

Arcabouço para modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais no TerraME

André Chiarelli^{1,2}, Gilberto Câmara³, Taciana Dias⁴, Lúbia Vinhas⁵

^{1,3,5}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Av. dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja – CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP
– Brasil

²Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD)

⁴Universidade Federal do Espírito Santo(UFES)
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras – CEP 29075-910 – Vitória – ES – Brasil

andre.chiarelli@inpe.br, gilberto.camara@inpe.br,
taciana.dias@ufes.br, lubia@dpi.inpe.br

Resumo. Dada à importância das mudanças ambientais globais, a comunidade científica desenvolve modelos espaço-temporais que indicam cenários para análise de impactos. O acoplamento de técnicas de Dinâmica de Sistemas, em ambiente de modelagem com espacialização de dados, necessita de simulação dos diferentes efeitos do uso dos recursos naturais, tais como, estoques, realimentação, atrasos em respostas e fluxos de material e energia. Neste trabalho, o foco principal é fornecer um arcabouço que possibilite a utilização dos conceitos-chaves de dinâmica de sistemas para análise histórica de dados espaciais no ambiente de modelagem espacial TerraME.

Abstract. Given the importance of global environmental change, the scientific community develops space-temporal models that indicate scenarios for impact analysis. Coupling System Dynamics techniques, demands different effects simulation of natural resources usage, such as stocks, feedbacks, responses and delays in material and energy flows. The main focus of this work is to provide a framework that enables the use of the key concepts of Systems Dynamics for historical analysis of spatial data using the spatial modeling environment TerraME.

1. Introdução

Um sistema é considerado como um conjunto de elementos interconectados de forma organizada e coerente capaz de representar fenômenos da realidade que são disparados ou influenciados por forças externas, com respostas características que produzem um padrão ou comportamento em escala determinada [Meadows, 1974]; [Meadows, 2004]; [Forrester, 1985]. Para melhor compreensão e assimilação destes sistemas pelo ser humano, é necessário uma simplificação. Desta forma, adotamos modelos para representar uma realidade específica. Isso resulta em ferramentas de auxílio para simulações de diversos cenários para o problema investigado.

Na década de 1960, Jay Forrester, desenvolveu uma abordagem computacional, conhecida como Dinâmica de Sistemas, com o intuito de analisar e resolver problemas complexos, com foco em modelagem e análise de regras. Essa abordagem, inicialmente chamada de ‘Dinâmica Industrial’ [Forrester 1961]; [Angerhofer e Angelides, 2000], considera as inter-relações entre os diversos elementos de um sistema e utiliza a simulação computacional para analisar a estrutura de um sistema e seu comportamento ao longo do tempo. Atualmente, ela é utilizada em diversas linhas de pesquisa e contempla quatro elementos básicos: (i) estoque, considerado variável de estado que pode variar em escala temporal; (ii) fluxo, considerado variável de ação que interage com estoques, resultando em possíveis variações; (iii) auxiliares, utilizados para modelar equações de fluxos e (iv) conectores, que representam as inter-relações entre os outros elementos.

As técnicas utilizadas em Dinâmica de Sistemas evoluíram muito desde Forrester com a finalidade de oferecer melhor suporte à compreensão das transformações decorrentes dos processos e das regras existentes no sistema [System Dynamic Society, 2009]; [Forrester, 2007]. Muitos dos modelos integrados de uso da terra e de mudanças globais são desenvolvidos baseados em tais técnicas [Forrester, 1969]; [Forrester, 1972]; [Forrester, 1992]; [Donella, 1972]; [Foley et al. 2005] e, para tais modelos, a análise comportamental dos dados no espaço é necessária.

O ambiente de modelagem TerraME [Carneiro, 2003], desenvolvido pela parceria entre o Laboratório de Modelagem e Simulação de Sistemas Terrestres (TerraLAB) da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), provê ao modelador abstrações para os conceitos de escala, trajetória, autômatos celulares e autômatos celulares aninhados que são utilizados nas descrições de modelos dinâmicos espacialmente explícitos [Carneiro, 2003].

O interesse principal desta pesquisa está em oferecer uma extensão para o ambiente TerraME que possibilite o desenvolvimento de modelos espaciais, utilizando as técnicas de Dinâmica de Sistemas para análise comportamental e histórica de dados especializados.

Este documento é estruturado da seguinte forma:

- A seção 2 apresenta a interação das técnicas de Dinâmica de Sistemas com o ambiente de modelagem espacial TerraME.
- A seção 3 apresenta a arquitetura utilizada para tal integração.
- A seção 4 detalha a metodologia proposta para modelagem utilizando Dinâmica de Sistemas Espaciais.
- Na seção 5 discutimos os componentes de Dinâmica de Sistemas implementados para a extensão proposta.
- A seção 6 apresenta as considerações finais deste trabalho.

2. Extensão de Dinâmica de Sistemas Espaciais para o ambiente de modelagem TerraME

Modelos relacionados à mudança de uso e cobertura do solo, processos hidrológicos em áreas urbanas ou propagação de doenças baseiam-se em análise de dados espaciais com representação das condições iniciais para projeções dos dados no futuro, conhecidas como cenários da simulação do modelo [Assad e Almeida 2004];

Câmara et al., 1996] ;[Câmara et al., 2000];[Câmara et al., 2008]; [Espindola, 2012]; [Nobre e Assad, 2012]; [Nobre, 2005]; [Muniz, 2007]; [Pinto e Assad, 2008]; [Rockstrom et al. 2009a e 2009b]. Os cenários são concebidos a partir de diversos atributos provenientes das diferentes áreas do conhecimento, de tal forma que se possa compreender como esses atributos se relacionam entre si, dentro de limites pré-definidos pelo modelador [Muniz, 2007]; [Ramankutty et al. 2008]; [Saysel et al. 2002].

Em modelos que utilizam dados especializados, tais cenários proveem melhor visualização e entendimento da dinâmica de um sistema se representados no espaço em um determinado tempo [Cellier, 2008].

Para a integração de técnica de Dinâmica de Sistemas com o ambiente de modelagem TerraME, variáveis de estoque, foram estendidas para variar tanto em escala temporal quanto em escala espacial. No TerraME a referência espacial é dividida em um conjunto de células multivaloradas representadas por uma grade onde cada célula possui um ou mais atributos. Cada célula possui dois atributos especiais: (1) o atributo que registra o período de tempo desde a última mudança de um atributo da célula e o (2) atributo que é uma cópia de todos os atributos da célula até o instante anterior à última mudança ocorrida [Carneiro, 2003].

Para a representação espacial de estoques, foram necessários desenvolvimentos de métodos para fornecer interface entre estoques com espaços celulares. Os estoques, especializados utilizando a interface provida, possibilitam geração de cenários para a análise histórica, no espaço e tempo. Os cenários também possibilitam a análise de como os estoques são influenciados por outros elementos do sistema, como fluxos e realimentações. A Figura 1 ilustra a espacialização do estoque através do conceito de espaço celular com um conjunto de atributos do TerraME.

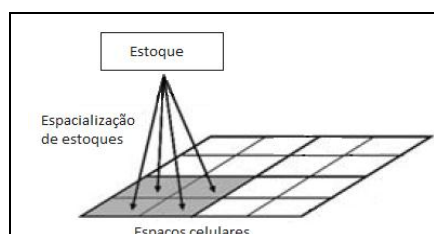


Figura 1. Estoques de Dinâmica de Sistemas Especializados

Diferentes estoques podem possuir a mesma referência espacial sem se afetarem diretamente. Desta forma, ao invés de simplesmente levar em consideração de como variáveis X afetam outras variáveis Y e como variáveis Y afetadas respondem a variáveis X, é possível, também, levar em consideração a localização das variáveis representada por uma terceira variável Z.

A forma de alteração de um estoque deve ser através de fluxos representados por funções, que podem mudar o valor quantitativo e/ou localização do estoque no tempo. As conexões de fluxos e estoques estabelecem a dinâmica do sistema espacial

A estrutura para modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais proposta está formalizada de forma iterativa com a estrutura tradicional de Dinâmica de Sistemas. A metodologia para desenvolvimento de modelos utilizando tal estrutura aborda os seguintes passos:

1. Identificar o problema.
2. Identificar conjuntos de estoques com dados quantitativos e espaciais.
3. Identificar fluxos que interagem e seguem estoques no sistema.
4. Identificar as interconexões entre estoques e fluxos que formam o problema.
5. Construir o sistema com partes que compõem o modelo computacional.
6. Simular o modelo.
7. Analisar o comportamento e dados do modelo no espaço e tempo para avaliar se a simulação produz o comportamento esperado baseado no mundo real.
8. Testar regras alternativas no modelo para verificar parâmetros que podem ser adequados para estudar o problema.
9. Implementar soluções.

Inúmeras vantagens podem ser obtidas utilizando realimentação de informação e espacialização de dados, principalmente, se considerar que, para o desenvolvimento de modelos, é possível abstrair convenientemente uma gama de informações necessárias para utilização de tais técnicas, permitindo foco na análise de regras e do sistema e projeções de resultados, com visão do sistema espacializado.

3. Arquitetura da extensão proposta

A extensão proposta possui arquitetura organizada em três camadas que oferecem respectivamente suporte a modelagem, simulação e apresentação dos cenários com mapas e gráficos resultantes da transformação histórica dos estoques.

A primeira camada é composta pelo módulo de Modelagem de Dinâmica de Sistemas Espaciais, o qual contém componentes que possibilitam escrever modelos com uma linguagem de alto nível. Estes componentes possuem implementação das duas principais estruturas desta extensão proposta: estoques espacializados e a estrutura mundo. A estrutura mundo define o conjunto de estoques pertencentes ao modelo e o tempo para simulação.

A segunda camada é dividida em dois principais módulos: (i) Dinâmica de Sistemas, que possui a implementação das técnicas tradicionais desta abordagem computacional. Estas técnicas tradicionais são utilizadas principalmente para afetar o comportamento de fluxos devido a um determinado estado de um estoque. Tais técnicas são conhecidas na abordagem de Dinâmica de Sistemas como técnicas de realimentação e de atrasos em respostas; (ii) Ambiente de Modelagem espacial, que, para este trabalho, possui componentes com implementação para integração de componentes dos demais módulos com o ambiente de modelagem TerraME.

A terceira camada, composta pelo quarto módulo, Análise histórica de dados, possui os componentes responsáveis por apresentar as projeções do comportamento do sistema através de gráficos e mapas.

A Figura 2 apresenta a arquitetura em camadas da extensão proposta.



Figura 2. Arquitetura da extensão de Dinâmica de Sistemas para o TerraME

4. Implementação da extensão de Dinâmica de Sistemas Espaciais para o ambiente de Modelagem TerraME

A implementação da extensão de Dinâmica de Sistemas proposta com o ambiente TerraME foi realizada na linguagem LUA [Ierusalimschy *et al.*, 1996]. Os nomes das estruturas, estoque, fluxo de entrada, fluxo de saída, parâmetros específicos do estoque e mundo, foram dadas em inglês, *Stock*, *Inflow*, *Outflow*, *Parameter* e *World*.

Com o intuito de padronizar a forma de desenvolvimento de modelos utilizando esta extensão, a variável *Stock* foi implementada conforme estrutura:

```

Stock {value,
        cell{}
        Inflow{}
        Outflow{}
        Parameter{}
}

```

Onde *Stock* é do tipo tabela na linguagem LUA que possui a variável *value*, para armazenar o valor quantitativo do estoque e possui as tabelas: (i) *cell*{}, que, no ambiente de modelagem TerraME, representa uma referência espacial do estoque, (ii) *Inflow* e *Outflow*, tabelas para funções que serão executadas para representar os fluxos que manipulam tanto a variável *value* quanto *cell*{}, de um estoque, (iii) *Parameter*{}, que representa uma tabela com funções que caracterizam o estoque. Os parâmetros são variáveis de informação que interagem com fluxos, resultando em possíveis variações dos mesmos.

Para esta extensão, os fluxos são representados por funções e classificados em dois tipos básicos: (i) realimentação para balanceamento do valor quantitativo do estoque e (ii) realimentação de reforço, que pode possuir características positivas ou negativas, caracterizando crescimento ou decaimento do estoque respectivamente.

As funções que representam os fluxos podem ser específicas para o problema do modelo e são utilizadas como *Inflow* ou *Outflow* de estoques. A conexão entre fluxos e

estoques é realizada através da inserção fluxos na tabela `Inflow{}` ou `Outflow{}` da tabela `Stock`.

```
fluxo_1 = function(paremetro_x)
    [...]
end
fluxo_2 = function(paremetro_y)
    [...]
end
```

A estrutura `World` é uma tabela que representa uma aglutinação das partes do modelo, cujo o comportamento será analisado no tempo determinado. Esta estrutura possui a tabela `Stock{}`, que são tabelas para armazenar os estoques do modelo e as variáveis `start`, para armazenar o início do tempo da simulação do modelo e `dt` com o valor de intervalo diferencial de tempo. Esta estrutura possui a função `run(endTime)`, que proverá a simulação do modelo até o tempo `endTime` especificado. A estrutura abaixo representa como a estrutura `World` foi implementada.

```
World { Stock {},
    start,
    dt,
    run(endTime)
}
```

5. Considerações finais

Evidencia-se com este trabalho a vinculação entre técnicas de modelagem de Dinâmica de Sistemas com dados espaciais e a necessidade para tal vinculação. Este estudo examina comportamentos de sistemas complexos, com influência de realimentação em estruturas que manipulam dados espaço temporais.

Este é o primeiro passo para um estudo mais aprofundado das técnicas para Dinâmica de Sistemas Espaciais com o objetivo de melhorar e adequar as estruturas propostas para oferecer suporte ao desenvolvimento de modelos espaciais influenciadas por realimentação, levando em consideração a espacialização dos estoques. As definições das estruturas propostas neste trabalho podem ser aplicáveis para outros ambientes de modelagem espacial.

A extensão oferecida utiliza abordagens interdisciplinares para o acoplamento de diferentes técnicas de tratamento de dados espaciais e análise histórica dos mesmos. O foco para o desenvolvimento desta extensão é disponibilizar cenários de sistemas, no espaço e tempo, para estimativas e análises de mudanças de comportamentos, impactos e danos, possibilitando estudos que necessitam avaliar sistemas em termos de ambiente.

Referências Bibliográficas

- Assad M. L. L.; Almeida J. (2004), “Agricultura e sustentabilidade. Contexto, desafios e cenários”. *Ciência e Ambiente*, v. 49, p. 15-30.
- Angerhofer B. J.; Angelides M. C. (2000), “System dynamics modeling in supply chain management: research review. “, *Simulation Conference, 2000. Proceedings*. Winter, vol.1, no., pp.342-351 vol.1.
- Câmara, G., Souza, R. C., Freitas, U.M.; Garrido, J.C.P. (1996) “SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling”. *Computers and Graphics*, 15(6): 13-22.
- Câmara, G.; Souza, R.; Pedrosa, B.; Vinhas, L.; Monteiro, A.; Paiva, J; Carvalho, M.;
- Gattas, M. (2000). “TerraLib: Technology in Support of GIS Innovation”. II Workshop Brasileiro de Geoinformática, GeoInfo2000.
- Câmara, G., Vinhas, L., Ferreira, K., Queiroz, G., Souza, R. C. M., Monteiro, A. M. V., Carvalho, M. T., Casanova, M. A., Freitas, U. M. (2008) “TerraLib: An open-source GIS library for large-scale environmental and socio-economic applications”. In B. Hall and M. Leahy (ed), *Open Source Approaches to Spatial Data Handling*. Berlin: Springer, (ISBN 978-3-540-74830-4).
- Carneiro, T.G.S. (2003) “Nested-CA: a foundation for multiscale modeling of land use and land change”. São José dos Campos: INPE.
- Cellier, F. E. (2008), “World3 in modelica: creating system dynamics models in the modelica framework”, *International Symposium on Computer Science and Computational Technology*, p.809-813.
- Espindola G. et al. (2012), “Agricultural land use dynamics in the Brazilian Amazon based on remote sensing and census data”. *Applied Geography*, v 32, n.2, p.240-252.
- Foley et al. (2005) “Global consequences of land use.”, *Science*, v.309, n.5734, p.570-574.
- Forrester, J. W. (1961), “Industrial dynamics”, Cambridge: M.I.T. Press.
- Forrester, J. W. (1969), “Urban dynamics”, Washington: Transportation research board Press.
- Forrester, J. W. (1972), “World dynamics”, Waltham: Pegasus Communications.
- Forrester, J. W. (1985), “The model versus a modeling process”, *System Dynamics Review*, v.1, p. 133–134. doi: 10.1002/sdr.4260010112.
- Forrester, J. W. (1992), “Policies, decisions and information sources for modeling”, *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 1, p. 42-63.
- Forrester, J. W. (2007), “System dynamics—the next fifty years”, *System Dynamics Review*, *System Dynamics Review Special Issue: Exploring the Next Great Frontier*, v. 23, n. 2-3, p. 359–370.
- Meadows, D. L. et al. (1974), “Dynamics of growth in a finite world”, Cambridge: WrightAllen Press.

- Meadows, D. H. et al. (2004), "Limits to growth, 30 years update", Chelsea: Chelsea Green Publishing.
- Nobre, C. A.; Assad, E. D.; Oyama, M. D. Mudança ambiental no Brasil: O aquecimento global e o impacto na Amazônia e na agricultura brasileira. *Scientific American Brasil*, v. 80, n. especial, p. 70-75, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/05.18.13.00>>. Acesso em: 21 fev. 2012.
- Nobre, C. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudança do clima. In: BRASIL, PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS (ed.). Mudança do clima: negociações internacionais sobre a mudança do clima; Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudança do clima. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, 2005. v.1, p.147-216.
- Muniz I. C. et al. (2007), "Modelagem e simulação na agropecuária". *Pubvet*, v. 1, n.11.
- Pinto H. S.; Assad E. D. (2008), "Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira." Campinas: Unicamp.
- Ramankutty N. et al. (2008), "Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000." *Global Biogeochemical Cycles*, v.22, p.1-19.
- Rockstrom J. et al. (2009a), Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, v.14, n.2, p.32, 2009a
- Rockstrom J et al. (2009b) "A safe operating space for humanity". *Nature*, v.461,p.472-475.
- Saysel A. K.; Barlas Y.; Yenigun O. (2002), "Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach." *Journal of Environmental Management*, v.64, n.3, p.247-260.