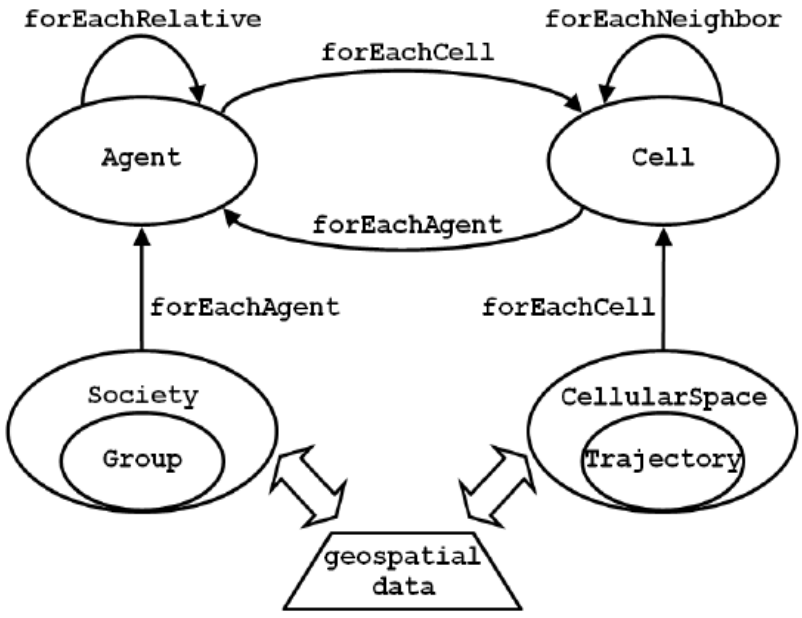

Figura 2.3 - Principais componentes da arquitetura proposta

Fonte: (Andrade et al., 2009)

No entanto, quando se trata de modelos de mudanças na terra surgem algumas necessidades que devem ser observadas. Estes normalmente possuem agentes do tipo produtores rurais, que podem possuir uma ou muitas propriedades que não são necessariamente tratadas da mesma forma. Estas propriedades podem, por exemplo, apresentar diferentes cultivos, estarem envolvidas em diferentes arranjos de mercado, além de poderem ser vendidas a outros produtores. Por isto, nestes modelos as relações que os agentes podem estabelecer entre si e com o ambiente onde interagem precisam ir além de representações de localização e influências do agente sobre um território, conceitos mais utilizados atualmente, surgindo a necessidade de um aprofundamento no conceito das relações para que estas necessidades sejam contempladas.

As entidades, agente e célula, descritas por Torrens; Benenson (2005) propiciam um contexto espacial para o agente. Entretanto, na solução apresentada por Torrens; Benenson (2005) apenas as relações de vizinhança e localização dos agentes são contempladas.

Andrade et al. (2008) propõe que todas as relações devem ser criadas, porém, na definição da relação AGENTE-CÉLULA, o autor exige que um agente possa estar apenas em uma célula em um dado momento. Nos modelos de mudanças de uso da terra esta restrição não é interessante, pois nestes modelos a relação AGENTE-CÉLULA não se trata necessariamente da localização de um agente no espaço, podendo se referir também à sua área de influência. Desta forma é importante a possibilidade de o agente se relacionar com várias células. Considerar a possibilidade de uma relação do agente para cada uma de suas propriedades é mais interessante do que considerá-las todas como único elemento, já que não necessariamente o mesmo tratamento é dado a todas elas. Esta questão também faz com que a solução de Torrens; Benenson (2005), que define as características espaciais do agente através da relação entre ele e uma determinada célula seja mais robusta do que definir que ele assuma as características espaciais da célula com a qual está relacionado, conforme proposto por Andrade et al.(2008), o que poderia gerar conflitos, já que um agente deve ter a possibilidade de se relacionar com várias células simultaneamente.

Os conceitos acima discutidos serviram como base para que relações fossem implementadas em ferramentas para construção de modelos baseadas em agentes, como o OBEUS, que utiliza os conceitos definidos por Torrens; Benenson (2005). Esta e outras ferramentas são discutidas na seção 2.3.

2.3. Ferramentas

Várias ferramentas com diferentes características oferecem possibilidades para a criação dos modelos baseados em agentes. Ao estudá-las, porém, percebe-se que ainda há grandes deficiências quanto a representação espacial e suas relações com os agentes. Swarm (MINAR et al. 1997) e NetLogo (WILENSKY, 1999) trabalham apenas com representações matriciais do espaço, podendo carregar dados de arquivos externos para compor o ambiente. Ambos permitem a criação de vizinhanças entre células a partir de distância Euclidiana e que cada célula contenha um agente (no caso do Swarm) ou vários (no Netlogo). O Swarm permite ainda a construção de modelos hierárquicos em múltiplas escalas.

O OBEUS (BENENSON, 2004) utiliza dados vetoriais para a representação tanto das células quanto dos agentes. As células podem ser relacionadas entre si através de operações complexas sobre vetores possibilitando a construção de vizinhanças mais elaboradas. A criação de relações AGENTE-CÉLULA e CÉLULA-AGENTE também são possíveis, esta última através de consultas reversas sobre a primeira. Relações AGENTE-AGENTE podem ser construídas de forma transitiva, através da composição entre duas relações: AGENTE-CÉLULA e CÉLULA-AGENTE. Isto faz com que relações AGENTE-AGENTE contemplem somente os casos onde esta é baseada na proximidade geográfica entre estes agentes.

Cormas (BOUSQUET, 1998) e Repast (CROOKS, 2007) permitem o uso tanto de dados vetoriais quanto matriciais, que podem ser carregados a partir de arquivos externos, para compor o ambiente. Porém cada elemento da matriz pode conter apenas um atributo, sendo necessários vários planos de informação para formar um ambiente. A construção de vizinhanças de Moore ou Von Neumman é possível nas duas ferramentas quando utilizados dados

matriciais, sendo que o Cormas também há possibilidade de utilizar extensões dessas vizinhanças de forma recursiva. O Repast permite ainda a criação de relações entre células que utilizam operações complexas sobre os dados vetoriais. Nesta mesma ferramenta o espaço contém agentes, definem as relações entre eles e controlam seus movimentos. Já no Cormas o agente pode se movimentar de duas formas: quebrando a conexão com sua referência espacial, ou conectando-se a uma nova entidade espacial.

O TerraME (CARNEIRO, 2006) trabalha com o conceito de espaços celulares, que são grades regulares com propriedades criadas a partir de dados vetoriais ou matriciais e armazenadas em bancos de dados TerraLib (CAMARA et al., 2008). Trabalha também com uma extensão deste conceito chamada de "espaços celulares irregulares" (CARNEIRO et al. 2008) onde a estrutura espacial dos espaços celulares é estendida para suportar outros tipos de representações do espaço, como polígonos. O TerraME utiliza ainda o conceito de GPM (AGUIAR et al., 2003) que cria vizinhança entre as células não apenas a partir de distância Euclidiana ou de adjacência, mas também distâncias relativas calculadas a partir de atributos como rodovias, rios ou redes de conexão. Esta forma de representar os dados espaciais e suas relações de vizinhanças é uma grande vantagem desta ferramenta. Entretanto, por não representar os agentes como uma entidade espacial, possibilita apenas que eles se movam no espaço, não permitindo relações mais consistentes, tais como as relações que representem sua influência sobre o espaço.

Todas as ferramentas apresentadas realizam basicamente funções de localização do agente e sua movimentação no espaço ou influências dos agentes sobre o seu território que, no entanto não atendem a todas as necessidades de modelagem levantadas neste trabalho. A metodologia descrita a seguir propõe uma nova estrutura de relações que contempla estas demandas.

3 MÉTODOS

Após a análise dos conceitos de relações entre entidades presentes na literatura, dos recursos existentes nas ferramentas e o levantamento das necessidades das relações dentro de modelos LUCC pode-se confrontar demandas e soluções, evidenciando o que ainda precisa ser elaborado para que estes modelos possam ser construídos de forma mais consistente. Com isso, no contexto desta dissertação, foi definida uma estrutura de relações visando atender os requisitos levantados. Esta solução foi implementada no ambiente TerraME e um modelo baseado em dados empíricos foi desenvolvido para que esta pudesse ser testada.

3.1. Formalização das Relações

Para facilitar o entendimento das relações estruturadas na seção 3.2 uma formalização das relações é apresentada abaixo.

Sejam A e C conjuntos de agentes e células, respectivamente. Então:

- célula × célula : $R_{CC} \subseteq C^2$
- célula × agente: $R_{CA} \subseteq C \times A$
- agente × célula: $R_{AC} \subseteq A \times C$
- agente × agente: $R_{AA} \subseteq A^2$

3.2. Estrutura das Relações

Esta estrutura foi desenvolvida abordando as quatro relações possíveis de serem construídas a partir das combinações entre as entidades agentes e células e teve como base o trabalho de Andrade et al. (2008), porém efetuando alterações conceituais necessárias para que as seguintes demandas existentes na construção de modelos de mudanças de uso e cobertura da terra fossem atendidas:

a) Representação de estabelecimentos rurais (denominados LOTES neste documento) e suas relações: (a) Um mesmo agente pode possuir zero, um ou mais do que um estabelecimento rural. (b) Deve ser possível representar explicitamente os LOTES como unidade

principal de atuação dos agentes que efetivamente tomam as decisões relativas a mudanças de uso e cobertura, como o fazendeiro, por exemplo. (c) Também é necessário que tais estabelecimentos possam ser formados por células de resolução menor, capazes de representar suas características biofísicas e de acessibilidade internas.

b) Uma gama maior de relações entre agentes antevistas em modelos LUCC devem ser representadas, como relações derivadas da vizinhança topológica entre lotes e relações entre agentes de diferentes tipos e níveis hierárquicos (como por exemplo, fazendeiros, industrias, associações, etc.).

3.2.1. Relações de Localização/Posse (*Placement)*

Estas relações são baseadas nas relações de Localização definidas por Andrade et al. (2008), formadas por entidades espaciais de tipos diferentes. Compõem este grupo as relações AGENTE-CÉLULA e CÉLULA-AGENTE.

Quando se trabalha com as relações em modelos de mudanças de uso da terra, no entanto, o conceito de Localização de Andrade et al.(2008) precisa ser expandido para além da localização geográfica do agente, devendo-se considerar também a sua área de influência em um determinado ambiente. Isto permite com que, por exemplo, conversões de uso da terra possam ser conseqüências das ações do agente que se relaciona com seu lote, ou seja, as relações podem determinar as áreas de atuação de um agente, como mostrado na Figura 3.1. Como esta área pode ser composta de mais de uma célula a relação AGENTE-CÉLULA deve ser 1:N, de modo que cada agente possa se relacionar com uma ou várias células ao mesmo tempo, ou ainda não se relacionar com nenhuma delas.

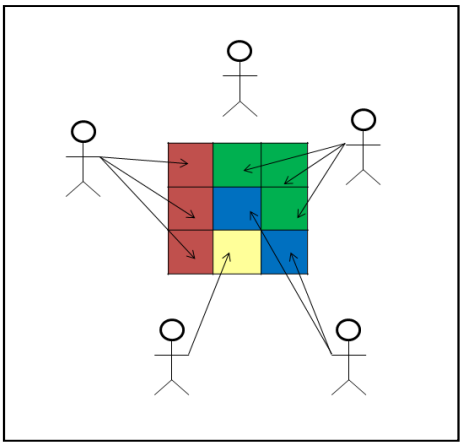

Figura 3.1 - Relação agente-célula entre fazendeiros e seus lotes

Fonte: Adaptada de Assis et al., 2010

Formalmente, estendendo-se a noção das relações apresentada na seção 3.1 para $R:R_n \rightarrow \Delta$ podem-se escrever as relações de Localização/Posse como:

$$\text{célula} \times \text{agente: } R_{CA} : C \times A \rightarrow \{0, n\}$$

$$\text{agente} \times \text{célula: } R_{AC} : A \times C \rightarrow \{0, n\}$$

Assumindo que AGENTE-CÉLULA é uma relação 1:N, ou seja, cada agente pode se relacionar com zero ou mais células, conforme discutido acima, as características espaciais do agente devem ser obtidas através da relação dele com as células, não devendo assumir as características das mesmas. Isto porque ele não necessariamente se relaciona a uma célula, mas pode se relacionar a várias, cada uma com características espaciais distintas das outras. Além disso, estas relações são dinâmicas, podendo um agente, por exemplo, se desfazer de algumas de suas células ou adquirir novas unidades no decorrer da simulação. Desta forma, é mais interessante que a espacialização do agente esteja a cargo de sua relação com o espaço, ao invés de ser um conjunto de atributos internos incorporados das características espaciais das células com as quais se relaciona.

As definições acima apresentadas atendem parcialmente a demanda de representação de estabelecimentos rurais, o qual precisará ainda do conceito

de Vizinhança (*Neighborhood)*, apresentado a seguir, para que seja totalmente resolvido.

3.2.2. Relações de Vizinhança (Neighborhood)

Segundo Andrade et al. (2008), *as relações de* Vizinhança envolvem entidades espaciais do mesmo tipo, ou seja, CÉLULA-CÉLULA e AGENTE-AGENTE. Porém, observadas as diferenças conceituais entre estas duas relações, as entidades que as compõem e o conjunto de problemas que buscam resolver, este trabalho verificou a necessidade de dividir este grupo em dois novos, classificando-os de forma mais adequada. As relações entre células permaneceram no grupo de relações denominadas Vizinhança e as relações entre agentes, por tratarem relações entre entidades que não necessariamente possuem características espaciais, foram enquadradas em um novo grupo chamado Redes Sociais (*Social Network).* Formalmente, estendendo-se a noção das relações apresentada na seção 3.1 para $R{:}R^{n\rightarrow}\Delta$ as relações de Vizinhança e Redes Sociais podem ser escritas respectivamente como:

$$\text{célula} \times \text{célula: } R_{CC} : C^2 \rightarrow \{0, n\}$$

$$\text{agente} \times \text{agente: } R_{AA} : A^2 \rightarrow \{0, n\}$$

Desta forma ambos os grupos de relações puderam ser mais bem explorados de acordo com suas características e natureza de suas demandas.

As relações CÉLULA-CÉLULA incluem relações criadas a partir de vizinhança espaciais entre células construídas a partir de distâncias Euclidiana ou relativas e relações entre diferentes espaços criadas a partir de uma abordagem em duas escalas, como mostrado na Figura 3.2 (Moreira et al. 2008). Utilizando esta abordagem, propõe-se que um lote seja representado por uma célula (regular ou irregular), com atributos que o descrevam como um todo, atendo assim à necessidade de que as decisões possam ser tomadas para o estabelecimento como um todo, e não apenas para as células que o compõe. Com esta solução um lote pode se relacionar com células de escala mais fina que representam características biofísicas e de acessibilidade dentro dos mesmos.

A definição de relações de Localização/Posse é genérica e se aplica naturalmente a esta abordagem multi-escala. Assim um agente pode possuir N células representando lotes, como na figura 3.2, que podem estar relacionados a 0-N células de menor resolução, em geral regulares (Figura 3.2).

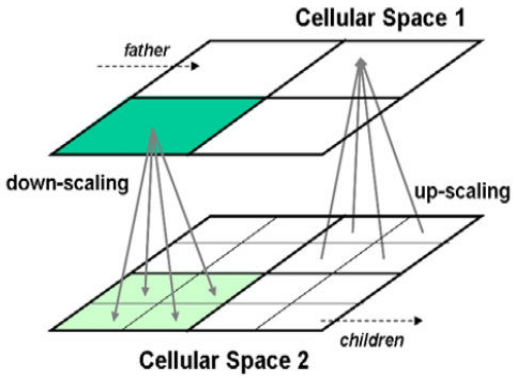

Figura 3.2 - Exemplo de relação entre células em diferentes escalas

Fonte: MOREIRA et al., 2008

Finalmente, como as relações AGENTE-CÉLULA e CÉLULA-CÉLULA podem ser dinamicamente modificadas, tal abordagem permite a flexibilidade necessária para que os agentes vendam, aumentem ou diminuam seus LOTES, de modo desacoplado do espaço em si.

3.2.3. Relações de Redes Sociais (*Social Network)*

As *relações* de Redes Sociais podem ser definidas em função da localização destes agentes ou a partir de atributos externos, como arranjos de mercado ou parentesco. Quando a relação entre dois agentes é obtida através de sua localização, como a definição de agentes vizinhos, por exemplo, ela é intermediada pelas relações de vizinhança entre as células com as quais estes agentes se relacionam como é possível observar na figura 6. Relações AGENTE-AGENTE também podem ser fundamentadas em fatores socioeconômicos, como, por exemplo, relações de parentesco, de cunho religioso, comerciais, ou ainda o relacionamento entre um produtor rural e a organização que fiscaliza seus processos de produção, que é definida por regulamentações governamentais (Figura 3.3). Estas relações atendem a demanda por mais amplas representações de relações entre agentes,

completando assim o conjunto de conceitos necessários para a construção destes modelos.

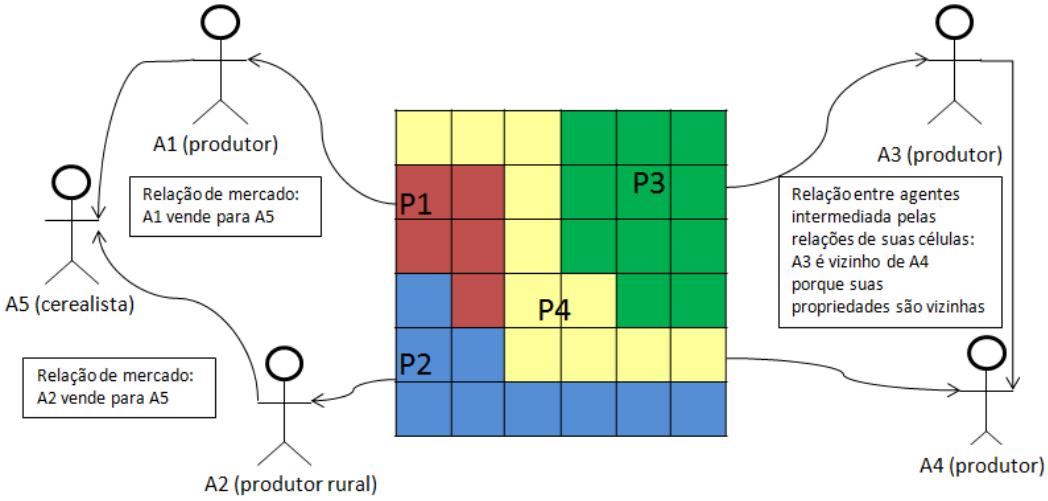

Figura 3.3 - Possíveis relações entre agentes

Fonte: Adaptada de Assis et al., 2010

3.3. Implementação em TerraME

Uma vez definidas as relações necessárias para modelos baseados em agentes em aplicações de mudança de uso da terra, tais relações foram implementadas em TerraME (CARNEIRO, 2006) para numa etapa posterior desenvolver uma prova de conceito. Espera-se também que a solução proposta passe a integrar o ambiente TerraME e possa ser utilizada para o desenvolvimento de modelos baseados em agentes em geral. Para facilitar o entendimento desta seção, os conceitos TerraME utilizados neste documento são detalhados no anexo 1.

O TerraME (CARNEIRO, 2006) é um ambiente para modelagem espacial dinâmica, implementado com base na biblioteca SIG de código aberto TerraLib (CÂMARA et al., 2000) que possui acesso direto a um banco de dados geográfico. TerraME oferece uma linguagem de modelagem de alto nível que propicia tipos de dados e serviços para facilitar a representação de processos espaço-temporais, assim como a construção de modelos multiescala. Esta ferramenta foi escolhida por apresentar uma estrutura de representação do espaço que permite trabalhar da mesma forma com células regulares e

polígonos, os espaços celulares (regulares ou irregulares) e por suas facilidades para trabalhar as relações espaciais.

Para a implementação das relações este trabalho adotou a solução proposta por Andrade et al. (2009) onde a GPM (AGUIAR et al. 2003) é utilizada como base para todas resolver as relações entre agentes e células. As relações podem conter pesos, que também são armazenadas nas GPM. Assim, relações com pesos iguais tanto de A para B quanto de B para A são consideradas bidirecionais, representando uma relação simétrica, enquanto as demais relações são unidirecionais (ANDRADE et al., 2008).

A GPM, como implementada em ambiente TerraLib, contém estratégias que permitem a criação de relações entre objetos baseadas em distância Euclidiana ou distâncias relativas, entre objetos do mesmo tipo (pontos, linhas, polígonos, células) representados na mesma escala (AGUIAR et al., 2003), ou ainda objetos conectados através de relações hierárquicas ou baseados em redes, possibilitando, por exemplo, que espaços sejam acoplados entre si (MOREIRA et al., 2008). No TerraME, as relações de vizinhança entre células dentro de um mesmo espaço celular (escala) são tradicionalmente construídas utilizando as GPM. Porém, as vizinhanças entre espaços celulares distintos que possibilitam o acoplamento entre diferentes escalas, vêm sendo trabalhadas ao longo de sua evolução. Em sua solução original definida por Carneiro (2006) é possível acoplar espacialmente espaços celulares de mesma resolução e que possuam a mesma localização no espaço. Além disso, a possibilidade de utilização da GPM (AGUIAR et al. 2003) tornou possível a implementação entre escalas. Moreira (2008) desenvolveu uma solução que possibilita a integração espacial de modelos que estejam em espaços celulares de diferentes resoluções e extensões, os quais podem estar conectados hierarquicamente ou através de uma rede. A implementação das relações envolvendo agentes em ambiente TerraME utilizando a GPM, como definido por Andrade et al. (2009), foi realizada no escopo desta dissertação.

Para que as relações conceituadas neste trabalho fossem implementadas foi desenvolvida uma solução unificada, que permite tanto o tratamento de todas as relações definidas anteriormente, quanto os acoplamentos entre escalas em

outros tipos de modelos. Esta implementação utiliza o conceito de *environment* como estrutura fundamental no TerraME para a construção das relações (vide relação de conceitos TerraME utilizados neste trabalho, anexo 1). O *environment* é uma estrutura no TerraME que encapsula as componentes espaço, tempo, comportamento e pode controlar a simulação, sincronização e *timers* (escalonador baseado em eventos que executa e controla a simulação no TerraME) dentro dele.

O *environment* foi usado como fonte de acoplamento espacial o qual possibilita carregar todas as entidades e possíveis relações. Este possui uma função *load*, que carrega os espaços celulares e sociedades (conjunto de agentes com mesmas características). Como parte desta dissertação foram adicionadas funções específicas para o carregamento dos grupos de relações definidos acima. Desta forma, relações entre células podem ser carregadas utilizando a nova função *loadNeighborhood,* relações entre agentes a partir da nova função*loadSocialNetwork* e as relações entre agentes e células através a nova função *loadPlacement*.

Na solução proposta, a localização espacial do agente é feita, inicialmente, relacionando o agente com cada uma de suas células em uma determinada resolução para que possa ser referência para este agente. A partir desta conexão todas as outras relações que envolvem o ambiente do agente podem ser feitas adotando esta referência. Criadas as relações o modelo pode carregá-las a partir das funções acima descritas, relacionando-as de forma que possam ser acessadas e manipuladas em todo o modelo. Assim as relações são estabelecidas dentro do modelo de maneira unidirecional ou bidirecional, podendo esta característica ser definida pelas funções de carregamento.

A Figura 3.4 mostra um exemplo do carregamento das entidades e relações no TerraME. Nela foram carregadas duas sociedades (ag_prurais e ag_comunidades) e um espaço celular (cel_lotes) que foram colocados dentro de um mesmo *environment*. Suas respectivas relações também são estabelecidas através do carregamento destas relações, previamente criadas e armazenadas em arquivos. A relação de vizinhança entre os lotes, denominada lotes-lotes é unidirecional, bem como a relação entre os agentes do tipo

"prurais", chamadas de prurais-prurais. A relação criada entre os lotes e os prurais, por se tratar de uma relação de Localização/Possedeve ser bidirecional e é chamada de lotes-rurais. Por último, a relação entre as sociedades prurais e comunidades foi chamada de prurais-comunidades, mas também pode ser denominada comunidades-prurais, utilizando como referência a comunidade, já que esta foi considerada simétrica e portanto bidirecional.

```
env = Environment{
            id = "ENV",
            ag_prurais,
            ag_comunidades,
            cel_lotes
}

cel_lotes:loadNeighborhood ("lotes-neighborhood.gpm", "lotes-lotes")

env:loadPlacement ("prurais-lotes", true, "lotes-prurais")

ag_prurais:loadSocialNetwork ("prurais-prurais.gpm", "prurais-prurais")

env:loadSocialNetwork ("prurais-comunidades.gpm", "prurais-comunidades", true, "comunidades-prurais")
```

Figura 3.4 - Exemplo de carregamento das entidades e relações no TerraME.

Uma vez estabelecido o arranjo inicial das relações dentro do modelo deve ser possível percorrê-las para que consultas e outras operações de manipulação possam ser executadas sobre elas. Existem funções capazes de percorrer cada um dos tipos de relação, conforme sistematizado na Figura 3.5. Cada agente de uma determinada sociedade pode acessar suas relações com outros agentes através do *forEachConnection* e suas relações com células através do *forEachCell*. As células de um dado espaço celular, por sua vez, podem acessar as células com as quais se relaciona utilizando *forEachNeighbor* e os agentes através do *forEachAgent*. Ambas as entidades espaciais, devido ao fato de poderem possuir vários tipos de relação com outros agentes ou outras células, podem ainda consultar quais relações *de Vizinhança* e *Redes Sociais* possuem, através das funções *forEachSocialNetwork* e *forEachNeighborhood*, respectivamente.

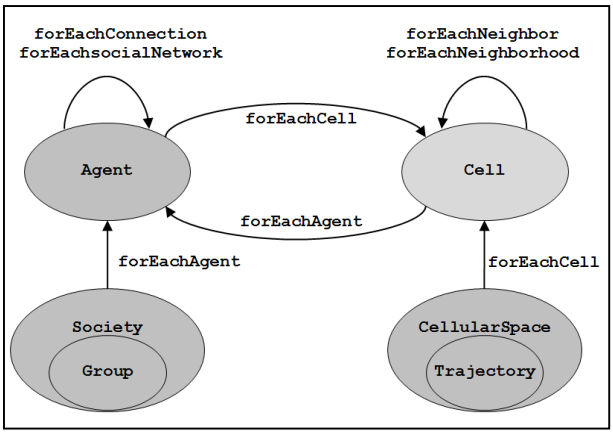

Figura 3.5 - Funções para percorrer as relações

A solução criada neste trabalho visou atender as demandas de modelos de mudanças de uso e cobertura da terra que envolvem decisões de manipulação e posse de propriedades, no entanto, espera-se que possa ser utilizada também para outros tipos de modelo, hipótese que ainda precisa ser melhor trabalhada. Um modelo envolvendo relações entre produtores rurais e suas propriedades foi desenvolvido para que a solução apresentada fosse avaliada utilizando necessidades reais de modelagem. Este modelo é descrito no capítulo 4.

4 PROVA DE CONCEITO

Para testar e explorar as soluções apresentadas no Capítulo anterior, optou-se por desenvolver um modelo de agentes baseado em dados empíricos para uma das áreas de estudo do Projeto LUA (*Land Use Change in Amazonia: Institutional Analysis and Modelling at multiple temporal and spatial scales*, no contexto do Programa de Mudanças Climáticas da FAPESP) e *Model* AGER/NÓMOS (REDE GEOMA/CNPq), nos quais esta dissertação se enquadra. A área de estudo selecionada corresponde à parte do município de Santarém, no Estado do Pará, como descrito na seção 4.1.

A Seção 4.2 apresenta o objetivo do modelo neste contexto. A Seção 4.3 detalha o desenvolvimento conceitual do modelo. A Seção 4.4 apresenta a implementação em ambiente TerraME, e a parametrização dos agentes para fins desta dissertação. Por fim, a Seção 4.5 apresenta e discute os resultados do modelo.

4.1. Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Santarém, no Oeste do Estado do Pará. Santarém é uma cidade que data do período colonial (REIS, 1979), localizada às margens do Rio Amazonas. Em Santarém se inicia a rodovia BR 163, que a liga Cuiabá, em processo de pavimentação. A escolha da área de estudo se justifica pelo intenso processo de dinâmica de uso da terra, ocorrido nos municípios de Santarém e na vizinha Belterra, a partir do final da década de 1990, com a chegada de agricultores capitalizados voltados para o cultivo de grãos, em especial, a soja e o arroz. Esses agricultores, vindos em geral do Centro-oeste e Sul do país foram atraídos principalmente pelas condições de relevo e acessibilidade a mercados (ZEE, 2005). O processo é impulsionado quando se instala um porto em Santarém a partir de 2002, num processo conturbado devido à pressão ambiental, visando principalmente o escoamento da produção de soja Centro-Oeste pelo Rio Amazonas.

Essa dinâmica contribuiu para um reordenamento do espaço agrário local (STARWARD, 2004; D'ANTONA, 2006), promovendo a substituição da pequena pela grande propriedade e o estímulo ao desmatamento (COELHO, 2009; VENTURIERI et al., 2007). Até então, a paisagem nessa região era dominada por comunidades que tinham por base a agricultura familiar. A substituição da agricultura familiar pela mecanizada se dá através de um intenso processo de compra de lotes de pequenos agricultores, em especial nas áreas planas do planalto de Santarém (MONTEIRO, 2004; ZEE,2005).

Coelho (2009) realizou uma análise dessa dinâmica através da análise multi-temporal de imagens (Figura 4.1). No período inicial (1999-2004), a maior porcentagem da conversão para agricultura mecanizada ocorreu em áreas de agricultura familiar, seguida por antigas áreas de pastagem, capoeira e floresta primária. Num segundo momento (2004-2007), a maior proporção da conversão ocorreu em áreas de floresta. Este processo foi bastante intenso até 2005-2006 quando a pressão dos movimentos ambientalista e social, ações de governo para contenção do desmatamento, aliado a fatores relacionados ao preço dos insumos (de acordo com entrevistas com produtores), diminuíram o ritmo do avanço da agricultura mecanizada na região, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.2. Em 2006 foi assinado a Moratória da Soja (GTS, 2008), acordo entre entidades privadas, governamentais e da sociedade civil que restringe a compra de soja de áreas desmatadas.

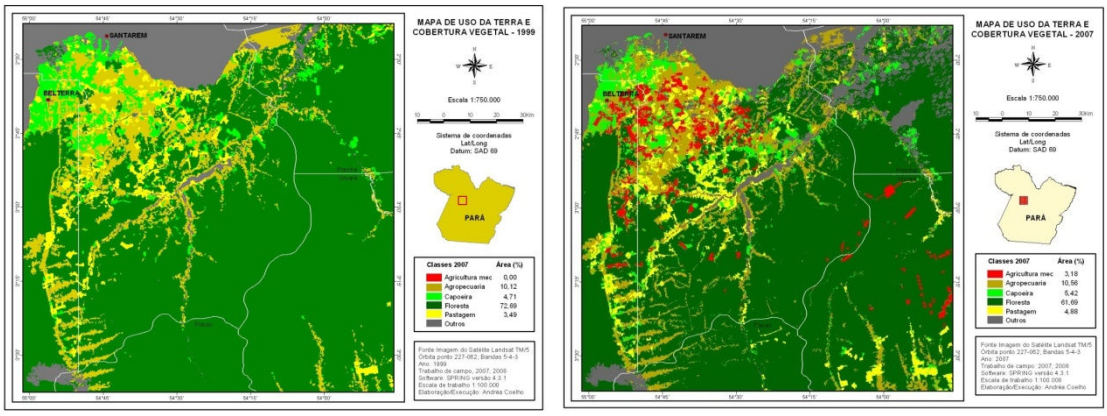

Figura 4.1 - Mapas de uso da terra no leste de Santarém: 1999 e 2007

Fonte: Coelho, 2009

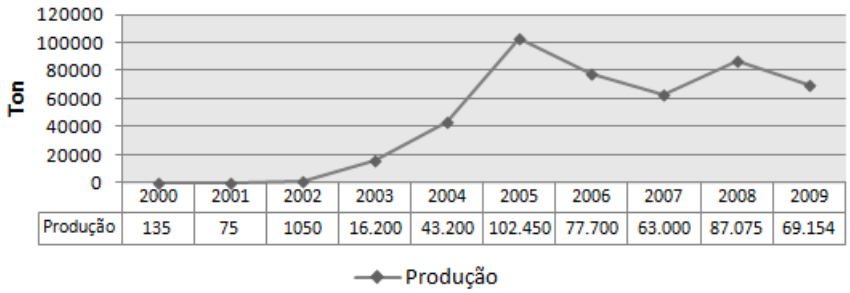

Figura 4.2 - Dinâmica da produção de soja em Santarém/Belterra

Uma das conseqüências da dinâmica de substituição da agricultura familiar pela mecanizada foi o processo de enfraquecimento gradual das comunidades existentes na área, culminando na extinção de muitas delas (CANTO et al., 2008.; MONTEIRO, 2004). A decisão de venda dos lotes está associada ao gradativo aumento do preço da terra, aliado ao problema da poluição causada pelos pesticidas, assim como a perda de serviços (escolas, igreja) e do tecido social (campo de futebol, amigos) das comunidades, na medida em que os lotes são vendidos, conforme foi verificado nas entrevistas feitas em trabalhos de campo. Existem relatos de intimidação e violência em algumas comunidades. Estes pequenos que venderam suas propriedades para a produção de grãos, em parte migraram para áreas urbanas (GAVLAK, 2011), em parte para outras áreas rurais dentro do município. De acordo com Coelho (2009), ocorre um deslocamento da agricultura familiar, e a ordem de grandeza em área permanece similar.

A Figura 4.3 ilustra um mapa das comunidades afetadas na região, de acordo com o Greenpeace (2008). Como pode ser observado no mapa, este processo não foi homogêneo, sendo que algumas comunidades se mostraram mais resistentes, mesmo estando em áreas valorizadas, enquanto outras muito próximas desapareceram. Este estudo foi, portanto, sistematizado através da construção de um modelo de agentes para o problema em questão, como discutido a seguir.

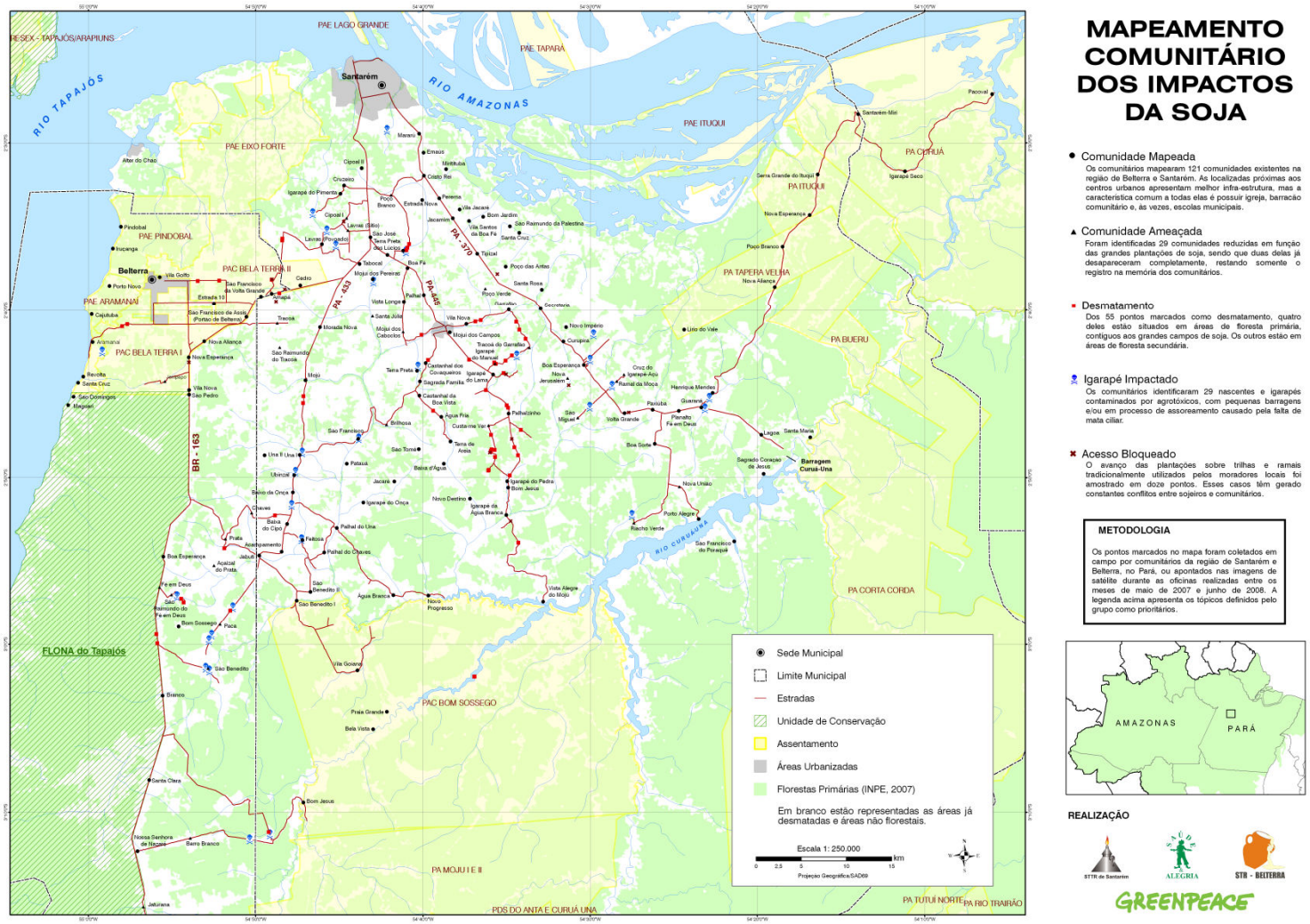

Figura 4.3 - Mapa das comunidades afetadas pela expansão da soja na região de Santarém

4.2. Objetivo do Modelo

O modelo desenvolvido como prova de conceito nesta dissertação tem por objetivo representar relações entre os pequenos produtores, comunidades e agricultores capitalizados no contexto discutido na seção anterior, simulando a dinâmica fundiária e de uso da terra resultantes em algumas comunidades selecionadas.

O desenvolvimento do modelo se deu em duas etapas. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo conceitual dos agentes e relações entre eles e o espaço, como detalhado na Seção 4.3. Este modelo conceitual foi desenvolvido em parceria com uma equipe multidisciplinar de pesquisadores dos projetos LUA/FAPESP e GEOMA. Um das questões desses projetos é entender quais os fatores que distinguem as comunidades que resistiram ou foram extintas. Uma das hipóteses sendo analisadas é o capital social da comunidade (Brondízio et al., 2009), representado pelas relações entre os agricultores em uma comunidade. Portanto, um objetivo secundário do modelo desenvolvido é dar os subsídios para pesquisas que busquem explorar tais hipóteses. Deste modo, buscou-se definir junto com os pesquisadores, quais as principais relações e fatores (sociais e ambientais) a serem incluídos na decisão de venda dos lotes pelos pequenos agricultores.

No modelo proposto, os pequenos produtores rurais, em cujos lotes mantinham pequenas culturas, vendem suas terras para grandes produtores para o plantio de soja. A diminuição da população na comunidade acarreta um processo de enfraquecimento de sua estrutura que faz com que, cada vez mais, pequenos produtores rurais vendam suas terras e deixem seus lotes, enfraquecendo-as ainda mais em um ciclo que quando intensificado pode culminar no desaparecimento da comunidade.

A segunda etapa do desenvolvimento do modelo consistiu da implementação do mesmo em TerraME, detalhada na Seção 3.4. Para fins desta dissertação, foram selecionadas três comunidades situadas na Gleba Mojui dos Campos, para a qual o projeto possuía dados cadastrais anteriores a 1999, assim como a localização das propriedades cadastradas pela Moratória da soja em 2006

(Figura 4.4). As três comunidades selecionadas possuem características distintas em relação à proporção de lotes vendidos (Mutum, Ubizal e Jaboti) em 1999.

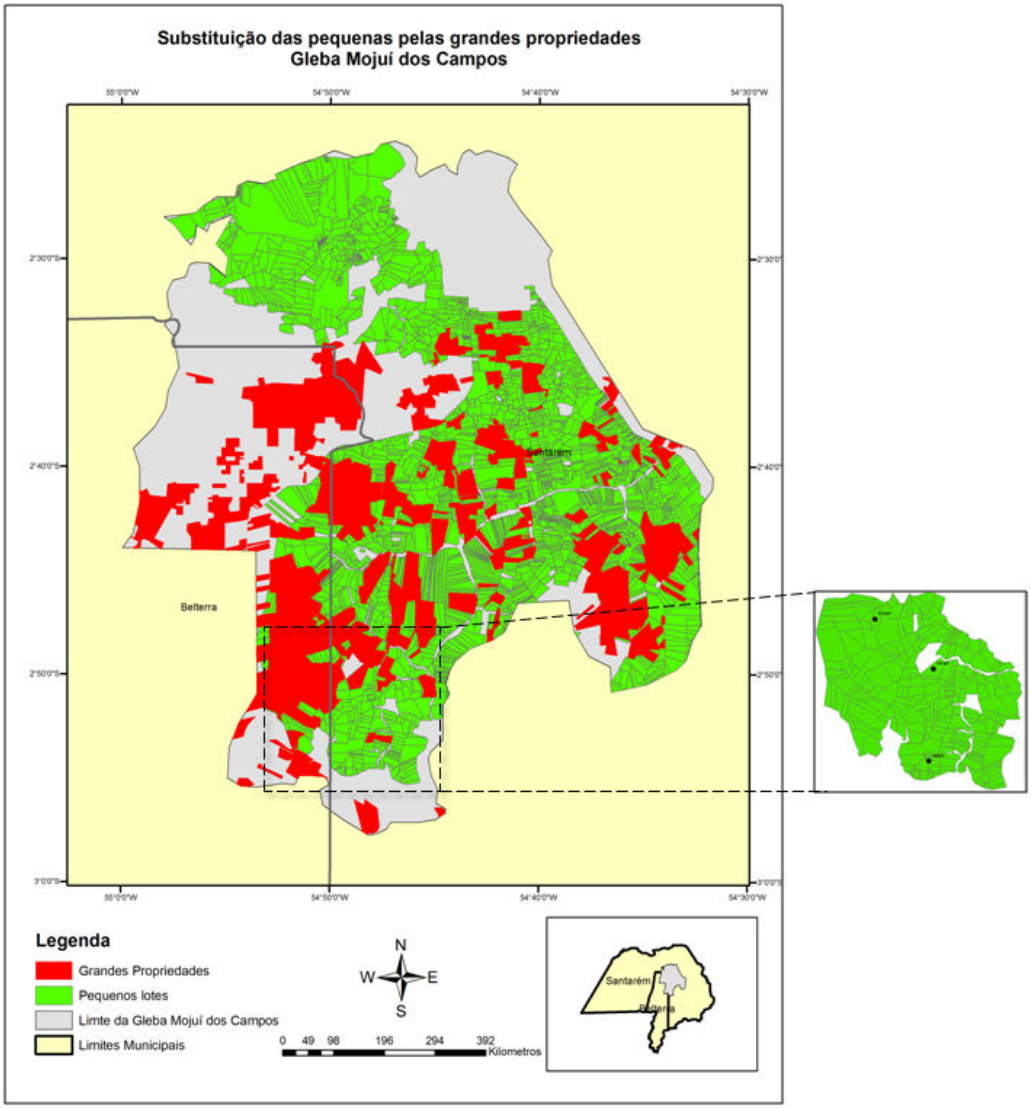

Figura 4.4 - Recorte da área

O objetivo não é validar o modelo, dado que as pesquisas de campo para parametrização dos agentes estão em estágio inicial, mas explorar as relações e soluções discutidas no Capítulo 3 com base em um problema real. A seção 4.5 apresenta e discute os resultados desta implementação.

4.3. Desenvolvimento conceitual do modelo

O desenvolvimento conceitual do modelo consiste da definição dos: (i) espaços celulares e agentes (atores), seus atributos e comportamento; (ii) as relações dos agentes entre si e com os espaços celulares e; (ii) os processos de tomadas de decisão dos agentes.

4.3.1. Agentes e o Espaço

Foram *definidas* as características e ações de três agentes, mostrados na Tabela 4.1: *pequeno produtor*, que representa a unidade familiar residente em um determinado lote; *comunidade*, que agrega um conjunto de pequenos produtores e gerencia a infraestrutura e serviços comuns; e o *grande produtor* interessado em comprar novas terras para a plantação de soja.

Tabela 4. 1 - Agentes, seus atributos e ações

Agente	Atributos	Ações	Mensagens enviadas
Pequeno Produtor	– Número de pessoas no lote – Titulação de seu lote – Igreja a qual pertence – Família a qual pertence	– Manter agricultura de subsistência – Ao receber uma mensagem com proposta de compra do grande produtor, avalia as condições da oferta, do lote e da comunidade, e decide vender ou não a propriedade.	– Para comunidade solicitando informações sobre suas condições. – Para o grande produtor, com decisão de venda ou não.
Grande Produtor	– Capital – Grau de importância na escolha dos lotes de: (1) proximidade a estrada; (2) existência de titulação; (3) declividade – Contigüidade dos lotes	– Escolhe os lotes de interesse, e faz proposta de compra para dono do lote. – Compra o lote, em caso de resposta positiva do pequeno produtor – Plantar soja e arroz	– Proposta de compra para pequenos produtores, com valor a ser pago.
Comunidade	– Idade da comunidade – Ligação com movimento social – Infra-estrutura e serviços. Existência de: (1) escola; (2) igreja; (3) barracão; (4) time de futebol; (5) energia elétrica; (6) acesso a água.	– Modifica sua infraesturura e serviços, de acordo com dinâmica de venda dos lotes e diminuição da população.	– Quando solicitado, manda mensagem para o pequeno produtor informando seu índice de infraestrutura

O objetivo do *grande produtor* é comprar novos lotes e para isto escolhe a região de seu interesse e faz propostas de compras para os donos dos lotes nos quais está interessado. Caso receba respostas negativas de modo que não consiga comprar a quantidade desejada ele aumenta a oferta no passo de tempo subseqüente, escolhe novamente os lotes, tantos quantos seu capital permitir, e refaz a proposta. O preço do lote é definido através de uma curva linear em função do tempo de simulação que calcula o valor do hectare. Ele repete este procedimento até que consiga investir todo o seu capital.

O agente *pequeno produtor* apenas reage à proposta de compra do *grande produtor* verificando suas condições de vida dentro de sua propriedade e de sua *comunidade* e confrontando-as com o valor da oferta recebida. Para isso ele sabe o seu número de pessoas, a família e religião as quais pertence (que irão compor suas redes familiar e religiosa, respectivamente), a situação legal de seu lote e pode ponderar esses fatores e os atributos atuais de sua *comunidade* para tomar sua decisão. Caso a proposta seja atrativa o suficiente ele vende o lote, caso contrário ele a rejeita.

A *comunidade* possui um conjunto de atributos que a caracterizam: energia elétrica, acesso a água, time de futebol, barracão, escola e igreja, histórico de movimento social e idade. Ela percebe as modificações no número de *pequenos produtores* que a compõe e vai enfraquecendo a sua estrutura na medida em que perde população.

O ambiente de interação destes agentes é o conjunto de lotes correspondentes as suas propriedades, analisado em duas resoluções, sendo que uma considera cada lote uma célula como mostrado na Figura 4.5a (que denominaremos "*lotes*") e outra, mais refinada, que divide esses lotes em células regulares de 100x100m, ou seja, um hectare, que denominaremos "*células*" (Figura 4.5b). Estes dois espaços celulares, cujos atributos são mostrados na tabela 4.2, se relacionam entre si e com os agentes. Utilizados em conjunto eles aumentam a flexibilidade do modelo, já que algumas características podem ser verificadas em uma escala mais grosseira e outras podem ser observadas com maior nível de detalhes, de acordo com as necessidades específicas de cada caso.

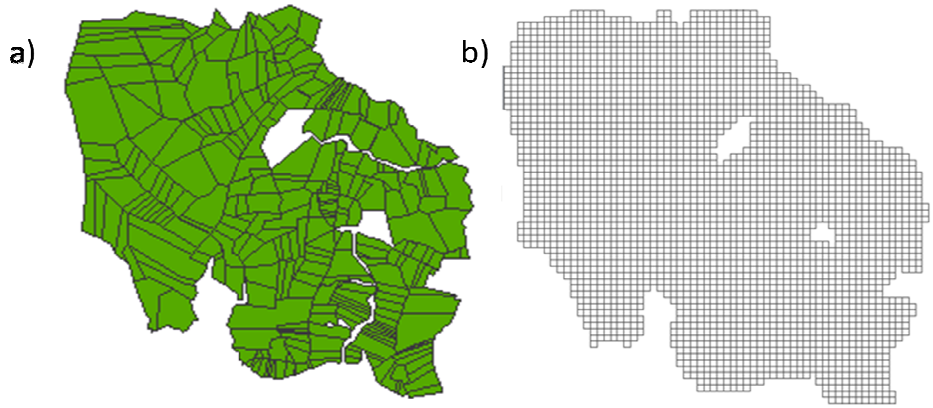

Figura 4.5 - Ambiente de interação do agente. a) Espaço celular irregular onde cada lote representa uma célula. b) Espaço celular regular de um hectare cada célula.

Tabela 4.2 - Células e seus atributos

Espaço Celular	Atributos
Lotes	- Titulação - Vendido (1 se foi vendido)
Células	- uso da terra 1999 - uso da terra 2004 - uso da terra 2007 - declividade - distância às estradas - distância à BR

O diagrama de atividades da Figura 4.6 descreve a dinâmica do modelo propiciando uma visão geral.

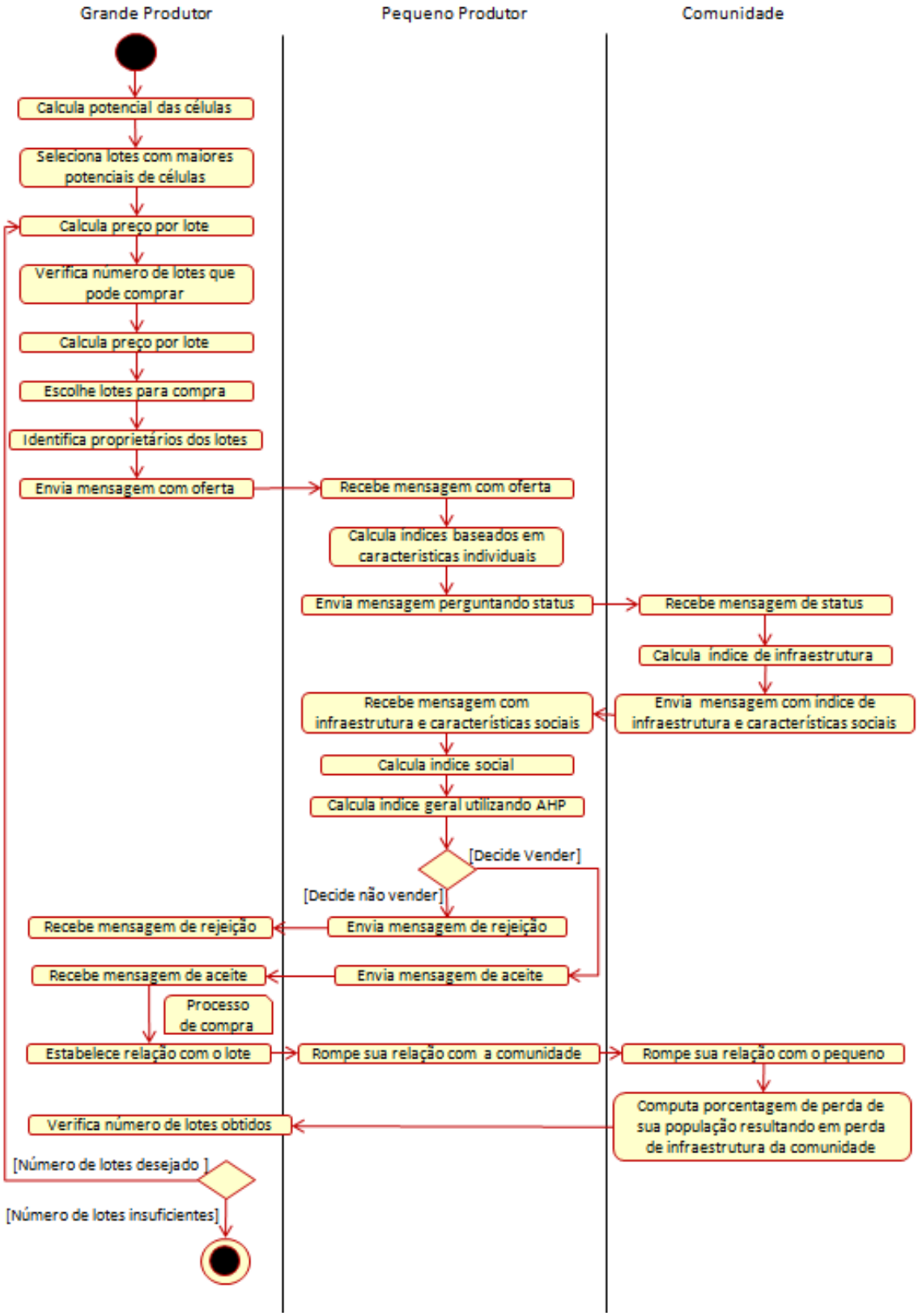

Figura 4.6 - Visão geral do modelo: Diagrama de atividades

4.3.2. Relações

Na configuração inicial do modelo, cada um dos *pequenos produtores* se relaciona com a *comunidade* na qual estão inseridos, e com seus *lotes*, como ilustra a Figura 4.7. Além disso, se relaciona com outros *pequenos produtores* que freqüentam a mesma igreja, que pertencem à mesma família e ainda através das relações de vizinhança estabelecidas a partir da vizinhança entre seus *lotes*.

Cada *comunidade*, por sua vez, se relaciona com os *pequenos produtores* que a constituem. Os *lotes* possuem relação com o *pequeno produtor* que o controla e com as *células* que o compõem e com os *lotes* vizinhos. Por último, cada *célula* se relaciona com o *lote* ao qual pertence e com as *células* vizinhas.

Figura 4.7 - Relações iniciais do modelo

Quando um *lote* é vendido para um *grande produtor* algumas relações são alteradas: a relações entre o *pequeno produtor* e seu *lote* são rompidas, bem como as relações entre ele e seus vizinhos, e sua *comunidade*. Além disso, são criadas as relações entre o *grande produtor* e o *lote*. A compra do *lote*, no entanto, não faz com que sejam estabelecidas relações entre o *grande produtor*, novo proprietário do *lote*, com a *comunidade*. Esta dinâmica é

mostrada na Figura 4.8, onde as setas em cinza representam as relações que foram rompidas e as setas em preto as novas.

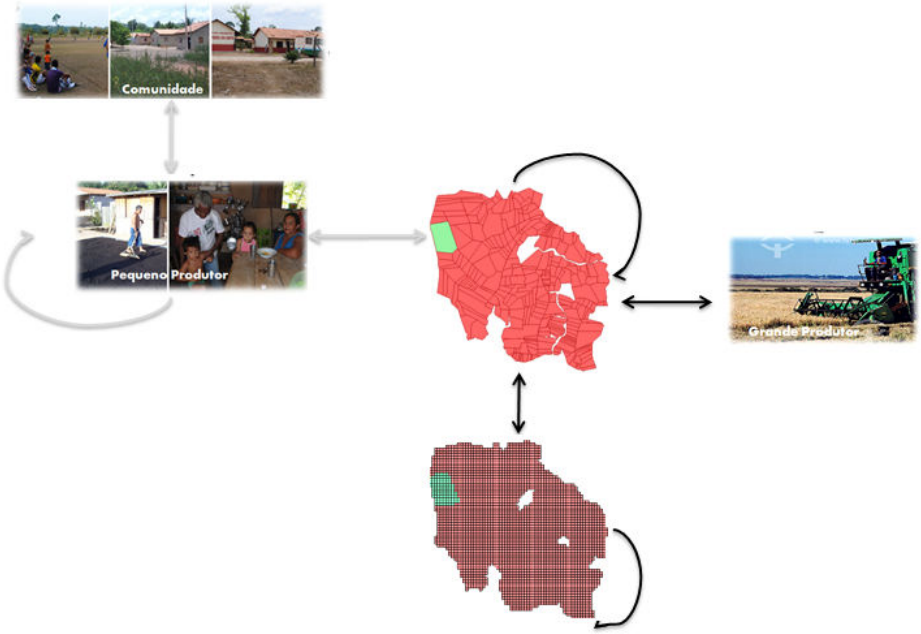

Figura 4.8 - Novas relações do modelo em decorrência da venda do lote

A Tabela 4.3 mostra todas as relações que se formam ao longo do modelo.

Tabela 4.3 - Relações entre as entidades

Entidade 1	**Relação**	**Entidade 2**	**Tipo de Relação**
Pequeno Produtor	Vizinho, MesmaFamilia, MesmaIgreja Pertence Possui	Pequeno Produtor Comunidade Lote	*Social Network* (Agente-Agente) *Social Network* (Agente-Agente) *Placement* (Agente-Célula)
Grande Produtor	Possui	Lote	*Placement* (Agente-Célula)
Comunidade	Agrega	Pequeno Produtor	*Social Network* (Agente-Agente)
Lote	Vizinho Pertence Pertence Possui	Lote Pequeno Produtor Grande Produtor Célula	*Neighbourhood* (Célula-Célula) *Placement* (Célula-Agente) *Placement* (Célula-Agente) *Neighbourhood* (Célula-Célula)
Célula	Vizinho	Célula	*Neighbourhood* (Célula-Célula)

Algumas simplificações foram adotadas para melhor definição do modelo. Foram elas:

a. Foi considerado que o os *lotes* vendidos para os *grandes produtores* tem seu uso convertido necessariamente em soja.
b. Os *grandes produtores* compram apenas lotes que ainda pertencem a *pequenos produtores.*
c. Os *grandes produtores* se relacionam apenas com seus *lotes* não estabelecendo relações com nenhum tipo de agente.

4.3.3. Modelos de Decisão

Para que a venda de um *lote* aconteça é necessário que um *grande produtor* escolha comprar este *lote* e que o *pequeno produtor* que o possui decida vendê-lo, baseado na observação da sua situação dentro de seu *lote* e na resposta dada pela *comunidade* sobre a sua situação. Um conjunto de fatores norteia estas decisões, referentes tanto à escolha dos *lotes* quanto à sua venda, e para que estes fossem levantados e organizados de modo a entender os dois processos de tomada de decisão, foram realizadas várias reuniões para discussão do tema com especialistas, além da utilização de revisão da literatura e conhecimentos adquiridos em trabalhos de campo realizados na região. Ambos os processos são detalhados a seguir.

4.3.3.1 Escolha do lote pelo grande produtor

Quando um *grande produtor* chega em busca de novos *lotes* ele inicia a sua escolha pelo conjunto de *células* (preferencialmente contíguas) de maior interesse a partir de uma análise que leva em consideração a declividade, distância mínima à estradas, a distância a BR 163 e o capital que possui. Para que ele possa reconhecer as melhores células é criado um índice a partir destes fatores. Este índice é a média ponderada dessas variáveis normalizadas, como mostrado abaixo, onde os pesos que o agente atribui a cada uma delas é parte de seu conjunto de atributos. A este índice é somada ainda a razão de lotes vizinhos pertencentes a este mesmo grande produtor.

```
Escolha do lote =  peso_declividade x declividade_normalizada +
                 + peso_distancia_a_estrada x distancia_a_estrada_nomalizada +
                 + peso_br x distancia_a_br_nomalizada
```

O agente escolhe então os *lotes* que possuem maiores índices, ou seja, os *lotes* cujas somas dos índices de suas células sejam maiores. A quantidade de *lotes* escolhidos irá depender do capital que ele tem disponível.

4.4. Venda do lote pelo pequeno produtor

Quando o *pequeno produtor* recebe uma proposta de compra de seu *lote* ele precisa verificar quão atrativa ela é frente às suas condições atuais na *comunidade* e dentro de seu próprio *lote* e então decidir se a venda é a melhor opção. Para isto este agente analisa quatro aspectos principais que são confrontados com o valor oferecido por sua terra: a qualidade ambiental de sua propriedade, que é inversamente proporcional a poluição na mesma; sua situação econômica, baseada no que ele consegue produzir em seu lote para a sua subsistência; a infraestrutura da *comunidade* a qual pertence e a questão social, onde são consideradas a sua rede de vizinhos, família e religião dentro da *comunidade*, além da idade e histórico de movimento social desta *comunidade*.

Para que o agente possa quantificar sua situação são criados indicadores, descritos abaixo, para cada um dos aspectos citados, os quais serão agregados posteriormente, para fundamentar a sua decisão. O indicador resultante é uma ponderação de quão boa está a sua condição de vida no local atual e o valor que lhe está sendo oferecido por sua propriedade (forçante negativa deste índice). Quanto mais próximo de 1 maior sua resistência à oferta do *grande produtor*.

Ambiental: inversamente proporcional ao número de *lotes* vizinhos do agente que foram vendidos para *grandes produtores*. Considera-se que todas as terras vendidas tem seu uso convertido para plantação mecanizada de soja.

Econômico: f(x) = log(x), onde x é a quantidade de pessoas que compõem a unidade familiar, ou seja, o número de pessoas deste *pequeno produtor* (CHAYANOV, 1974).

Infraestrutura: considera-se inicialmente as condições da *comunidade* a qual o agente pertence, utilizando a média simples de seus atributos.

$$\text{Infraestrutura} = 1/6 \; \Sigma \; \text{Ind}(x),\ x \epsilon \{\text{escola, igreja, barracão, time de futebol, água, energia}\}$$
$$\text{Ind}: R \rightarrow \{0,1\}$$

Este índice considera a população inicial da *comunidade* e na medida em que a população diminui com relação à inicial este índice vai decaindo, segundo o gráfico da Figura 4.9.

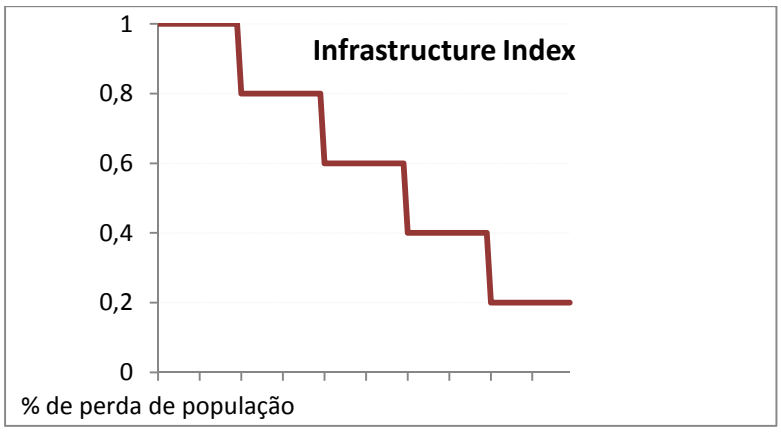

Figura 4.9 - Decaimento da infraestrutura da *comunidade* em função da perda de sua população

Social: média simples dos fatores de influência. Estes representam características da *comunidade* e relações importantes entre o agente e outros *pequenos produtores*. São eles:

- Idade: tempo de existência da *comunidade*. Foram consideradas antigas as *comunidades* com mais de 10 anos e novas as demais. Na construção do índice foi atribuído 1 às antigas e 0 às novas, considerando-se que há um maior envolvimento do agente com sua *comunidade* quando ela é mais antiga.

- Histórico de movimento social: foi inferido ainda que em *comunidades* onde haja histórico de movimento social os *pequenos produtores* são menos susceptíveis aos estímulos para deixar sua propriedade. Dessa forma foi atribuído índice 1 para *comunidades* com histórico de movimento social e 0 em caso contrário.
- Número de vizinhos: na medida em que há uma perda da quantidade de vizinhos da comunidade o agente vai ficando isolado e por isso mais sujeito a vender a seu *lote*. Desta forma este índice é composto pela razão entre o número atual de vizinhos da *comunidade* e seu número inicial.

$$\text{Vizinhos: } \frac{\text{número atual de vizinhos da comunidade}}{\text{número inicial de vizinhos da comunidade}}$$

- Número de pessoas da mesma igreja: similar a relação com os vizinhos, a medida em que as pessoas que frequentam a mesma igreja diminui o agente reduz sua ligação com a *comunidade*. Assim, este índice é a razão entre o número atual de pessoas da mesma igreja e sua quantidade inicial. No entanto, se a pessoa não frequenta nenhuma igreja ela é indiferente às mudanças neste aspecto, logo este seu índice é constante em 1.

$$\text{Igreja: } \frac{\text{número atual de agentes da mesma igreja na comunidade}}{\text{número inicial de agentes da mesma igreja na comunidade}}$$

- Número de pessoas da mesma família: diferentemente dos indicadores de vizinhos e igreja, nesta construção não foi considerada a quantidade inicial, mas o número de agentes da maior família, partindo-se do pressuposto que agentes que tem família muito pequena com relação às famílias predominantes na comunidade possuem menor ligação com a comunidade, quando analisado este aspecto.

$$\text{Família: } \frac{\text{número atual de agentes da mesma família na comunidade}}{\text{número máximo de agentes de mesma família na comunidade}}$$

Uma vez criados esses indicadores eles precisam ser agregados de forma a gerar um único índice que possa definir a decisão do agente. Para isto foi utilizado o conceito de AHP (Processo Hierárquico Analítico) desenvolvido por Saaty (1980). O processo de tomada de decisão baseado em AHP pode ser utilizado quando existem diferentes fatores que contribuem para uma determinada decisão e deseja-se saber a contribuição relativa de cada um deles. Para isto, é feito uma escolha baseada na lógica de comparação pareada, ou seja, os fatores são comparados dois a dois e um peso é atribuído a este relacionamento. O peso de cada um dos fatores permite a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia definida. A intensidade dessa importância relativa é medida por um valor que pode variar de 1 a 9, segundo descrito na Tabela 4.4:

Tabela 4.4- Escala de importância relativa de Saaty (2005).

Escala	Peso
Extremamente preferido	9
Muito forte a extremo	8
Muito fortemente preferido	7
Forte a muito forte	6
Fortemente preferido	5
Moderado a forte	4
Moderadamente preferido	3
Igual a moderado	2
Igualmente preferido	1

É construída, então, uma matriz onde cada um dos cada elemento $M_{i,j}$ é o peso referente a comparação entre os fatores i e j. A ordem de prioridades e seus respectivos pesos de influência sobre a decisão são obtidos a partir do autovetor desta matriz e a medida de consistência do julgamento é obtida a partir de seu autovetor. Quanto mais próxima de zero maior a consistência do julgamento.

Essa capacidade de conversão de dados empíricos em modelos matemáticos é a principal vantagem do AHP com relação a outras técnicas para comparação

entre múltiplos critérios, sendo possível quantificar o processo de tomada de decisão do agente, mensurando a proporção dos fatores que influenciam sua decisão. O AHP permite que o agente faça um julgamento consistente dos pares, propiciando informação para cumprir pré-requisitos metodológicos (KNOERI, 2011) decidindo racionalmente ao invés de usar heurísticas simples (JOHNSON et al., 1988).

4.5. Implementação no TerraME

Para a construção do modelo foi considerada uma resolução temporal semestral, com início no primeiro semestre de 1999, início do processo de expansão da soja em Santarém e fim no segundo semestre de 2006, a partir de onde é observada uma desaceleração deste processo.

4.5.1. Criação dos espaços celulares

Foram utilizados como base para realizar as simulações o dado de lotes da Gleba Mojuí dos Campos e um dado vetorial contendo pontos indicando a localização de cada comunidade nesta gleba. Os limites de cada comunidade, apresentados na Figura 4.10, foram estimados através da construção de uma GPM (AGUIAR et al., 2003) utilizando a proximidade entre os lotes. Observando-se o limite das comunidades estimado e o mapa de distribuição fundiária de 2006, podem-se perceber três comportamentos distintos: uma comunidade extinguiu-se (Mutum), uma resistiu parcialmente (Ubizal) e outra resistiu (Jaboti).

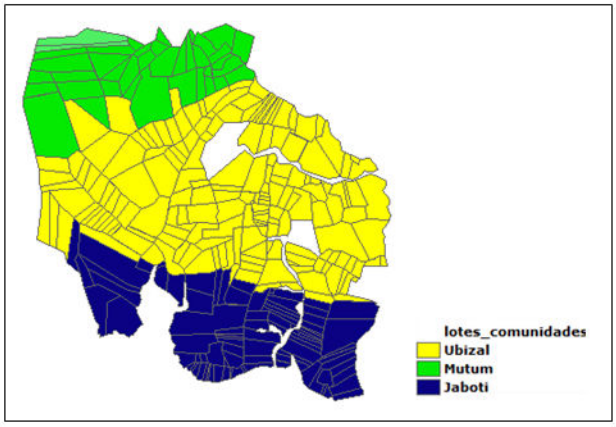

Figura 4.10 - Limites entre as comunidades

A partir da delimitação da área de estudo foram definidos dois espaços celulares: o primeiro, irregular, baseado no dado vetorial de limites dos lotes, onde cada célula representa um lote. O segundo é um espaço celular regular com células de 100x100 metros gerado utilizando-se como máscara o primeiro. Estes dois espaços são relacionadas através de uma GPM (AGUIAR et al., 2003; MOREIRA et al., 2008) onde cada célula regular se relaciona com a célula irregular na qual está contida totalmente ou em sua maior parte (Figura 4.11).

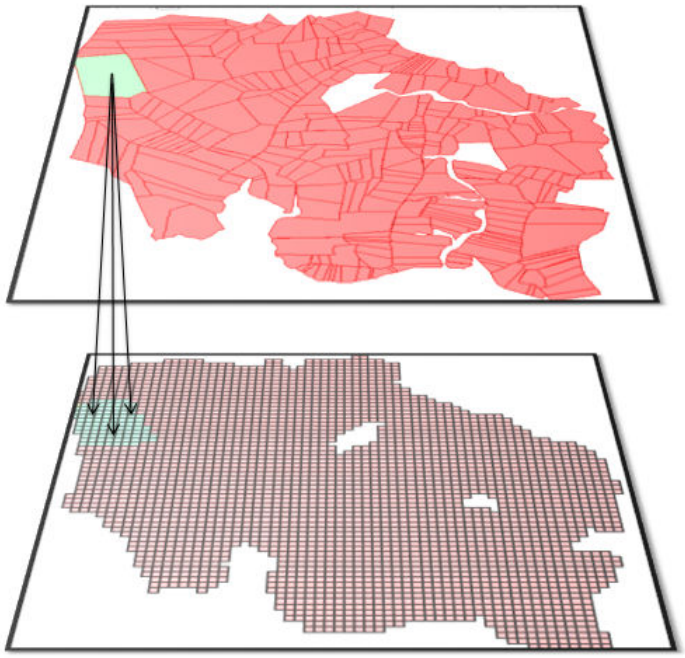

Figura 4.11 - Relação entre os dois espaços celulares

4.5.2. Criação dos agentes e dinâmica do modelo

Foi criada uma sociedade contendo 304 agentes de tipo *pequeno produtor*, onde cada um se relaciona com uma das 304 propriedades contidas no mapa de lotes inicial. Cada um desses agentes foi criado com seus atributos específicos de família titulação da terra, número de pessoas e religião. Também foi criada uma sociedade de três *comunidades* com atributos de existência de escola, igreja, barracão, time de futebol, energia elétrica e abastecimento de água.

Ambas as sociedades e os espaços celulares foram adicionados ao *environment,* conforme mostrado na Figura 4.12.

```
-- Criação das sociedades

pequenos = Society{file = "pequenos.csv", id = "agent_id", builder = criaPequenos}
comunidades = Society{file ="comunidades.csv", id = "comunidade_id", builder = criaComunidades}

-- Carregamento das entidades para dentro do environment
env = Environment{
          id = "ENV",
          comunidades,
          pequenos,
          celulas,
          lotes,
}
```

Figura 4.12 - Criação das sociedades e carregamento das entidades espaciais

As relações entre as diferentes entidades foram criadas a partir de arquivos .gpm onde foram associadas. Estes foram carregados através das funções *loadSocialNetwork*, para relações entre os agentes (pequenosProdutores-pequenosProdutores, comunidade-comunidades e pequenosProdutores-comunidades, sendo esta última bidirecional), *loadNeighborhood*, para as relações entre células (células-células, lotes-lotes e células-lotes, onde células-lotes é bidirecional), e *loadPlacement* para as relações entre células e agentes (pequenos-lotes e lotes-comunidades, ambas bidirecionais (Figura 4.13).

```
-- Carregamento das relações criadas através dos arquivos .GPM

celulas:loadNeighborhood ("celulas-neighborhood.gpm", "celulas-celulas")
lotes:loadNeighborhood ("lotes-neighborhood.gpm", "lotes-lotes")
env:loadNeighborhood ("celulas-lotes.gpm", "celulas-lotes", true, "lotes-celulas")

env:loadPlacement ("pequenos-lotes.gpm", "pequenos-lotes", true, "lotes-pequenos")
env:loadPlacement ("lotes-comunidades-euclidean.gpm", "lotes-comunidades", true, "comunidades-lotes")

pequenos:loadSocialNetwork ("pequenos-pequenos.gpm", "pequenos-pequenos")
env:loadSocialNetwork ("pequenos-comunidades-euclidean.gpm", "pequenos-comunidades", true, "comunidades-pequenos")
```

Figura 4.13 - Criação das sociedades

Os *grandes produtores* foram criados individualmente, isto porque eles chegaram gradualmente na área. A cada um deles foram atribuídas características individuais de capital e peso dos fatores de escolha dos *lotes*. A partir destes fatores o *grande produtor* pode calcular a atratividade dos lotes, percorrendo as relações com as células regulares em cada um e escolhendo os *lotes* com conjunto de células mais atrativas, através da função *forEachNeighbor,* como mostra a Figura 4.14. Ao escolher os *lotes* de interesse ele localiza o seu dono através da função *forEachAgent e* uma

mensagem de oferta de compra contendo o valor oferecido é enviada ao proprietário de cada um dos *lotes*.

```
forEachNeighbor(lotes, "lotes-celulas", function(cell, neigh)
          pot_conjunto = pot_conjunto + neigh.pot
          count = count + 1
end)
```

Figura 4.14 - Percorrimento das relações entre lotes e células para calcular o potencial do lote, soma dos potenciais das células com ele relacionadas

Ao receberem a mensagem com a oferta de compra os agentes enviam mensagem para a *comunidade* que pertencem, utilizando a função *forEachConnection* (Figura 4.15) para encontrá-la. A *comunidade* responde informando sua condição atual. Ao receber esta resposta o agente pondera suas condições, as informações recebidas da comunidade e a proposta feita pelo *grande produtor* de acordo com o modelo de decisão descrito anteriormente, formando um índice, o qual é comparado com um limiar que define o índice mínimo para que o agente permaneça na *comunidade*, parâmetro do modelo.

```
forEachConnection(agent, "pequenos-comunidades", function(agent, comunidade)
-- manda msg para a comunidade perguntando sobre a infraestrutura
          agent:message{
                    receiver = comunidade,
                    content = "infrastructureIdx",
          }
end)
```

Figura 4.15 - Percorrimento da relação entre *pequenos produtores* e *comunidades*

Caso o índice calculado seja inferior a este limiar o *pequeno produtor* aceita a proposta enviando uma mensagem positiva ao *grande produtor* que reconfigura as relações, como mostrado na Figura 4.16. Isto porque se optou neste trabalho por considerar o *grande produtor* como sendo o agente de maior autonomia, podendo, desta forma, estabelecer as alterações em sua relação com o *pequeno produtor*. Caso a resposta do pequeno seja negativa o *grande produtor* retoma o processo de escolha e tentativa de compra de novos *lotes* enquanto possuir capital para tanto.

```
forEachConnection(peq, "pequenos-comunidades", function(peq, comunidade)
          comun = comunidade
end)
-- Remove a relação entre o pequeno e a comunidade
peq.socialnetworks["pequenos-comunidades"].connections[comun.id]= nil

-- Remove a relação entre o pequeno e a comunidade
comun.socialnetworks["comunidades-pequenos"].connections[peq.id]= nil

--Remove a relação entre o pequeno e o lote
forEachCell(peq["pequenos-lotes"], function(cell)
          cell.vendido = 1 -- status do lote é alterado para vendido

          agent:enter(cell)-- Grande cria relação com o lote
          cell["lotes-pequenos"].agents[1] = nil -- remove o agente da relação com o lote
end)
peq["pequenos-lotes"].cells[1] = nil --remove o lote da relação com o pequeno
```

Figura 4.16 - Reconfiguração das relações em função da compra do lote pelo *grande produtor*

4.5.3. Protocolo de modelagem: parametrização e simulações alternativas

Com o objetivo de analisar o impacto das relações definidas na Tabela 4.3, foi estabelecido o protocolo de simulações, sumarizado na Tabela 4.5. As simulações ocorrem num passo de tempo semestral, em 16 passos. Logo, t0 se refere ao primeiro semestre de 1999, período inicial do modelo e assim sucessivamente de forma que t15 representa o segundo semestre de 2006.

Tabela 4.5 - Parâmetros das simulações

Simulação	Grande produtor	Comunidade	Pequeno Produtor	Limiar de Escolha
S1	Condições iguais	Condições iguais	Condições iguais	0.99
S2	Condições iguais	Condições iguais	Condições iguais	0.6
S3	Condições iguais	Infraestrutura diferente em cada uma das comunidades	Condições iguais	0.6
S4	Condições iguais	Fator social diferente em cada uma das comunidades	Condições iguais	0.6
S5	Condições iguais	Condições iguais	Agentes que frequentam diferentes igrejas ou não frequenta nenhuma delas	0.6

Optou-se nesta dissertação por priorizar a análise do impacto das relações no processo de tomada de decisão de venda dos *lotes* através de variações nos

parâmetros somente dos *pequenos produtores* e *comunidades*. Para este fim, foi inicialmente definido um conjunto uniforme de parâmetros de decisão dos *grandes produtores* (Tabela 4.6) de forma que não houvesse grandes variações na superfície de potencial dos *lotes*, criando um ambiente relativamente homogêneo para exploração do processo de decisão dos *pequenos produtores*, como pode ser verificado na superfície de potencial mostrada na Figura 4.17. Os atributos que influenciam sua decisão contemplaram a importância da declividade para o plantio e do acesso às estradas para escoamento da produção e foram escolhidos com base no trabalho de Coelho (2009).

Tabela 4.6 - Atributos dos Grandes Produtores para simulações.

ID	Capital	Data de Chegada	Fatores de Escolha		
			Declividade	Estradas	BR163
1	300000,00	0	0.4	0.2	0.4
2	100000,00	0	0.4	0.2	0.4
3	100000,00	0	0.4	0.2	0.4
4	300000,00	2	0.4	0.2	0.4
5	100000,00	2	0.4	0.2	0.4
6	100000,00	2	0.4	0.2	0.4
7	300000,00	4	0.4	0.2	0.4
8	100000,00	4	0.4	0.2	0.4
9	100000,00	4	0.4	0.2	0.4
10	100000,00	4	0.4	0.2	0.4

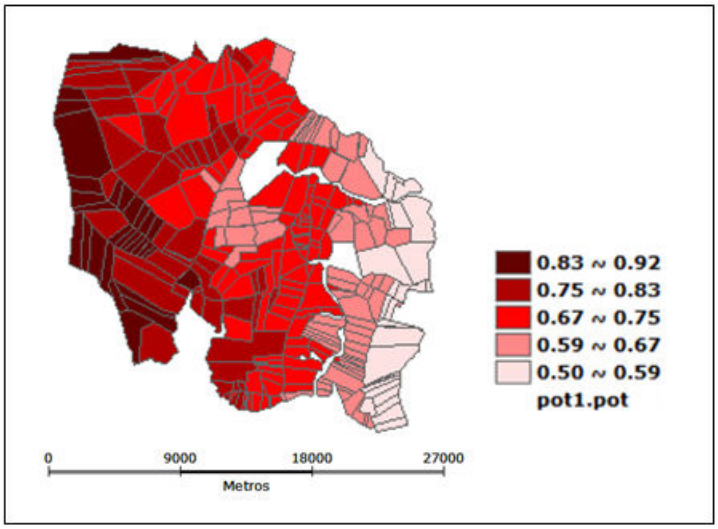

Figura 4.17 - Superfície de potencial de compra dos lotes em t0.

Para trabalhar a resistência do *pequeno produtor*, e avaliar a influência das relações nas suas decisões foram definidos conjuntos de atributos para estes e suas respectivas *comunidades*, permitindo que diferentes simulações pudessem ser executadas.

A simulação S1 teve como objetivo mostrar como seria o processo de entrada do *grande produtor* na área de estudo caso não houvesse a resistência do *pequeno produtor*, por isso o limiar de satisfação do *pequeno produtor*, ou seja, índice mínimo para que o agente resista à oferta de compra do lote, foi definido com 0.99. Para as demais simulações foi definido de forma empírica o limiar de 0.6. Na simulação S2, os *pequenos produtores* possuem condições iguais dentro de seus *lotes* e em sua *comunidade*, com fortes redes de relações sociais, infraestrutura, economia e ambiente. Na simulação S3 os atributos iniciais de infraestrutura das *comunidades* foram alterados, explorando a influência da relação entre o *pequeno produtor* e *comunidade*. Na simulação S4 os atributos de infraestrutura foram considerados iguais em todas as *comunidades*, mas seus fatores sociais foram modificados (movimento social e idade). Em ambos os casos foram atribuídas à *comunidade* 3 (Jaboti) boas condições, à comunidade 1 (Umbizal) condições satisfatórias e à 2 (Mutum) uma situação mais precária. A Tabela 4.7 detalha os parâmetros que diferenciam as simulações em termos das *comunidades*. Em S5 são consideradas novamente boas condições com fortes relações sociais para o *pequeno produtor* dentro do seu *lote* e *comunidade*. No entanto, visando explorar as suas relações sociais, o atributo religião que até então era igual para todos os eles foi diversificado, podendo o *pequeno produtor* ser católico, evangélico ou não freqüentar nenhuma igreja. Desta forma a relação do agente com os outros membros de sua igreja na *comunidade* se altera, passando de uma rede composta por todos os comunitários para redes de influência menores.

Tabela 4.7- Atributos das comunidades nas simulações (as células em cinza mostram os atributos trabalhados em cada simulação)

Simulação	Comunidade	Escola	Igreja	Barracão	Time de Futebol	Energia	Água	Idade	Movimento Social
S1, S2, S5	1,2,3	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	antiga	TRUE
S3	1	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	antiga	TRUE
S3	2	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	antiga	TRUE
S3	3	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	antiga	TRUE
S4	1	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	nova	TRUE
S4	2	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	nova	FALSE
S4	3	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	antiga	TRUE

Os parâmetros de decisão dos pequenos produtores foram combinados formando cinco indicadores: social, infraestrutura, ambiental e econômico, e valor oferecido pela terra (forçante negativa na tomada de decisão), os quais foram agregados utilizando-se AHP. Esta permitiu verificar a importância de cada um dos indicadores obtendo-se um índice geral que norteou a decisão do agente. A matriz construída, que utilizou a hipótese social > preço > econômico > infraestrutura > ambiental, é mostradas na Tabela 4.8 e obteve como resultado as importâncias relativas apresentadas na Tabela 4.9 com razão de consistência 0.060.

Tabela 4.8 - Matriz de comparação entre os indicadores

	Ambiental	Econômico	Social	Infraestrutura	Preço
Ambiental	1	1/2	1/3	1/2	1/3
Econômico		1	1/2	2	2
Social			1	2	3
Infraestrutura				1	1/3
Preço					1

Tabela 4.9 - Importâncias relativas dos indicadores obtidos a partir da construção da AHP

FATOR	PESO
ambiental	0.087
econômico	0.171
infraestrutura	0.125
social	0.366
preço	0.251

As variações nos resultados entre as simulações serão obtidas principalmente pelo impacto nos índices de infraestutura (simulação S3) e social (simulação S4 e S5).

4.6. Resultados

A Figura 4.18 mostra a divisão das comunidades para auxiliar a visualização dos resultados finais das simulações apresentados no mapa da Figura 4.19. Estes resultados são detalhados no Apêndice A, onde a dinâmica de venda dos *lotes* ao longo do tempo para cada uma das simulações pode ser verificada. Ao analisar os mapas finais resultantes das simulações e o gráfico da Figura 4.20 que mostra a porcentagem de *lotes* vendida por comunidade em cada uma das simulações, observa-se que as relações são determinantes no processo de tomada de decisões dos agentes, sendo possível observar diferenças tanto na quantidade quanto nos padrões de *lotes* vendidos ao final da simulação e de conversões de usos da terra ocasionados pela venda dos mesmos. Em S1 onde não houve resistência do *pequeno produtor* praticamente toda a área foi comprada, sendo o processo limitado apenas pelo capital do *grande produtor*. Já em S2 onde os *pequenos produtores* apresentavam atributos com boas condições para sua permanência nos seus respectivos *lotes* e fortes redes sociais observa-se um grau máximo de resistência ao processo de compra pelos *grandes produtores* em todas as *comunidades*. Comportamento muito semelhante foi encontrado em S5, onde apesar de um enfraquecimento relativo nos índices sociais dos agentes não houve grande impacto nos resultados finais com relação a S2, visto que este índice é composto pela média aritmética

de 5 componentes, onde religião é apenas um deles. S3 e S4 apresentaram diferenças nos padrões e na quantidade de *lotes* vendidos em cada *comunidade*, sendo que as *comunidades* as quais foram atribuídas melhores condições iniciais mostraram maior resistência como pode ser verificado no gráfico da Figura 4.19.

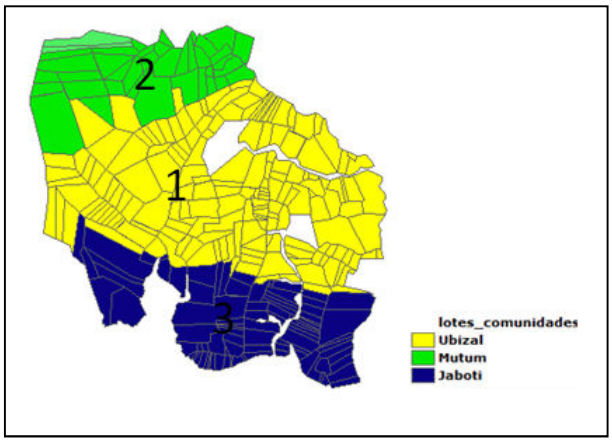

Figura 4.18 - Divisão entre as comunidades

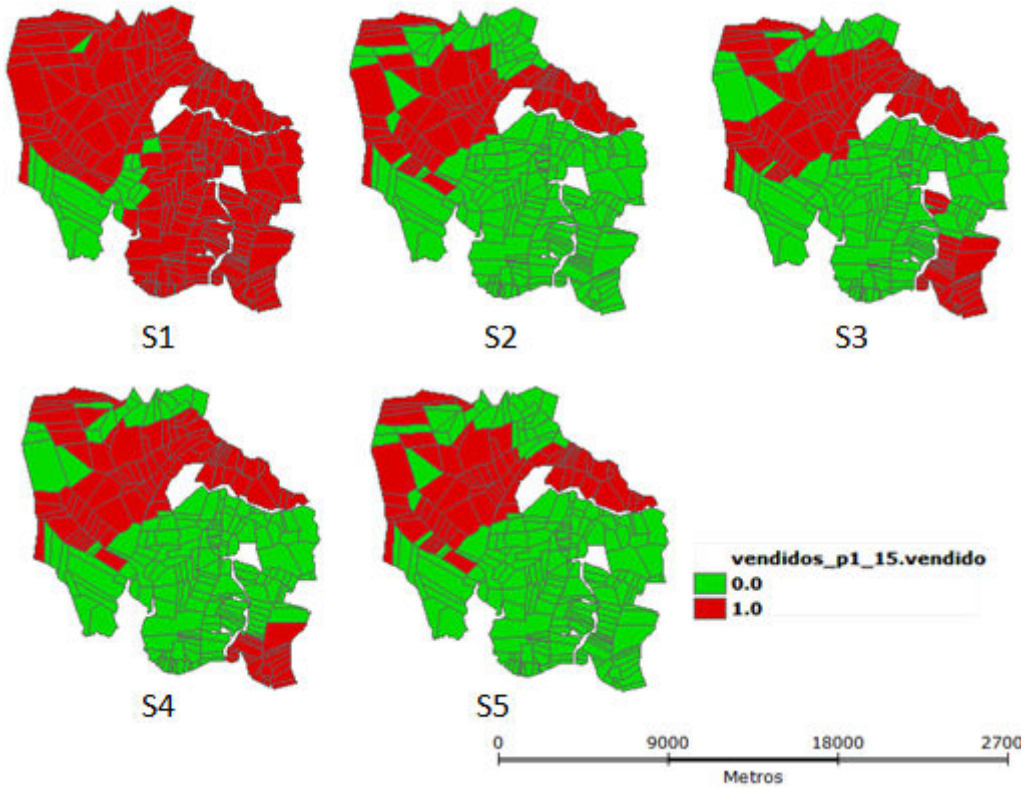

Figura 4.19 - Comparação entre os resultados das diferentes simulações do modelo

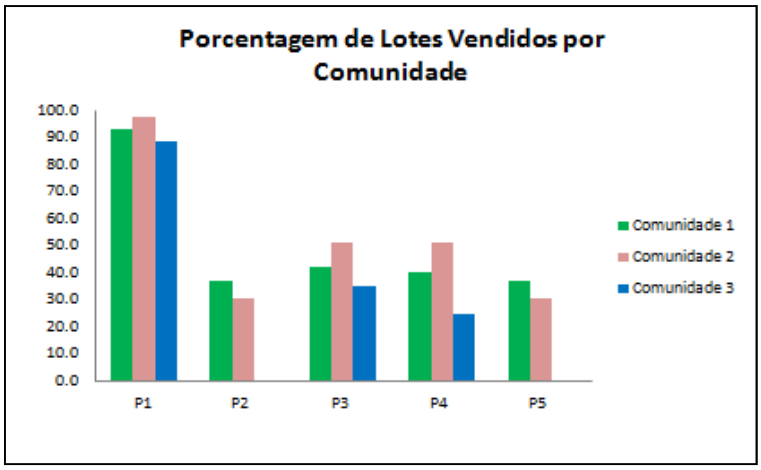

Figura 4.20 - Porcentagem de lotes vendidos em cada comunidade

Embora o mapa final da simulação S2 (Figura 4.19) se aproxime mais do dado real observado na figura 4.21 nada se pode afirmar sobre a validação deste modelo, devido à utilização de dados fictícios para os agentes. Além disso, o limiar de 0.6 intensifica o processo de venda das *comunidades* fazendo com que os resultados finais do modelo apresentem mais compras do que realmente aconteceu. Este foi escolhido por facilitar a observação das diferenças entre os mapas possibilitando a exploração das diferentes simulações. Porém através dos resultados obtidos é possível apontar a importância das relações neste modelo e a coerência do modelo conceitual que aponta o enfraquecimento das *comunidades* e das condições de vida do *pequeno produtor* dentro do seu *lote* como determinantes no processo.

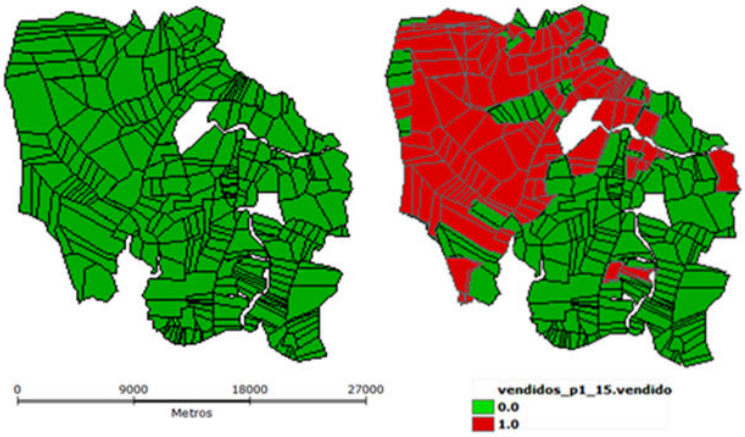

Figura 4.21 - Mapas reais dos lotes em 1999 e 2006

Foi modelado também o uso da terra dentro do modelo utilizando-se dos mesmos dados da simulação S2. Este modelo considera que todos os *lotes* vendidos para *grandes produtores* têm seu uso convertido totalmente para agricultura mecanizada de soja. Este modelo, embora necessite de aprimoramentos que explorem de forma mais aprofundada as conversões de uso nos *lotes* vendidos, permite complementar a avaliação da solução desenvolvida e ilustrar a relação entre os diferentes espaços celulares que possibilitam que o modelo se desenvolva tanto na escala de *lotes* quanto de células de um hectare. A Figura 4.22 apresenta o mapa de uso da terra resultante da simulação em 2006.

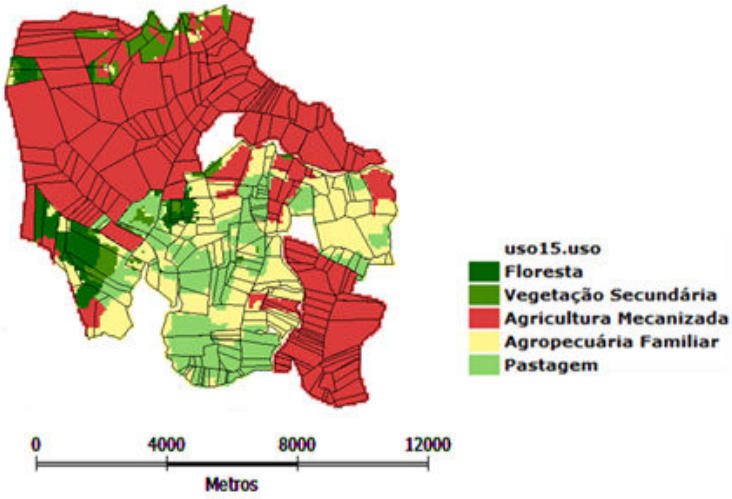

Figura 4.22 - Mapa de uso do solo simulado 2006

O desenvolvimento e resultados deste modelo permitem verificar a consistência da solução apresentada que possibilitou que todas as relações levantadas fossem construídas e facilmente utilizadas e que o modelo pudesse ser fundamentado nestas relações, mostrando-se satisfatória a solução para modelos de uso e cobertura da terra baseado em agentes. A construção do modelo reforça ainda a idéia de que solução desenvolvida pode ser estendida a outros tipos de modelos baseados em agentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos modelos baseados em agentes as ações são tomadas com base na interação dos agentes entre si e com o seu espaço de atuação, a partir da percepção do meio e de estímulos de outros agentes. Relações podem então ser estabelecidas entre os agentes entre si e com o espaço. No entanto, foram observados requisitos especiais para se trabalhar estas relações nos modelos LUCC, devido à necessidade de representar a influência dos agentes sobre outros agentes e sobre o espaço. Este trabalho levantou estas necessidades e após uma análise da literatura propôs uma estrutura de relações capaz de atendê-las.

Nesta estrutura foram construídos três grupos de relações: (a) *Neighborhood*, formada pelas relações entre células de um mesmo espaço ou de espaços distintos, (b) *Placement*, composto pelas relações agentes-células e células-agentes e (c) *SocialNetwok* formado pelas relações entre os agentes. Em conjunto, *Neighborhood* e *Placement*, possibilitaram a representação de estabelecimentos rurais como unidade principal de atuação dos agentes, podendo ser compostos por células de menor resolução capazes representar suas características biofísicas e de acessibilidade internas. Também possibilitaram que um agente controle um, nenhum ou vários estabelecimentos rurais. O grupo de relações *Social Network* foi elaborado de forma a permitir que se estabeleçam relações entre agentes de diferentes tipos e níveis hierárquicos, como, por exemplo, entre fazendeiros e organizações governamentais e ainda relações derivadas de relações topológicas entre as células por eles controladas.

Esta estrutura foi avaliada através de sua implementação em TerraME. Foi desenvolvida uma solução unificada, que permite tanto o tratamento de todas as relações quanto acoplamento entre escalas em outros tipos de modelos. Esta utiliza o conceito de *environment* como estrutura fundamental no TerraME para a construção das relações e permite que todas elas possam ser resolvidas utilizando como base a GPM.

Um modelo baseado em um estudo de caso real foi desenvolvido para explorar as relações. Primeiramente um modelo conceitual do processo de expansão da agricultura mecanizada na região de Santarém foi elaborado para que de fato o modelo construído pudesse representar necessidades reais de modelos LUCC baseados em agentes. Posteriormente este foi construído em ambiente TerraME utilizando os recursos implementados para que fosse verificada a consistência da solução. Através desta construção percebeu-se que a estrutura proposta atende aos requisitos levantados, sendo possível representar através dela todas as relações desejadas e percorrê-las durante a evolução do modelo. Também se observou ganhos significativos associados à possibilidade de representação destas relações nos modelos LUCC, pois influenciam fortemente os resultados, como pode ser percebido nas diferentes simulações executadas neste trabalho.

Mesmo o modelo tendo sido construído com dados espaciais reais e se fundamentado em um modelo conceitual elaborado a partir de um problema real, os atributos relacionados aos agentes foram estimados priorizando a simulação de diferentes relações. Como trabalho futuro pretende-se estender este modelo, utilizando dados reais coletados a partir de trabalho de campo para caracterização dos agentes, a fim de que seus comportamentos possam ser calibrados e os resultados dos modelos avaliados, possibilitando seu aprimoramento e melhorias na solução desenvolvida.

Embora a solução computacional elaborada tenha se mostrado satisfatória, atendendo às necessidades de modelos LUCC, ela foi construída visando atender também os requisitos de outros tipos de modelos baseados em agentes. Para avaliar se a ferramenta é de fato genérica modelos de outros tipos devem ser criados em trabalhos futuros.

Além disso, tem-se um referencial teórico útil para o desenvolvimento de trabalhos tanto de computação aplicada, relacionado à possíveis melhorias na estrutura computacional que subsidiam a construção dos modelos, quanto para as ciências humanas e sociais, envolvendo a modelagem e simulação de sistemas espaciais complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A.; CÂMARA, G.; CARTAXO, R. Modeling Spatial Relations by Generalized Proximity Matrices. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM IN GEOINFORMATICS (GEOINFO) 5., 2003, Campos do Jordão, SP, Brazil. **Proceedings…** São José dos Campos: INPE, 2003. p.8.

ANDRADE, P. R. ; MONTEIRO, A. M. V. ; CÂMARA, G. ; CARNEIRO, T. G. S. . An Architecture for Agent-based Modelling and Simulation of Geospatial Phenomena. In: 6th EUROPEAN SOCIAL SIMULATION ASSOCIATION CONFERENCE (ESSA'09), 2009, Guildford. **Proceedings...**, 2009. p. 54.

ANDRADE, P. R. ; MONTEIRO, A. M. V. ; CÂMARA, G. Entities and Relations for Agent-Based Modelling of Complex Spatial Systems. In: 1st BRAZILIAN WORKSHOP ON SOCIAL SIMULATION (BWSS'08), 2008, Salvador. **Proceedings...** 2008. p. 52-63.

ASSIS, T.O.; AGUIAR, A.; CÂMARA, G.; ANDRADE,P. R. Modelos Baseados em Agentes em Mudanças de Uso e Cobertura da Terra: o Caso da Moratória da Soja em Santarém. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM IN GEOINFORMATICS (GEOINFO) 11., 2010, Campos do Jordão, SP, Brazil. **Proceedings…** São José dos Campos: INPE, 2010. P.176.

BELL, A. R. Environmental Licensing and Land Aggregation□: An Agent-Based Approach to Understanding Ranching and Land Use in Rural Rondônia. **Ecology and Society**, v. 16, n. 1, 2011.

BENENSON, I.; HARBASH, V. **Object-based environment for urban simulation:** OBEUS user's guide. Tel Aviv University, 2004. 79 p.

BOUSQUET, F.; BAKAM, I.; PROTON, H.; LE PAGE, C. Cormas: common-poolresources and multi-agent systems. In: POBIL, A. P.; MIRA, J.; MOONIS, A.(Ed.). **Tasks and methods in applied artificial intelligence**. Castellon, Spain: Springer, 1998. (Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), v. 1416), p. 826–838. ISBN 3-540-64574-8.

BRIASSOULIS, H., 2000, **Analysis of land use change:** theoretical and modeling approaches. Morgantown, WV: Regional Research Institute, West Virginia University.

BRONDIZIO, E. S.; OSTROM, E.; YOUNG, O. R. Connectivity and the governance of multilevel social-ecological systems: the role of social capital. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 253-278, nov 2009.

BROWN, D. G.; RIOLO, R. L.; ROBINSON, D. T.; NORTH, M.; RAND, W. Spatial process and data models: toward integration of agent-based models and GIS. **Journal of Geographical Systems**, v. 7, n. 1, p. 25–47, 2005.

CÂMARA G.; VINHAS, L.; FERREIRA, K. R.; QUEIROZ, G. R.; SOUZA, R. C. M.; MONTEIRO A. M. V.; CARVALHO, M. T.; CASANOVA M. A.; FREITAS, U. M. TerraLib: An open-source GIS library for large-scale environmental and socioeconomic applications. In: B. Hall, M. Leahy (eds.). Open source approaches in spatial data handling. Berlin: Springer, 2008.

CANTO, O.; ARAUJO, R. **Sojicultura na Amazonia -** mudanças no padrão de uso da terra e a dinamica populacional em Belterra-PA. In: CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL, 2008, Manaus. Amazonia em Perspectiva Ciencia Integrada para um Futuro Sustentável, 2008.

CARNEIRO, T. G. S**. Nested-ca:** a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change. 2006. 114 p. (INPE-14702-TDI/1227). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

CASTELLA, J. C., T. N. Trung, and S. Boissau. Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographic information system. **Ecology and Society**, n. 10, p. 10 – 27, 2005.

CHAYANOV, Alexander V. **La organizacion de la unidad economica campesina**. Buenos Aires: Ediciones Nueva Vision, 1974.

COELHO, A. **Modelagem de dinâmica de uso da terra e cobertura vegetal em área de expansão de grãos na região do oeste paraense**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

CROOKS, A. T. **The Repast simulation/modelling system for geospatial simulation.** London, UK, 2007. 38 p. (CASA Working Paper, v. 123).

D'ANTONA, Á. O.; VANWEY, L. K.; HAYASHI, C. M. Property Size and Land Cover Change in the Brazilian Amazon. **Population and Environment**, v. 27, n. 5-6, p. 373-396, 25 out 2006.

DEADMAN, P.J. Exploring the role of communication in an agent based simulation of land use change in the Amazon. In: THE ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS ANNUAL MEETING, 2004, Philadelphia. **Proceedings…** Philadelphia: AAG, 2004.

GAVLAK, A. A. **Padrões de mudança de cobertura da terra e dinâmica populacional no Distrito Florestal Sustentável da BR-163: população, espaço e ambiente.** 2011. 177 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.16.24-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A7C3ML>. Acesso em: 10 jan. 2012.

GILBERT, N. **Agent-based models**. Thousand Oaks, California, USA: SAGE Publications, 2008. 98 p. (Quantitative Applications in the Social Sciences, v. 153). ISBN 978-1-4129-4964-4.

GTS - Grupo de Trabalho da Soja. **Moratória da soja:** avanços e próximos passos, 2005.

HUIGEN, M.; FISCHER, G. **Agent based modelling in land use and land cover change studies**. In: Interim Repor. 2003.

IRWIN, E.; GEOGHEGAN, J. Theory, data, methods: developing spatially-explicit economic models of land use change. **Agriculture, ecosystems and Environment**. v. 85, p.7–24, 2001.

JANSSEN, M. A.; OSTROM, E. Empirically Based, Agent-based models. **Ecology and Society**, v. 11, n. 2, 2006.

JOHNSON, E. J.; PAYNE, J. W.; BETTMAN, J. R. Information displays and preference reversals. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 42, n. 1, p. 1–21, 1988.

KNOERI, C.; BINDER, C. R.; ALTHAUS, H. J. An agent operationalization approach for context specific agent-based modeling. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 14, n. 2, p. 4, 2011.

KOK, K.; FARROW, A.; VELDKAMP, A.; VERBURG, P. H. A method and application of multiscale validation in spatial land use models. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 223-238, 2001.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H.; RINDFUSS, R. R. Introduction: Local processes with Global impacts. In: LAMBIN, E.; GEIST, H. (Ed.). **Land use and land cover change: local processes and global impacts.** The Berlin: Springer, 2006, p. 1-8. IGBP series.

LIM, K.; DEADMAN, P. J.; MORAN, E.; BRONDIZIO, E.; MCCRACKEN, S. Agent-based simulations of household decision making and land use change near altamira, Brazil. In: GIMBLETT, R. (Ed.). **Integrating GIS and agent-based modeling techniques for understanding social and ecological processes**. New York: Oxford University Press, 2002. p. 277–310.

MATTHEWS, R. B.; GILBERT, N. G.; ROACH, A.; POLHILL, J. G.; GOTTS, N. M. Agent-based land-use models: a review of applications. **Landscape Ecology**, v. 22, n. 10, p. 1447-1459, 21 ago 2007.

MINAR, N.; BURKHART, R.; LANGTON, C. **The Swarm simulation system:** a toolkit for building multi-agent simulations. Santa Fe Institute, 1997. 11 p. (Working Paper).

MONTEIRO, R. **Dinâmicas socioambientais e tendências urbanas**. 2004. 37 p . (Working Paper).

MOREIRA, E. G.; AGUIAR, A. P.; COSTA, S. S.; CÂMARA, G. Spatial relations across scales in land change models. In: BRASILIAN SYMPOSIUM IN GEOINFORMATICS - GEOINFO 2008, 10. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **Proceedings…** São José dos Campos: INPE, 2008.

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.; HOFFMAN, M.; PARKER, D. C.; MANSON, S. M.; MANSON, S. M.; JANSSEN, M. A.; JANSSEN, M. A.; HOFFMAN, M.; DEADMAN, P. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. **Annals of the Association of American Geographers** v. 93, n., p. 314-337, 2003.

PIJANOWSKIA, B. C.; BROWNB, D. G.; SHELLITOC, B. A.; MANIK, G. A. Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 26, n., p. 553–575, 2002.

REIS, A. F. **Santarém:** seu desenvolvimento histórico. 2ª edição, Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1979.

ROBINSON, D. T.; BROWN, D. G.; PARKER, D. C.; SCHREINEMACHERSC, P.; JANSSEN, M. A.; HUIGENC, M.; WITTMERE, H.; GOTTS, N.;

ROMBUROMG, P.; IRWIN, E.; BERGERC, T.; GATZWEILERI, F.; BARNAUD, C. Comparison of empirical methods for building agent-based models in land use science. **Journal of Land Use Science**, v. 2, n. 1, p. 31–55, 2007.

SAATY, T.L. (2005) **Theory and applications of the analytic network process**, Pittsburgh, PA: RWS Publications.

SAATY, T.L. **The analytic hierarchy process.** New York: McGraw Hill. Pittsburgh:RWS Publications, 1980.

SCHREINEMACHERS, P.; BERGER, T. Land-use decisions in developing countries and their representation in multi-agent systems. **Journal of Land Use Science**, v. 1, p. 29-44, 2006.

STEWARD, C. (2004). **The Santarém agricultural landscape, Pará, Brazil:** a working paper on agroindustrial and smallholder agriculture in Santarém. Unpublished Thesis in partial fulfillment of Master's of Environmental Science, Yale.

TORRENS, P.; BENENSON, I. Geographical automata systems**. International Journal of Geographical Information Science (IJGIS)**, v. 19, n. 4, p. 385–412, 2005.

TURNER, B.; SKOLE, D.; SANDERSON, S.; FISCHER, G.; FRESCO, L.; LEEMANS, R. **Land-Use and Land-Cover Change (LUCC):** Science/Research Plan. Stockholm: IGBP Secretariat, 1995. HDP Report No. 7.

VALBUENA, D; VERBURG, P.; BREGT, A.K.; LIGTENBERG, A. An agent-based approach to model land-use change at regional scale. **Landscape Ecolology**, 2009.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. **Ecological Modeling**, v. 91, p. 231-248, 1996.

VENTURIERI, A.; COELHO, A. S.; THALES, M. C.; BACELAR, M. D. R. Análise da expansão da agricultura de grãos na região de Santarém e Belterra, oeste do estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 7003-7010.

VERBURG, P. H.; KOK, K.; PONTIUS JR, R. G.; VELDKAMP, A. Modeling Land-Use and Land-Cover Change. In: LAMBIN, E.; GEIST, H. (Ed.). **Land-use and land-cover change:** local processes and global impacts. Berlin: Springer, 2006. The IGBP series.

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.

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

VIDAL, J. M.; BUHLER, P. A.; HUHNS, M. N. Inside an agent. **IEEE Internet Computing**, v. 5, n. 1, p. 82–86, 2001. ISSN 1089-7801.

WILENSKY, U. **NetLogo**. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University: Evanston, IL, 1999.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. Intelligent agents: theory and practice. **Knowledge Engineering Review**, v.10, p. 115-152, 1995.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO (ZEE). **Zoneamento Ecológico-econômico da área de influência da Rodovia BR-163.** Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2005. Disponível em: <http://zeebr163.cpatu.embrapa.br/index.php# >. Acesso em: Jan. 2012.

APÊNDICE A

Dinâmica do modelo em cada uma das simulações

Simulação S1

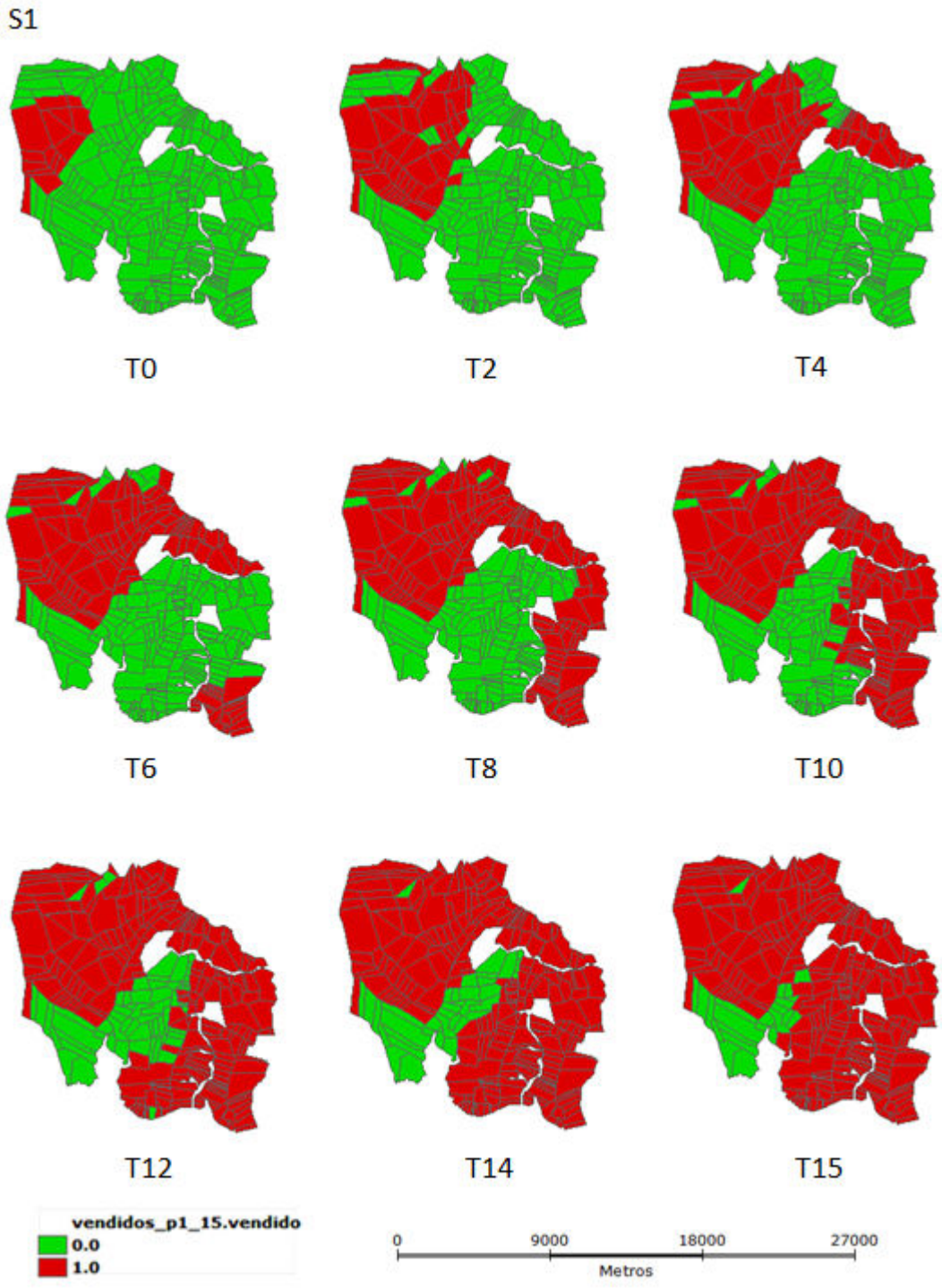

Figura A.1 - Simulação S1

Simulação S2

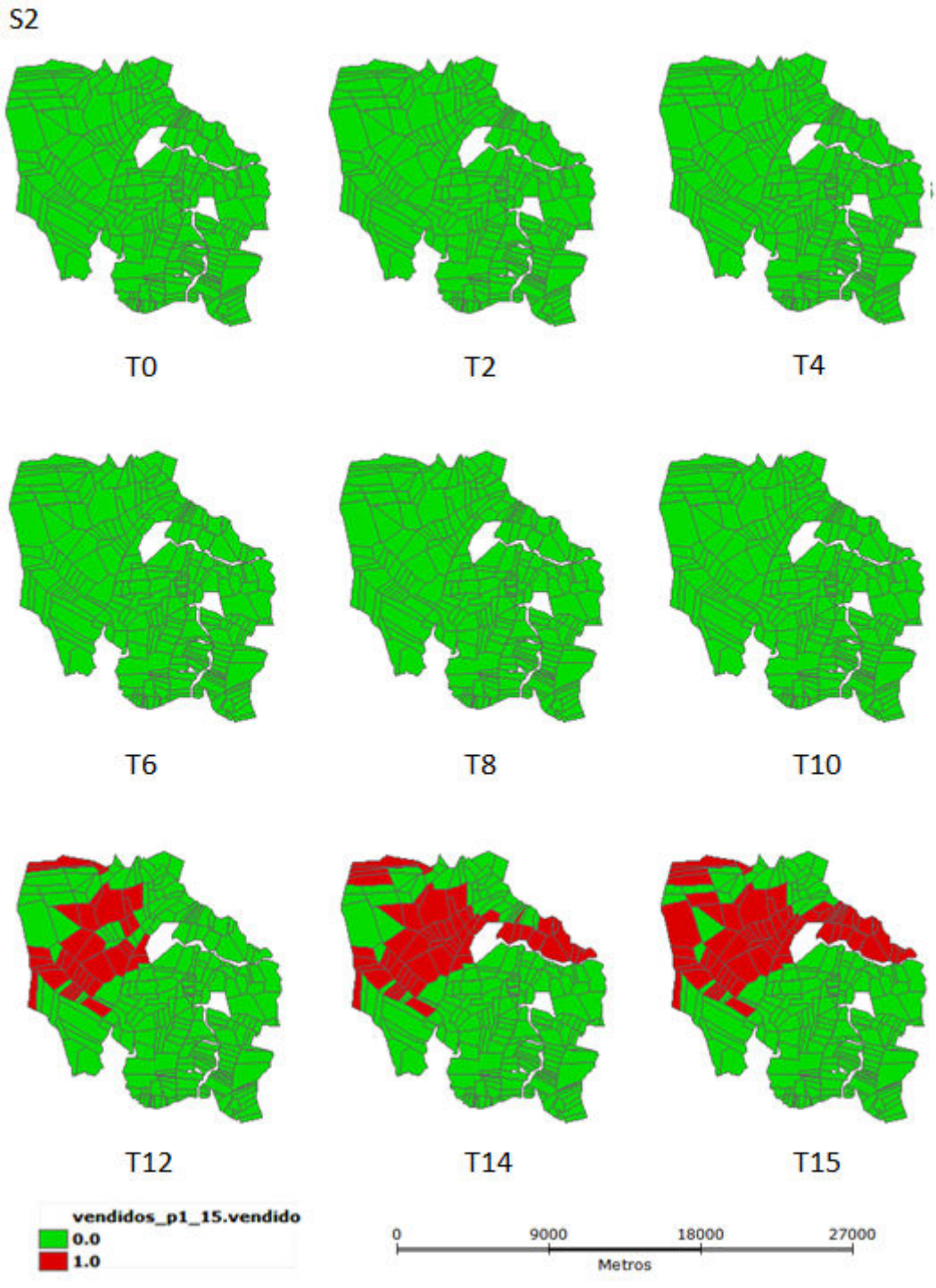

Figura A.2 - Simulação S2

Simulação S3

Figura A.3 - Simulação S3

Simulação S4

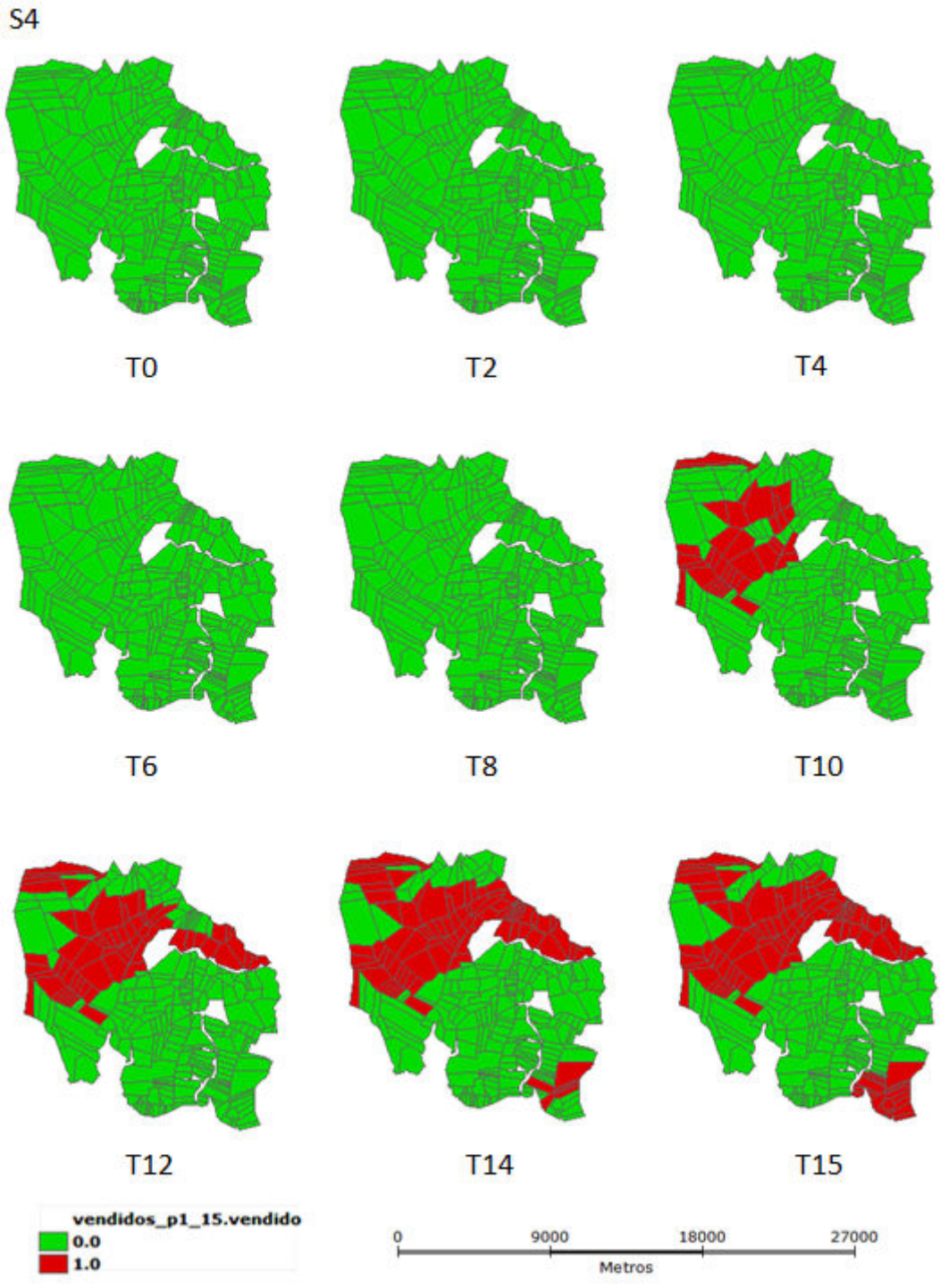

Figura A.4 - Simulação S4

Simulação S5

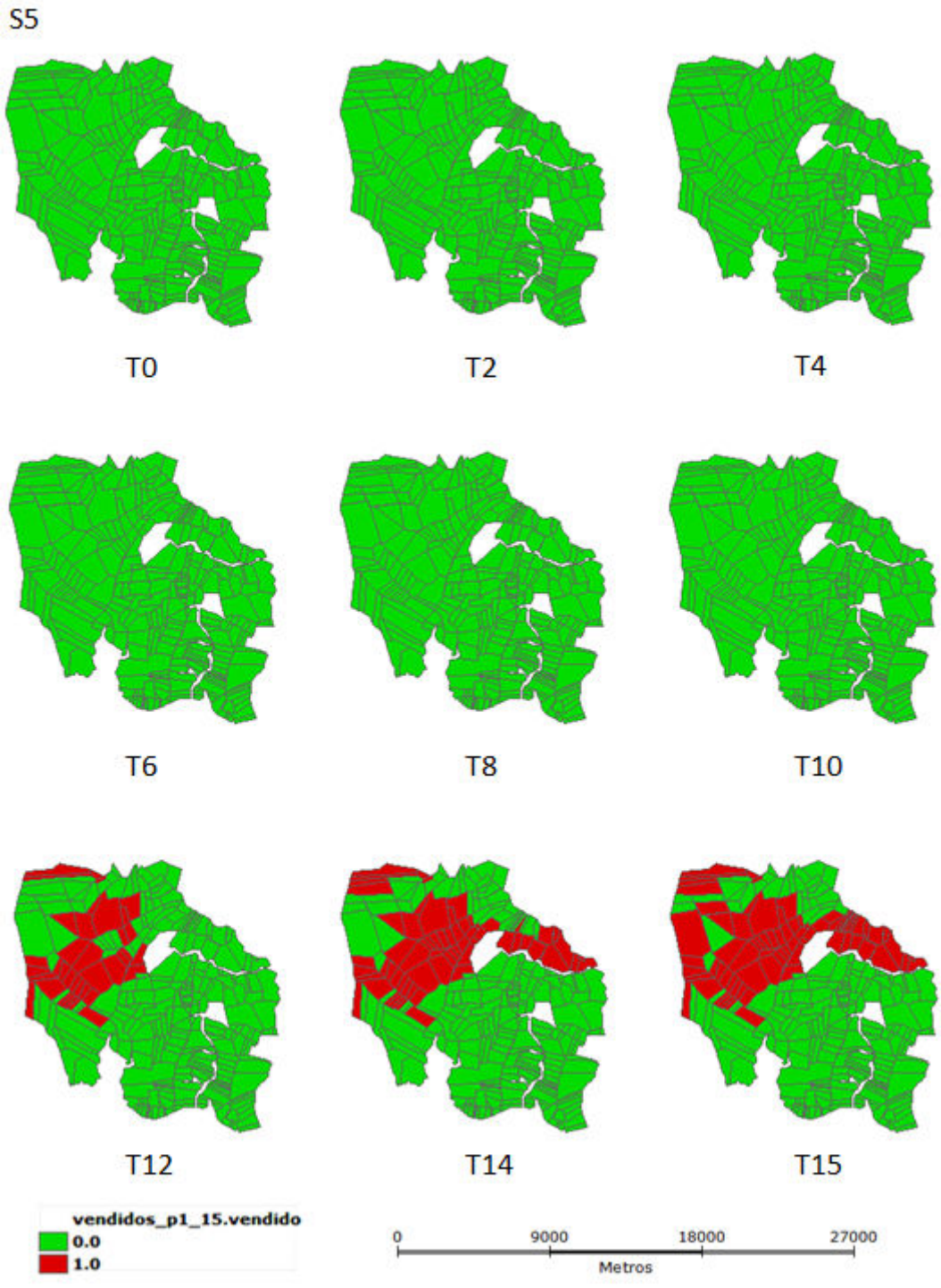

Figura A.5 - Simulação S5

ANEXO A

Conceitos TerraME utilizados neste trabalho

Fonte: manual de referência TerraME

Cellular Space: um conjunto multivalorado de células que podem ser importados de bancos de dados TerraLib ou criados diretamente dentro do TerraME (espaços celulares retangulares).

> *Load (cellular space):* carrega o espaço celular do banco de dados. O TerraME executa automaticamente esta função quando o espaço celular é criado, mas pode ser executado para recarregar os atributos, apagando os outros atributos e relações criados pelo modelador.

Environment: um container que encapsula espaço, tempo, comportamento e outros ambientes (*environments*). Objetos podem ser adicionados diretamente quando o *Environment* é declarado ou depois de ele ter sido instanciado. Ele controla a simulação e sincroniza todos os *timers* dentro dele.

Group: classe que defina e ordena uma seleção sobre uma sociedade. Ele herda a classe *society.*

Society: classe para criar e manipular um conjunto de agentes.

Timers: É um escalonador baseado em eventos que executa e controla a simulação. Ele contém um conjunto de eventos. Permite ao modelo considerar processos que começam independentemente e com diferentes periodicidades. Inicia-se no tempo 0 e dado um tempo n, garante que todos os eventos antes deste tempo foram executados.

Trajectory: classe que define uma trajetória espacial sobre um espaço celular. Herda a classe *cellular space.*