



Ministério da
Ciência e Tecnologia



aa/bb/cc/dd-TDI

**REDES COMPLEXAS DE BASE TERRITORIALIZADA:
DEFINIÇÃO, CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA E
PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES NA MODELAGEM
DINÂMICA EM EPIDEMIOLOGIA ESPACIAL**

Leonardo Bacelar Lima Santos

Monografia de Proposta para o
Doutorado do Curso de Pós-
Graduação em Computação Apli-
cada, orientada pelo Dr. Antônio
Miguel Vieira Monteiro.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

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) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

Presidente:

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

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



aa/bb/cc/dd-TDI

**REDES COMPLEXAS DE BASE TERRITORIALIZADA:
DEFINIÇÃO, CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA E
PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES NA MODELAGEM
DINÂMICA EM EPIDEMIOLOGIA ESPACIAL**

Leonardo Bacelar Lima Santos

Monografia de Proposta para o
Doutorado do Curso de Pós-
Graduação em Computação Apli-
cada, orientada pelo Dr. Antônio
Miguel Vieira Monteiro.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Santos, Leonardo Bacelar Lima.
Cutter Redes Complexas de Base Territorializada: definição, caracterização topológica e perspectivas de aplicações na modelagem dinâmica em epidemiologia espacial / Leonardo Bacelar Lima Santos.
– São José dos Campos : INPE, 2012.
xi + 31 p. ; (aa/bb/cc/dd-TDI)

Monografia de Proposta de Doutorado (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientador : Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro.

1. Redes Complexas 2. Redes Complexas de Base Territorializada 3. Epidemiologia teórica

CDU 000.000

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.

RESUMO

Questões de mobilidade e escala são fundamentais à modelagem dinâmica de processos epidêmicos. A demanda crescente por aparatos conceituais e instrumentos metodológicos para operar com estas questões neste problema abre novas possibilidades ligadas ao desenvolvimento de novos conceitos e sua operacionalização através de novas ferramentas computacionais de análise, integrando componentes que tratem explicitamente do espaço, dos territórios onde os processos saúde-doença acontecem. Redes Complexas - grafos com um grande número de vértices conectados por arestas com distribuições não triviais - consistem em um poderoso recurso para representação de conhecimento, tratamento de dados e modelagem de sistemas complexos. Todavia, a representação tradicional do espaço na Teoria de Redes Complexas é usualmente topológica, em uma perspectiva matemática, e não guarda relação com a geografia dos lugares representados. Esta proposta apresenta contribuições neste domínio, ao estabelecer uma definição formal para as Redes Complexas de Base Territorializada e sua caracterização topológica, com a criação de índices que observam os componentes espaciais da rede.

**REDES COMPLEXAS DE BASE TERRITORIALIZADA:
DEFINIÇÃO, CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA E
PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES NA MODELAGEM DINÂMICA
EM EPIDEMIOLOGIA ESPACIAL**

ABSTRACT

Issues of scale and mobility are key to modeling the dynamics of epidemic processes. The growing demand for conceptual apparatus and methodological tools to operate with these issues in this problem opens up new possibilities related to the development of new concepts and their operationalization through new computational tools for analyzing, integrating components that handles explicitly the space, the territories where the processes health–disease happen. Complex Networks - graphs with a large number of nodes connected by edges with nontrivial distributions - consist of a powerful resource for knowledge representation, data processing and modeling of complex systems. However, the traditional representation of space in the Theory of Complex Networks is usually topological, in a mathematical perspective, and not related to the geography of the places represented. This proposal presents contributions in this area by establishing a formal definition for Geographical Embedded Complex Networks and proposing an topological characterization for this network’s approach with indexes that observe the spatial components of nodes and edges.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Grafo G	13
3.2 Ligações topológicas e ligações geográficas.	16
3.3 Grafo G com vértices localizados de acordo com a configuração já estabelecida e com as áreas de cobertura.	18
3.4 Grafo G com vértices localizados de acordo com uma outra configuração, e com as áreas de cobertura.	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

coef. – coeficiente

RC – Redes Complexas

TG – Teoria dos Grafos

TRC – Teoria de Redes Complexas

RCBT – Redes Complexas de Base Territorializada

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 HIPÓTESE E OBJETIVOS	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 REDES COMPLEXAS DE BASE TERRITORIALIZADA	7
2.2 RECURSOS COMPUTACIONAIS	9
2.2.1 PLATAFORMAS USANDO REDES COMPLEXAS PARA MODE- LAGEM DINÂMICA EM EPIDEMIOLOGIA	9
2.2.2 AMBIENTES COMPUTACIONAIS	10
3 RCBT: DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	13
3.1 DEFINIÇÃO	13
3.2 CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA TRADICIONAL	14
3.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA RCBT	16
4 CRONOGRAMA PROPOSTO	21
4.1 CALENDÁRIO	21
4.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA: PUBLICADA E ESPERADA	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 INTRODUÇÃO

A modelagem matemática e computacional de doenças, seja no nível *intra* ou *inter host*, e a análise de dados biológicos têm sido cada vez mais aplicadas a contextos de saúde pública. A possibilidade de testes exaustivos *in silico* e a execução automática de tarefas complexas estão entre as razões mais relevantes deste sucesso. A computação aplicada aparece para a epidemiologia como ferramenta para modelagem de mecanismos e simulação de processos. Entretanto, os clássicos modelos compartimentais, sejam contínuos (baseados em equações diferenciais), sejam discretos (como modelos baseados em agentes em um espaço celular), ainda necessitam de instrumentos para gerar resultados mais aderentes aos observados em dados reais (MASSAD, 2004; COLIZZA, 2007; SANTOS; MONTEIRO, 2011).

Conforme aponta o Censo 2010, o Brasil é um país complexo, predominantemente urbano, com regiões de alta densidade populacional, no qual ainda persistem desigualdades intraurbanas que amplificam um quadro de vulnerabilidades sociais diferenciadas e contribuem para a proliferação de doenças endêmicas e epidemias. Os processos sociais interagem com ecossistemas locais redesenhando a paisagem urbana brasileira a partir de interações complexas entre clima, ambiente e novas situações de exposição da população a problemas de saúde. A forte dependência frente a questões urbanas e ambientais e a complexidade inerente à dinâmica epidemiológica configuram a demanda por ferramentas computacionais ainda mais expressivas em doenças de transmissão vetorial (ex. dengue, malária e febre amarela). A influência do espaço nos processos epidemiológicos é discutida sob vários aspectos na literatura, conforme (AUCHINCLOSS; ROUX, 2008). Um panorama dos trabalhos com abordagem espacialmente explícita em dengue é apresentado em (SANTOS; MONTEIRO, 2011).

Questões de mobilidade e escalas são fundamentais neste contexto:

- Segundo (DUARTE et al., 2007), a mobilidade urbana é definida como a capacidade de deslocamento de pessoas e bens no espaço urbano para a realização das atividades cotidianas. No estudo da mobilidade urbana um importante fator a ser considerado é a possibilidade de sua estruturação na forma de diferentes tipos de (complexas) redes.

A área de Redes Complexas (RC) tem sua origem na tradicional Teoria dos Grafos (TG). Um grafo (\mathbf{G}) é um conjunto de vértices (\mathbf{V}) e arestas (\mathbf{E}), denotado por $\mathbf{G} = \mathbf{G}(\mathbf{V}, \mathbf{E})$, no qual os vértices podem estar conectados uns aos outros pelas arestas (NETTO, 2001). Uma RC é um grafo

não trivial, com um grande número de vértices e propriedades topológicas não necessariamente típicas nem de grafos regulares, como em autômatos celulares regulares, nem de grafos completamente aleatórios (NEWMAN et al., 2006; RÉKA; BARABASI, 2002; NEWMAN, 2003).

A abordagem de RC é utilizada para representação de conhecimento, tratamento de dados e modelagem de sistemas complexos – sistemas formados por muitas partes, estas interrelacionadas possivelmente de forma não linear, apresentando comportamentos emergentes e em multiescalas. Exemplos de sistemas complexos podem ser encontrados especialmente em domínios biológicos, sociais e climáticos (NEWMAN, 2011; RÉKA; BARABASI, 2002; NEWMAN, 2003).

- De acordo com (SANTOS; BARCELLOS, 2006), a escala é uma relação entre o mapa e o mundo real. O termo escala, no contexto de modelagem que será abordado neste texto, é dado por Gibson et al. (2000) (GIBSON, 2000), e se refere à dimensão espacial, temporal, quantitativa ou analítica usada para medir e estudar objetos e processos. A resolução (n) para observar uma região depende da extensão envolvida: para uma região muito extensa, normalmente as medidas devem usar uma grande agregação de unidades individuais, para que o número total de unidades (n) não seja grande demais a ponto de inviabilizar a operacionalização da análise. Conforme (COLIZZA, 2007), o debate entre realismo, precisão e generalidade ainda está bastante vivo na comunidade de modelagem (LEVINS, 1966; MAY, 1972; KEELING, 2005).

Ao se considerar Redes Complexas, em escala local (intraurbana), um exemplo de investigação foi apresentado por (CHOWELL et al., 2005). Tal estudo constrói uma rede de locais em uma cidade, incluindo residências, escritórios, centros comerciais e áreas de lazer. As ligações entre os locais, ou seja, as arestas entre os vértices, representam o fluxo de pessoas indo em um dado momento de um lugar a outro. As topologias destas redes, em geral, são heterogêneas e variam caso a caso.

Procedimentos similares têm sido empregados tomando, como vértices, cidades, estados ou países, e, como arestas, a movimentação das pessoas seja por rodovias estaduais ou federais. Nestes casos, as redes mostram-se, geralmente, mais homogêneas, especialmente devido às restrições espaciais existentes (MONTIS et al., 2007).

Ao se chegar a escalas globais, a caracterização é feita tomando-se

como vértices a infraestrutura de transporte aéreo, conectando aeroportos quando há voos diretos entre eles (COLIZZA, 2006).

A representação do espaço na teoria da RC é, contudo, topológica, mas não geográfica (KUBY, 2005) – a localização dos vértices, a proximidade entre eles e o comprimento das arestas são tratados como irrelevantes: a imensa maioria dos trabalhos versam sobre a topologia e não a geografia das redes (HAYASHI, 2006). A incorporação de elementos espacialmente explícitos nas dinâmicas modeladas com o auxílio de RC implica na necessidade de um novo aparato conceitual - relação vértices-arestas, nova interpretação para índices topológicos tradicionais e desenvolvimento de novos índices locais e globais para as RC, que serão denominadas como Redes Complexas de Base Territorializada (RCBT)¹ – redes nas quais os vértices têm localização geográfica conhecida e a lei de criação de arestas apresenta dependência funcional frente a variáveis espaciais (SANTOS, 2012).

A representação de processos por meio de redes complexas representa a passagem de uma visão baseada no espaço euclidiano (geográfico) para uma visão topológica. Entretanto, tal transição não deve desconsiderar as propriedades geográficas inerentes às dinâmicas. As RCBT tentam possibilitar análises topológicas com componentes de análises geográficas. Além disso, RCBT apresentam-se como uma metodologia capaz de abordagens multiescalas em modelagem epidemiológica, e consideram também questões de mobilidade e vizinhanças para os mecanismos de transmissão de doenças.

1.1 HIPÓTESE E OBJETIVOS

Esta proposta de doutorado tem a seguinte hipótese básica: é possível construir formalmente Redes Complexas que façam uso da localização geográfica dos elementos do grafo, chamamos estas redes de Redes Complexas de Base Territorializada. É possível também construir sua caracterização topológica, e estas estruturas podem contribuir para representar dinâmicas envolvidas em processos epidêmicos, possibilitando seu estudo através de estruturas e dinâmicas observadas sob tais redes.

Para corroborar as hipóteses da investigação são propostos os seguintes objetivos²:

- a) Definir as Redes Complexas de Base Territorializada a partir de Redes

¹O termo em inglês original é *Geographical Embedded Complex Networks*

²Vale ressaltar que se trata de uma tese em computação aplicada, não em geografia ou saúde, e seu foco é em questões metodológicas, avaliadas por provas de conceito.

Complexas sem componente espacial explícita;

- b) Desenvolver índices para caracterização topológica de Redes Complexas de Base Territorializada;
- c) Utilizar a caracterização desenvolvida em problemas reais no domínio do tratamento de dados e da modelagem de processos epidêmicos espacialmente explícitos, especificamente no problema da dengue;

A proposta de tese apresentada nesta monografia é consonante ao plano diretor do INPE (2011-2015), no qual um dos objetivos estratégicos é “Produzir dados, software e metodologias para fortalecer a atuação do INPE nas áreas de aplicações espaciais, **da saúde**, educação, segurança pública e desenvolvimento urbano.” A tese está relacionada à rede PRONEX de modelagem da Dengue, via participação direta do orientando e do orientador, no projeto **DengueME**: ambiente para modelagem da Dengue baseado na plataforma **TerraME - Terra Modeling Environment**.

A presente monografia, que tem como foco a proposta de índices para caracterização geográfico-topológica de RCBT, está assim organizada:

- a) a seção **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** traça um panorama dos modelos para RCBT. Logo após, são elencados alguns trabalhos com plataformas para aplicação de RC (tradicionais, sem componente espacial) em modelagem de epidemias. Ao final, são apresentados os ambientes computacionais que, interligados, formarão o laboratório para as provas de conceito da presente investigação.
- b) a seção **RCBT: DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO** traz a definição de RCBT, os índices topológicos clássicos e índices propostos para caracterização topológica de RCBT: com exemplos e análises de valores limites.
- c) a seção **CRONOGRAMA PROPOSTO** apresenta uma lista de tarefas com prazos claros para o encaminhamento da pesquisa, bem como a produção científica esperada como resultado do processo e que será utilizada para fechamento da tese de doutorado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REDES COMPLEXAS DE BASE TERRITORIALIZADA

A seguir é apresentada uma breve revisão dos trabalhos publicados em Redes Complexas de Base TerritorIALIZADA. Um panorama mais geral pode ser encontrado na monografia do exame de qualificação do próprio doutorando (SANTOS, 2012).

A abordagem geográfica para Redes Complexas é, sobre certo ponto de vista, uma reciprocidade ao uso de grafos como estruturas de dados em geografia, e posteriormente via Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), especialmente no subdomínio da Geografia dos Transportes. Conforme (SOUSA, 2010), a análise de redes de transporte e comunicação ganhou relevância na década de 60 (GARRISON, 1960; NYSTUEN; DACEY, 1961; KANSKY, 1963) e teve interesse renovado já no século XXI, graças aos SIGs (Gastner e Newman, 2006). Ainda segundo o autor, no domínio das ciências geográficas, os SIGs vieram contornar um dos problemas apontados à TG, mais precisamente a sua abstração espacial e a sua incapacidade de incorporar os atributos de localização (coordenadas), “excluindo uma variável fundamental na explicação dos processos inter-ativos e intra-ativos entre os biótopos naturais e os biótopos artificiais de que resulta a configuração de padrões espaciais e a paisagem: o território”.

Três são os modelos mais recorrentes da literatura para construção de RCBT: *Spatial Embedded Random Network (SERN)* (DALL; CHRISTENSEN, 2002; BARNETT et al., 2007), *General Spatial Embedded COMplex Network (GSECON)* (KOSMIDIS et al., 2008) e *Lattice Embedded Scale-Free Network (LESFN)* (ROZENFELD et al., 2002; HAYASHI, 2006). A seguir uma breve descrição de cada um destes modelos:

- a) *Spatial Embedded Random Network (SERN)* (DALL; CHRISTENSEN, 2002)
 - Segundo Barnett (2007), o modelo *SERN* de N vértices é especificado da seguinte forma:
 - Uma métrica m sobre o espaço S onde o grafo será alocado,
 $m : S \times S \rightarrow \mathbb{R}^+$;
 - Uma variável aleatória, X , para a distribuição de vértices que toma valores em S ;
 - Uma função de probabilidade de conexão, não-crescente, entre dois vértices i e j , $\gamma(r(x_i, x_j)) : \mathbb{R}^+ \rightarrow [0, 1]$, onde r é a distância entre tais vértices.

A dinâmica de construção do grafo acontece associando a cada aresta uma probabilidade $\gamma(r(x_i, x_j)) = c(x, y)$, com y *iid* a x – ou seja, a probabilidade de conexão depende da posição relativa entre os vértices. O primeiro momento dessa distribuição é: $\mu \equiv E(c(x, y))$. O grau médio desta rede é: $\langle K \rangle = (N - 1)\mu$. Para o modelo de Erdős e Rényi¹ $c(x, y) = p$, uma constante, independente da distância entre os vértices (ERDÖS; RÉNYI, 1959; BOLLOBÁS, 1998).

- b) *General Spatial Embeeded COmplex Network (GSECON)* (KOSMIDIS et al., 2008) – O objetivo neste caso é dispor vértices em um reticulado de forma a minimizar o comprimento das arestas que conectam tais vértices.

Parte-se de um grafo cuja distribuição de graus, $P(k)$, é conhecida e do tipo *poisson* (ROSS, 2010). Para cada vértice i , para cada um dos $k(i)$ vértices, de acordo com a distribuição $P(k)$, escolhe-se uma distância r em relação ao vértice i com probabilidade $\gamma(r) = cr^{d-1}r^{-\delta}$, onde δ controla a força do decaimento de γ frente à distância, d é a dimensão do espaço e c é um termo de normalização: tal que $\int_1^L \gamma(r)dr = 1$, com $L = N^{\frac{1}{d}}$. Toma-se um vértice que diste r do vértice i e conecta-se a i . Remove-se conexões múltiplas quando preciso for.²

- c) *Laticce Embedded Scale-Free Network (LESFN)* (ROZENFELD et al., 2002) – De acordo com Hayashi(2006) e Yang et al. (2008), este modelo gera redes livres de escala em um reticulado de tamanho R com condições periódicas de contorno.

Para cada nó do reticulado associa-se um grau k , de acordo com uma distribuição de probabilidade $P(k)$ tal que $P(k)k^{-\lambda}$. Seleciona-se um vértice j qualquer. Conecta-se, probabilisticamente, tal vértice aos vizinhos mais próximos até que o seu grau seja k_j , ou que todos os vértices até uma distância limite, $Rmax_j$, tenham sido analisados, com $Rmax_j = Ak_j^{\frac{1}{d}}$, onde A é uma constante positiva previamente determinada e d é a dimensão do reticulado³. A probabilidade de conexão para um vértice j é dada por: $p_j(r) = D \exp(-(r/Rmax_j)^2)$ (YANG et al., 2008), uma distribuição gaussiana de média nula e desvio padrão $R\sqrt{2}/2$. Em (LIN et al., 2005), foi discutida a influência do parâmetro A em índices topográficos de redes criadas com tal algoritmo. Entretanto, o foco do trabalho foi em aspectos

¹Vide anexo 1

²Para os últimos vértices o grau pode não ser respeitado.

³Quando $A \rightarrow \infty$ tem-se um grafo aleatório (YANG et al., 2008).

teóricos do processo de sincronização – questões de deformações dos índices por parâmetros espaciais foram tratadas apenas superficialmente, e índices propriamente espaciais não foram discutidos.

2.2 RECURSOS COMPUTACIONAIS

A presente seção traz primeiramente algumas plataformas que usam Redes Complexas para modelagem dinâmica em epidemiologia. Após tal panorama, serão apresentados os ambientes computacionais que serão utilizados ao longo do doutorado, e ao final citados alguns dos possíveis conjuntos de dados reais que serão utilizados.

2.2.1 PLATAFORMAS USANDO REDES COMPLEXAS PARA MODELAGEM DINÂMICA EM EPIDEMIOLOGIA

Há na literatura algumas plataformas para modelagem epidemiológica com suporte para RC. Dentre estas 3 se destacam:

- Spatiotemporal Epidemiological Modeller (STEM) (FORD et al., 2006) – software extensível baseado em componentes para modelagem da propagação espacial e temporal de doenças, genérico o bastante para representar diversas enfermidades. Possibilita acompanhamento da dinâmica epidemiológica no tempo e no espaço, inclusive para modelos baseados em RC. Implementado na linguagem de programação de alto nível JAVA, o software, de código aberto, é compatível com diversos sistemas operacionais.
- Epigrass (COELHO et al., 2007) – software para modelagem de processos epidêmicos sob a estrutura de RC. Há suporte para visualização dos resultados e interação com ambientes estatísticos (como o *R* (TEAM, 2003)). Implementado na linguagem de programação de alto nível Python, o software é de código aberto e multi-plataforma.
- GLEaMviz (BROECK et al., 2011) – software que possibilita uma grande variedade de modelos compartimentais híbridos, por exemplo, do tipo metapopulacional sob estruturas de RC. Apresenta um módulo para edição de modelos via diagramas de blocos/fluxogramas. Pode ser executado sob arquitetura cliente servidor, com foco em suporte para dinâmicas em escala global.

Todas estas plataformas se concentram, portanto, em promover ambientes para que usuários possam construir seus próprios modelos com base em elementos pré-definidos,

e então executá-los com um suporte computacional que permite acompanhamento e visualização da propagação espaço-temporal da dinâmica. Todavia, em nenhum dos casos é apresentado um arcabouço teórico que propicie a inclusão de elementos de mobilidade, vizinhança e multi-escalas para a transposição dos mecanismos de contato e contágio do sistema a ser modelado para o sistema digital – provendo este de maior aderência a dados reais – bem como indicadores da influência destes ítems nas dinâmicas modeladas: dualidade estrutura-função (RÉKA; BARABASI, 2002; NEWMAN, 2003).

2.2.2 AMBIENTES COMPUTACIONAIS

Para construção do laboratório *in silico*, no qual serão efetuados os experimentos computacionais que apoiarão as provas de conceito, propõe-se um ambiente integrado composto pelos seguintes softwares livres:

- Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Geográficos (SGBDG), como o PostgreSQL⁴ junto ao PostGIS⁵, para armazenamento e consultas espaciais e espaço-temporais, com uso de especificações bem difundidas como a OGC SFA-SQL – *Simple Feature Access*, do *Open Geospatial Consortium*⁶ (FERREIRA et al., 2012).
- Bibliotecas para manipulação de dados geográficos, como a *TerraLib* (CAMARA, 2010), para acesso ao banco e retorno de conjuntos de dados de interesse;
- Ambientes de análises estatísticas e de redes complexas, como a plataforma *R* (TEAM, 2003) e seus pacotes para grafos e redes, como o *igraph*⁷.

O acoplamento entre os dois primeiros ítems é inerente à própria TerraLib, uma vez que esta se trata de uma biblioteca C++ com métodos e classes para operação de dados espaciais armazenados em SGBDG. A TerraLib tem nativamente algumas funcionalidades para grafos, mas não para Redes Complexas.

Interfaces entre ambientes Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e ambientes estatísticos desempenham papel fundamental na análise de dados espaciais e espaço-temporais. Há na literatura algumas iniciativas nesta linha (BAO, 2000; NETO, 2005).

⁴<http://www.postgresql.org.br>

⁵<http://postgis.refractor.net>

⁶<http://www.opengeospatial.org>

⁷<http://igraph.sourceforge.net>

O *R* (TEAM, 2003) é um ambiente estatístico de linguagem própria e código aberto muito utilizado atualmente. Nele existem e são desenvolvidos a cada dia inúmeros pacotes para o cálculo das mais diversas funções, tanto no domínio espacial quanto no temporal e espaço-temporal. Em (SANTOS, 2011) é descrito um acoplamento entre *R* e aplicativos em *C* e *C++*.

A biblioteca *Boost Graph Library (BGL)* (SIEK et al., 2002) é um outro conjunto de métodos e classes *C++* com reconhecido suporte a operações com grafos. Trata-se de uma biblioteca de código livre, gratuito e aberto, compatível com *Linux* e *Windows*.

Para a implementação dos índices a serem desenvolvidos na tese de doutorado, à qual a presente monografia reporta, deverá ser usado o mecanismo de acoplamento entre *R* e *C++*, de forma a poder utilizar tanto o pacote *Igraph* quanto a biblioteca *Boost*, com diálogo com a TerraLib para a operação de dados espaciais em SGBDG.

3 RCBT: DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

A seguir será apresentado um conjunto de resultados preliminares, referentes à definição das RCBT e à criação de índices para sua caracterização topológica com componentes espaciais. São apresentadas definições formais, valores mínimos e máximos e os limites em relação aos novos parâmetros.

3.1 DEFINIÇÃO

Um grafo (\mathbf{G}) é um conjunto de vértices (\mathbf{V}) e arestas (\mathbf{E}), denotado por $\mathbf{G} = \mathbf{G}(\mathbf{V}, \mathbf{E})$, no qual os vértices podem estar conectados uns aos outros pelas arestas (NETTO, 2001). Uma RC é um grafo não trivial, com um grande número de vértices e propriedades topológicas não necessariamente típicas nem de grafos regulares, como em autômatos celulares regulares, nem de grafos completamente aleatórios (NEWMAN et al., 2006; RÉKA; BARABASI, 2002; NEWMAN, 2003).

Redes Complexas de Base Territorializada (RCBT) são aquelas nas quais os vértices têm localização geográfica conhecida e a lei de criação de arestas apresenta dependência funcional frente a variáveis espaciais.

Nesta seção será usado, para todos os exemplos, o grafo G , apresentado na figura 3.1:

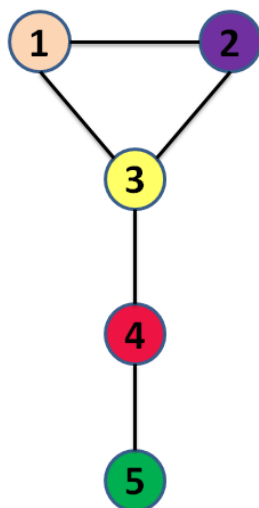


Figura 3.1 - Grafo G .

Este grafo apresenta 5 vértices e 5 arestas. É possível “desenhar” o grafo de diversas

formas, colocando os vértices em diferentes lugares, mas mantendo as relações de conexão: que vértice está ligado a qual vértice. Uma vez que a localização do vértice é conhecida, pode-se construir um “grafo de base territorializada”, seja mantendo as conexões pré-existentes, seja alterando a ligação entre os vértices por critérios que envolvam questões espaciais, como conectar dois vértices, se e somente se, a distância euclidiana entre eles for menor ou igual a um valor limiar. Uma vez construído o grafo, ou rede, é importante caracterizá-lo, calcular suas propriedades topológicas - agora topológicas com informação espacial, conforme as próximas seções.

3.2 CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA TRADICIONAL

Os índices básicos para caracterização topológica (sem informações espaciais), além do número de vértices e número de arestas, são: grau, coef. de aglomeração, caminho mínimo médio e diâmetro. Para cada um segue abaixo uma definição tradicional e breve – apresentar tal definição neste momento é relevante para a definição dos índices espaciais, de base territorializada:

- Grau –
 - Grau de um vértice: O grau k de um vértice i é determinado pela quantidade de vértices aos quais o vértice i está ligado, ou seja, o número de vizinhos do vértice i . Formalmente, define-se grau de um vértice como a cardinalidade do seu conjunto de adjacência: $|AdjG(i)|$.
 - Grau médio de um grafo: O grau médio $\langle k \rangle$ de um grafo é calculado pela média aritmética dos graus de cada vértice.
 - Distribuição de graus: Ao se fazer um histograma dos graus k encontrados em uma rede, temos a distribuição (frequência absoluta) de graus dessa rede. Define-se o índice $p(k)$ como a probabilidade (frequência relativa) de um vértice escolhido aleatoriamente em uma rede ter grau igual a k .
- Coef. de aglomeração –
 - Coef. aglomeração de um vértice: O coeficiente de aglomeração de um vértice é a probabilidade de seus vizinhos serem vizinhos entre eles. Pode-se calcular o coeficiente de aglomeração de um vértice i de uma rede a partir da igualdade $C_i = 2E_i/k_i(k_i - 1)$, com E_i o número de arestas entre seus vizinhos e k_i o grau do vértice.

- Coef. de aglomeração médio de um grafo: O coeficiente de aglomeração médio de uma rede é a média dos coeficientes de aglomeração de cada vértice.
- Mínimo caminho médio –
 - Mínimo caminho médio de um vértice: Define-se um caminho como o conjunto de vértices e arestas, alternadamente dispostos, compondo um "percurso" que vai de um vértice a outro da rede. O comprimento representativo desse caminho é o número de arestas que liga o primeiro ao último vértice do conjunto. O menor caminho que liga um vértice i a um vértice j da rede é chamado caminho mínimo entre os vértices i e j , e a média dos caminhos mínimos entre o vértice i e os demais vértices do grafo é o caminho mínimo médio – l – do vértice i .
 - Mínimo caminho médio de um grafo: O caminho mínimo médio do grafo, por sua vez, é a média dos caminhos mínimos médios de cada vértice.
- Diâmetro: O diâmetro de uma rede é definido como o maior dos caminhos mínimos entre quaisquer dois vértices.

Para o grafo G , os valores para tais índices são:

- Vértice 1: grau=2, coef. de aglom.=1, min. cam. médio= $\frac{7}{4}$;
- Vértice 2: grau=2, coef. de aglom.=1, min. cam. médio= $\frac{7}{4}$;
- Vértice 3: grau=3, coef. de aglom.= $\frac{1}{3}$, min. cam. médio= $\frac{5}{4}$;
- Vértice 4: grau=2, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= $\frac{3}{2}$;
- Vértice 5: grau=1, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= $\frac{9}{4}$.

O grau médio do grafo é, portanto, $\langle k \rangle = 2$, o coeficiente médio de aglomeração $\langle c \rangle = 0.47$, o caminho mínimo médio $\langle l \rangle = 1.7$ e o diâmetro 3. Estes são resultados da caracterização clássica de redes, desprezando totalmente questões espaciais explícitas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA RCBT

Antes de apresentar os índices para caracterização topológica agora com informações espaciais, é importante elucidar a diferença entre ligações topológicas e ligações geográficas, conforme a figura 3.2.

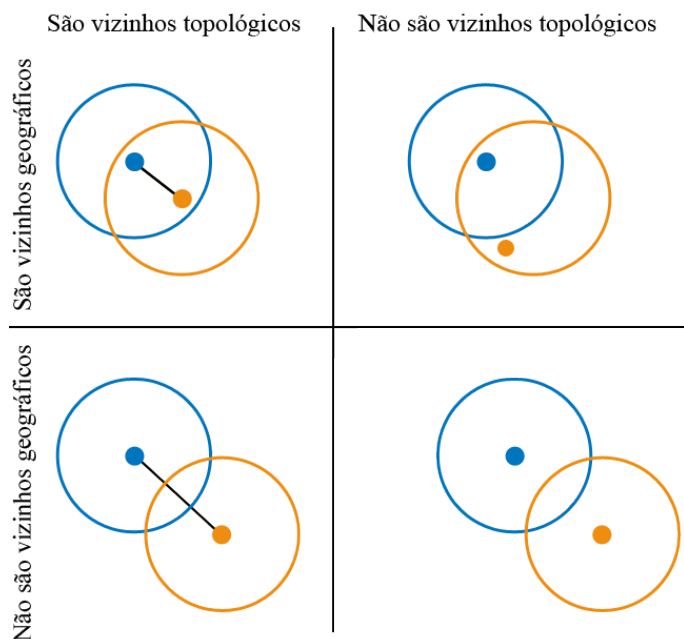


Figura 3.2 - Ligações topológicas e ligações geográficas.

É preciso deixar clara também qual a abordagem no trabalho: tem-se uma rede complexa “comum”, tradicional. Mantém-se a rede original, seus vértices e suas arestas, mas, por conhecer a localização espacial dos vértices e por estar em um espaço munido de métrica, calcula-se índices topológicos com componente espacial. Trata-se de uma abordagem geograficamente explícita, uma vez que os índices topológicos para as RCBT retornam explicitamente as características espaciais da rede. Não é de interesse aqui calcular índices puramente geográficos – relações geográficas, mas não topológicas são, nessa abordagem, desconsideradas.

Para cada um dos índices topológicos básicos, k , c , l , é proposto um índice topológico associado para RCBT: k^r , c^r , l^r . A seguir as definições e propriedades de tais índices. Todas as suposições são feitas para um grafo com número N de vértices, com N natural não nulo e não unitário. Além disso, dados dois vértices quaisquer suas posições (localizações do espaço) são necessariamente distintas: não há superposição

de vértices.

- Grau de um vértice: o k_i^r mede o número de vértices vizinhos a i que distam até r do vértice i .
- Coef. aglomeração de um vértice: O c_i^r dá a probabilidade dos vértices vizinhos do vértice i e que distem até r de i estarem a uma distância até r entre eles e sejam vizinhos entre eles; ou seja, se os vértices vizinhos de i e dentro da sua área de cobertura estão dentro da área de cobertura um do outro e são vizinhos um do outro – matematicamente o valor de c_i^r é dado pela razão do número de vezes que a situação anteriormente descrita ocorre sobre o número de vezes que ela poderia ocorrer: $\frac{[k_i^r \times (k_i^r - 1)]_1}{2}$.
- Mínimo caminho médio de um vértice: O l_i^r mede o número médio de arestas que é preciso percorrer para ir do vértice i a todos os outros, com o denominador para a média sendo o número de vértices “especialmente conexos”, ou seja, que podem ser alcançados a um número finito de “passos” (arestas).

Para o grafo G , figura 3.1, pode-se localizar os vértices de distintas formas, cada uma gerando um resultado possivelmente diferente de caracterização topológica com componente geográfica. Para exemplificar a influência da disposição dos vértices nos valores dos índices de RCBT, escolheu-se dois exemplos de disposições: o primeiro caso mantém a localização dos vértices conforme a figura 3.1, mas possui um raio de cobertura para a análise espacial, conforme a figura 3.3. O segundo caso mantém o mesmo raio de cobertura, porém altera a localização dos vértices, conforme a figura 3.4.

Para cada caso, a caracterização topológica fica como segue:

- a) Caso 1: a área de cobertura foi tal que apenas vértices topologicamente conectados estão geograficamente conectados, além disso, todos os vértices topologicamente conectados estão geograficamente conectados, logo a caracterização topológica para tal raio de cobertura provê os mesmos resultados da caracterização topológica tradicional (que desconsidera a localização dos vértices).

¹Fórmula semelhante à usada para cálculo de c , no caso sem abordagem espacial.

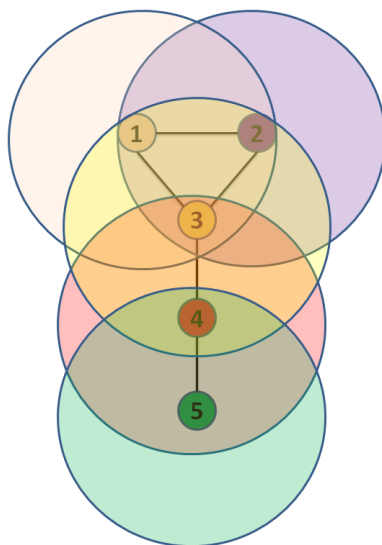


Figura 3.3 - Grafo G com vértices localizados de acordo com a configuração já estabelecida e com as áreas de cobertura.

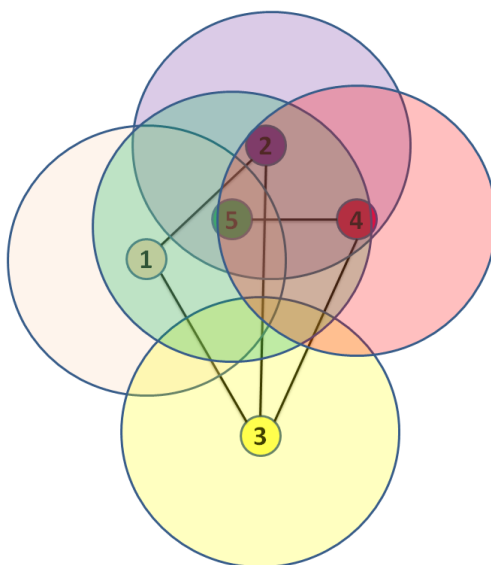


Figura 3.4 - Grafo G com vértices localizados de acordo com uma outra configuração, e com as áreas de cobertura.

b) Caso 2:

- Vértice 1: grau=0, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= 0;
- Vértice 2: grau=0, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= 0;
- Vértice 3: grau=0, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= 0;
- Vértice 4: grau=1, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= 0;
- Vértice 5: grau=1, coef. de aglom.=0, min. cam. médio= 1.

O grau médio do grafo é, portanto, $\langle k \rangle = 0.67$, o coeficiente médio de aglomeração $\langle c \rangle = 0$, o caminho mínimo médio $\langle l \rangle = 0.2$ e o diâmetro 1 – com a existência de vértices “geograficamente desconexo”: os vértices 1, 2, 3 e 4 não podem ser alcançados por um número finito de passos sobre a área de cobertura e considerando vértices vizinhos partindo de nenhum dos outros vértices.

O caso 1 é como um “elemento neutro” para as RCBT. Em situações gerais, os critérios para criação de arestas nem envolvem necessariamente apenas questões geográficas, tampouco envolvem todas as características geográficas, logo a RCBT, no caso geral, para a caracterização aqui proposta, se faz necessária.

Os valores para os índices encontrados no caso 2 são distintos dos obtidos para a caracterização topológica tradicional, apesar do conjunto de arestas ser exatamente o mesmo, o que mostra que para grafos com distribuições espaciais dos vértices distintas é possível, realmente, obter resultados dos índices topológicos distintos – é possível diferenciar topologicamente tais grafos, se eles forem tratados como RCBT.

Diferentes valores de raio de cobertura podem acarretar diferenciados valores para os índices topológicos das RCBT. Uma análise de valores limites é apresentada a seguir:

- Para k_i^r :
 - $\min k_i^r = 0$ e $\max k_i^r = N - 1, \forall r$ e $\forall i$.
 - Se $r \rightarrow 0$, então $k_i^r = 0 \forall i$. Em termos práticos, qualquer r menor que a menor distância entre quaisquer dois vértices da rede já gera tal resultado.
 - Se $r \rightarrow \infty$, então $k_i^r = k_i \forall i$. Qualquer r maior que a maior distância entre quaisquer dois vértices da rede é condição suficiente para tal resultado².
- Para c_i^r :
 - $\min c_i^r = 0$ e $\max c_i^r = 1, \forall r$ e $\forall i$.
 - Se $k_i^r = 0$ ou $k_i^r = 1$ então $c_i^r = 0, \forall r$ e $\forall i$.

²Não se trata, contudo, de uma condição necessária, como mostra o caso 1

- Se $r \rightarrow 0$, então $c_i^r = 0 \forall i$. Em termos práticos, qualquer r menor que a menor distância entre quaisquer dois vértices da rede já gera tal resultado.
- Se $r \rightarrow \infty$, então $c_i^r = c_i \forall i$. Qualquer r maior que a maior distância entre quaisquer dois vértices da rede é condição suficiente para tal resultado.

- Para l_i^r :

- $\min l_i^r = 0, \forall r \text{ e } \forall i$.
- Se $k_i^r = 0$ então $l_i^r = 0, \forall r \text{ e } \forall i$.
- Se $r \rightarrow 0$, então $l_i^r = 0 \forall i$. Em termos práticos, qualquer r menor que a menor distância entre quaisquer dois vértices da rede já gera tal resultado.
- Se $r \rightarrow \infty$, então $l_i^r = l_i \forall i$. Qualquer r maior que a maior distância entre quaisquer dois vértices da rede é condição suficiente para tal resultado.

4 CRONOGRAMA PROPOSTO

4.1 CALENDÁRIO

A seguir, uma breve descrição em sequência temporal dos próximos passos propostos para a pesquisa até o final do ano. Para 2013, o cronograma segue na seção produção científica esperada.

- Setembro: Correções da proposta.
 - Correções da monografia de defesa de proposta de acordo com as sugestões da banca examinadora e submissão à biblioteca digital do INPE;
- Outubro: Primeiras implementações dos novos índices.
 - Os algoritmos propostos na presente documento serão implementados, por meio de códigos *C++*¹, *R*, *TerraLib* e/ou *Boost*, utilizando as interfaces entre *R* e *C++*, analisadas no trabalho final da disciplina de Análise Espacial (SANTOS, 2011), cursada pelo doutorando em 2011 e ministrada pelos profs. Dr. Eduardo Celso Gerbi Camargo e Dr. Antônio Miguel V. Monteiro.
- Novembro: Rede de mobilidade urbana.
 - Entre os dias 6 e 8 de novembro, o doutorando apresentará parte do seu trabalho no WORCAP, o Workshop do curso de Computação Aplicada do INPE. O trabalho² a ser apresentado versa sobre a Rede Complexa construída com base nos dados reais de Origem–Destino do Plano Diretor de Transporte Urbano (PDTU) da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). A rede será analisada com base os índices tradicionais, com interpretação geográfica.
 - O restante do mês será dedicado ao desenho metodológico de como usar a rede apresentada no WORCAP 2012 para guiar os mecanismos de mobilidade urbana que serão utilizados no **DengueME**, relacionando “o lugar das pessoas” (rede de lugares) às “pessoas do lugar”

¹Durantes trabalhos prévios o doutorando já implementou nesta linguagem algoritmos clássicos da literatura para cálculo de propriedades de Redes Complexas, em parceria com diversos membros do grupo de pesquisa FESC – Física Estatística e Sistemas Complexos, do Instituto de Física de Universidade Federal da Bahia, grupo no qual o doutorando fez sua Iniciação Científica.

²deadline para submissão ao final de agosto

(agentes no modelo epidemiológico), a fim de gerar esquemas de vizinhança para a dinâmica de contato/contágio.

- Dezembro: Documentação e escrita.
 - Haverá uma reunião da equipe do projeto **DengueME**, na qual serão apresentados os resultados com a rede de mobilidade e os padrões de vizinhança.
 - Todos os índices para caracterização topológica de RCBT, implementados em outubro, sofrerão testes e documentação. Um conjunto de dados reais representará uma das baterias de testes. Tais dados poderão ser, por exemplo, os referentes à rede de mobilidade urbana da RMRJ – apresentados no WORCAP 2012 e na reunião do projeto **DengueME** – ou os dados de séries temporais georeferenciadas de casos de dengue em Salvador (1995 - primeira epidemia da cidade), já usados previamente em projetos de modelagem via Equações Diferenciais Ordinárias (SANTOS, 2008), e Autômatos Celulares (SANTOS, 2009); dentre outras opções de dados.

O calendário para as demais etapas será apresentado na próxima seção.

4.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA: PUBLICADA E ESPERADA

Na área de Redes Complexas o doutorando tem os seguintes trabalhos já publicados:

- Góes-Neto, A., Santos, L. B. L. et. al. (2010). Comparative protein analysis of the chitin metabolic pathway in extant organisms: A complex network approach. *BioSystems* 101 (2010) 5966 (GÓES-NETO; SANTOS, 2010);
- Andrade, R. F. S., Santos, L. B. L. et. al. (2011). Detecting Network Communities: An Application to Phylogenetic Analysis. *PLoS Comput Biol* 7(5): e1001131. (ANDRADE; SANTOS, 2011)– artigo agraciado com o prêmio FAPEX-PUBLIC 2011 de excelência em indicador de produção científica.

Um material introdutório ao tema, de autoria do doutorando e parceiros, pode ser encontrado para download livre na seção “Outras Publicações” na sua página pessoal³.

³ <http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=ser301-2011:wikileonardosantos>

Um exemplo de trabalho do doutorando, produzido em 2011, na linha de Modelagem Dinâmica Espacialmente Explícita de epidemias é o artigo completo apresentado oralmente no *Brazilian Symposium of GeoInformatics*, o GeoINFO, edição de 2011:

- Santos et. al. (2011). A Susceptible-Infected Model for Exploring the Effects of Neighborhood Structures on Epidemic Processes – A Segregation Analysis. Proceedings of GeoINFO 2011 (SANTOS et al., 2011).

No trabalho do WorCAP (2011) o doutorando apresentou um trabalho com uma revisão da literatura dos modelos dinâmicos espacialmente explícitos para dengue,

- Santos e Monteiro (2001). Uso e aplicação de modelagem computacional espacialmente explícita de processos epidêmicos: o exemplo da Dengue (SANTOS; MONTEIRO, 2011),

no qual são discutidos os três únicos artigos com modelos dinâmicos espacialmente explícitos para dengue:

- Santos, L. B. L. et. al. (2009). Periodic forcing in a three-level cellular automata model for a vector-transmitted disease. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics (Print)*, v. 80, p. 016102 (SANTOS, 2009).
- Medeiros, L. C. C., Monteiro, A. M. V., et al. (2011). Modeling the Dynamic Transmission of Dengue Fever: Investigating Disease Persistence. *PLOS neglected tropical diseases*. v. 5, n. 1 (MEDEIROS, 2011).
- Lana, R. M., Carneiro, T. G. S., Honório, N. A., Codeço, C. T. (2011). Multiscale analysis and modeling of aedes aegypti population spatial dynamics. *Journal of Information and Data Management*, v. 2, p. 211–220 (LANA et al., 2011).

A união dos modelos de (Santos et. al., 2009), (Medeiros et. al., 2011) e (Lana et. al., 2011) é o núcleo dos módulos entomológico e epidemiológico do **DengueME**.

Os únicos artigos a considerar RCBT em modelagem de epidemias são *Xu et al., 2006* e *Xu et. al., 2007* (XU et al., 2006; XU et al., 2007), que trazem os modelos Susceptível-Infetado (SI) e Susceptível-Infetado-Susceptível (SIS): os mais elementares dos

modelos epidemiológicos. Além disso, não são exibidos os padrões espaciais das simulações, apenas a evolução temporal da prevalência, incidência e suas velocidades. A hipótese de transmissão usada nesses trabalhos é que a probabilidade de um vértice i ser infectado por um vértice j é: $P(i, j) = \frac{1}{d(i, j)^\alpha}$, onde $d(i, j)$ é a distância euclidiana entre os vértices i e j , e α é um parâmetro a ser ajustado. Tal campo de probabilidade é, portanto, não homogêneo, mas ainda é isotrópico: possivelmente incoerente em situações reais.

Três artigos devem ser submetidos à publicação ao longo do doutoramento ao qual reporta a presente monografia, com os seguintes temas:

- Análise matemática dos índices para caracterização topológica de RCBT, com estudo de caso para redes aleatórias, livres de escala e de pequeno mundo – a ser submetido ao final do primeiro semestre de 2013;
- Ambiente computacional integrado para caracterização geográfico-topológica de RCBT, com estudo de caso para um dado real – a ser submetido ao final do segundo semestre de 2013;
- Aplicação da caracterização topológica de RCBT ao problema de modelagem computacional de epidemias de Dengue em centros urbanos – a ser submetido ao final do primeiro semestre de 2014.

O segundo semestre de 2014 será destinado à escrita do documento final da tese de doutorado.

Espera-se ainda, ao longo dos próximos dois anos, a participação do doutorando em um ou mais eventos internacionais, como congressos e escolas de verão, para amadurecimento do trabalho pelo contato com pesquisadores especialistas na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R.; SANTOS, L. *et al.*. Detecting network communities: An application to phylogenetic analysis. **PLoS Comput Biol**, v. 7, n. 5, p. e1001131, 2011. DOI:10.1371/journal.pcbi.1001131. 22

AUCHINCLOSS, A. H.; ROUX, A. V. D. A new tool for epidemiology: The usefulness of dynamic-agent models in understanding place effects on health. **American Journal of Epidemiology**, v. 168, n. 1, p. 47–97, 2008. DOI: 10.1093/aje/kwn118. 1

BAO, S. *et al.*. Seamless integration of spatial statistics and gis: The s-plus for arcview and the sbgrassland links. **J Geog Systems**, v. 2, p. 287–306, 2000. Material livre, disponível em: http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=ser301-2011:wiki_leonardosantos. 10

BARNETT, L.; PAOLO, E. D.; BULLOCK, S. Spatially embedded random networks. **Physical Review E**, v. 76, p. 056115, 2007. DOI:10.1103/PhysRevE.76.056115. 7

BOLLOBÁS, B. **Modern Graph Theory**. [S.l.]: Graduate Texts in Mathematics. Springer, 1998. V. 184. 8

BROECK, W. V.; GIOANNINI, C.; GONÇALVES, B.; QUAGGIOTTO, M.; COLIZZA, V.; VESPIGNANI, A. he gleamviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale. **BMC Infectious Diseases**, v. 11, n. 37, 2011. 9

CAMARA, G. *et al.*. **TerraLib: An Open Source GIS Library for Large-scale Environmental and Socio-economic Applications**. [S.l.]: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2010. ISBN: 978-0-12-375686-2. 10

CHOWELL, G.; HYMAN, J. M.; EUBANK, S.; CASTILLO-CHAVEZ, C. Scaling laws for the movement of people between locations in a large city. **Phys. Rev. E**, v. 68, p. 066102, 2005. 2

COELHO, F. C.; CRUZ, O. G.; CODECO, C. T. Epigrass: a tool to study disease spread in complex networks. **Nature Precedings**, v. 378, n. 1, 2007. 9

COLIZZA, V. *et al.*. The modeling of global epidemics: Stochastic dynamics and predictability. **Bulletin of Mathematical Biology**, v. 68, p. 1893–1921, 2006. 3

- _____. Epidemic modeling in complex realities. **C. R. Biologies**, v. 330, p. 364374, 2007. 1, 2
- DALL, J.; CHRISTENSEN, M. Random geometric graphs. **Physical Review E**, v. 66, p. 016121, 2002. 7
- DUARTE, F.; LIBARDI, R.; SANCHEZ, K. **Introdução à mobilidade urbana**. São Paulo: Editora Juruá, 2007. ISBN-13: 9788536216737. 1
- ERDÖS, P.; RÉNYI, A. On random graphs. **Publicationes Mathematicae**, v. 6, p. 290–297, 1959. 8
- FERREIRA, K. R.; C., C.; V., M. A. M. An extension of ogc sfa-sql schema for spatiotemporal observations. **Pre-print**, 2012. 10
- FORD, D. A.; KAUFMAN, J. H.; EIRON, I. An extensible spatial and temporal epidemiological modelling system. **International Journal of Health Geographics**, v. 5, n. 4, 2006. 9
- GARRISON, W. Connectivity of the interstate highway system. **Papers of the Regional Science Association**, 1960. 7
- GIBSON, C. C. *et al.*. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. **Ecological Economics**, v. 32, n. 2, p. 217–239, 2000. 2
- GÓES-NETO, A.; SANTOS, L. *et al.*. Comparative protein analysis of the chitin metabolic pathway in extant organisms: A complex network approach. **BioSystems**, v. 101, p. 59–66, 2010. 22
- HAYASHI, Y. A review of recent studies of geographical scale-free networks. **IPSJ Digital Courier**, v. 2, p. 155–164, 2006. 3, 7
- KANSKY, K. Structure of transportation networks. **Department of Geography Research**, v. 84, 1963. 7
- KEELING, M. J. Models of foot-and-mouth disease. **Proc. R. Soc. B**, v. 272, p. 11951202, 2005. 2
- KOSMIDIS, K.; HAVLIN, S.; BUNDE, A. Structural properties of spatially embedded networks. **EPL**, v. 82, p. 48005, 2008. DOI: 10.1209/0295-5075/82/48005. 7, 8

- KUBY, M. e. A comparison of geographic information systems, complex networks, and other models for analyzing transportation network topologies. **NASA/CR**, v. 213522, 2005. 3
- LANA, R. M.; CARNEIRO, T. G. S.; HONÓRIO, N. A.; CODEcO, C. T. Multiscale analysis and modeling of aedes aegypti population spatial dynamics. **Journal of Information and Data Management**, v. 2, p. 211–220, 2011. 23
- LEVINS, R. The strategy of model building in population biology. **Am. Sci.**, v. 54, p. 421–431, 1966. 2
- LIN, Z. C.; YANG, L.; Q., Y. K. Geographical effects on complex networks. **Chin. Phys. Lett**, v. 22, n. 12, p. 3214, 2005. 8
- MASSAD, E. *et al.*. **Métodos Quantitativos em Medicina**. [S.l.]: Editora Manole, 2004. ISBN: 8520414125. 1
- MAY, R. M. **Stability and Complexity in Model Ecosystems**. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1972. 2
- MEDEIROS, L. C. D. *et al.*. Modeling the dynamic transmission of dengue fever: Investigating disease persistence. **PLOS neglected tropical diseases**, v. 5, n. 1, 2011. DOI:10.1371/journal.pntd.0000942. 23
- MONTIS, A.; BARTHÉLEMY, M.; CHESSA, A.; VESPIGNANI, A. The structure of inter-urban traffic: a weighted network analysis. **Env. Plann. J. B.**, v. 34, p. 905–924, 2007. 3
- NETO, P. *et al.*. A. Integration of statistics and geographic information systems: the r/terralib case. 2005. Disponível em <http://www.leg.ufpr.br/pedro/aRT/docs/P74.pdf>, acessado em 05/12/2011. 10
- NETTO, P. O. B. **Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2001. 402 p. 1, 13
- NEWMAN, M. E. J. The structure and function of complex networks. **SIAM Review**, v. 45, p. 167–256, 2003. 2, 10, 13
- _____. Complex systems: A survey. **Am. J. Phys.**, p. 800–810, 2011. DOI 10.1119/1.3590372. 2
- NEWMAN, M. E. J.; BARABASI, A. L.; WATTS, D. J. **The Structure and Dynamics of Networks**. [S.l.]: Princeton Studies in Complexity, 2006. ISBN-10: 0691113572. 2, 13

- NYSTUEN, J.; DACEY, M. A graph theory interpretation of nodal regions. **Papers and Proceedings of the Regional Science Association**, v. 7, p. 29–42, 1961. 7
- RÉKA, A.; BARABASI, A. L. Statistical mechanics of complex networks. **Rev. Mod. Phys.**, v. 74, p. 47–97, 2002. 2, 10, 13
- ROSS, S. M. **Introduction to Probability Models**. [S.l.]: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2010. ISBN: 978-0-12-375686-2. 8
- ROZENFELD, A. F.; COHEN, R.; AVRAHAM, D. ben; HAVLIN, S. Scale-free networks on lattices. **Phys. Rev. Lett.**, v. 89, p. 218701, 2002. 7, 8
- SANTOS, L. B. L. Modelagem matemática e computacional da dengue utilizando autômatos celulares interligados e sistema não autônomo de equações diferenciais. **Jornada de Iniciação Científica do Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA)**, 2008. 22
- _____. Ambientes integrados para análise estatística em sig – interfaces r/c++. **Trabalho final da disciplina Análise Espacial**, p. 8, 2011. 11, 21
- SANTOS, L. B. L. **Redes Complexas de Base Territorializada**. 43 p. Qualificação de Doutorado em Computação Aplicada — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. 3, 7
- SANTOS, L. B. L.; MARETTO, R. V.; MEDEIROS, L. C. C.; FEITOSA, F. F.; MONTEIRO, A. M. V. A susceptible-infected model for exploring the effects of neighborhood structures on epidemic processes a segregation analysis. **Proceedings of XII Brazilian Symposium on GeoInformatics (GEOINFO)**, p. 12, 2011. 23
- SANTOS, L. B. L.; MONTEIRO, A. M. V. Uso e aplicação de modelagem computacional espacialmente explícita de processos epidêmicos: o exemplo da dengue. **Anais do WorCAP**, p. 4, 2011. Disponível em: http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2011/10.18.00.26/doc/worcap2011_submission2.pdf. 1, 23
- SANTOS, L. B. L. *et al.*. Periodic forcing in a three-level cellular automata model for a vector-transmitted disease. **Physical Review. E**, v. 80, p. 016102, 2009. 22, 23

- SANTOS, S. M.; BARCELLOS, C. **Abordagens espaciais na saúde pública. Série Capacitação e Atualização em Geoprocessamento em Saúde.** [S.l.]: Graduate Texts in Mathematics. Springer, 2006. 136 p. Serie B. 2
- SIEK, J. G.; LEE, L. Q.; LUMSDAINE, A. Boost graph library. **The User Guide and Reference Manual**, 2002. 11
- SOUSA, P. A. M. **Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território.** 313 p. Tese em Geografia — Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010. 7
- TEAM, R. D. C. An introduction to r. **R Foundation for Statistical Computing**, 2003. Disponível em <http://www.r-project.org/>. 9, 10, 11
- XU, X.; WANG, W.; ZHOU, T.; CHEN, G. Geographical effects on epidemic spreading in scale-free networks. **Int. J. Mod. Phys. C**, v. 17, p. 1815, 2006. 23
- XU, X.; WUB, Z.; CHEN, G. Epidemic spreading in lattice-embedded scale-free networks. **Physica A**, v. 377, p. 125–130, 2007. 23
- YANG, K. Q.; L., Y.; GONG, B. H.; LIN, Z. C.; HE, H. S.; HUANG, L. Geographical networks: geographical effects on network properties. **Front. Phys. China**, v. 3, n. 1, p. 105–111, 2008. 8

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.