

Representação de dados e Modelos de Dados Espaço-Temporais em SIG

Alexandro Gularte Schäfer¹
Ruth Emília Nogueira²

¹ Universidade Federal do Pampa
CEP 96415-700, Bagé, RS, Brasil
alexandro.schafer@unipampa.edu.br

² Universidade Federal de Santa Catarina
CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
ruthenogueira@gmail.com

Abstract: The Geographic Information Systems (GIS) constitute a technology able to address problems involving the temporal aspect of the data. However, the question of how to represent the spatio-temporal dynamic in GIS was ignored until the late 1980s. Since then, some models of spatio-temporal data that incorporate the temporal dimension in GIS have been proposed. This article aims to address and discuss the issue of modeling of spatio-temporal GIS. Initially, we present issues related to stages of development of GIS with spatio-temporal characteristics and data representation in GIS. Then, to address some of the major models of spatio-temporal GIS developed in the last decades.

Key-Words: GIS, Data representation, Spatio-temporal data model.

1 Introdução

Um sistema de informação geográfica (SIG) com características temporais tem como objetivo processar, gerenciar e analisar dados espaço-temporais. Esses sistemas melhoram os SIG existentes (estáticos ou atemporais) porque proporcionam a manipulação da componente temporal dos dados (YUAN, 1996a). A possibilidade de considerar cenários passados, presentes e futuros do ambiente modelado proporciona novas características aos SIG com características temporais, superando a capacidade dos SIG estáticos atuais (ABRAHAM e RODDICK, 1999).

De acordo com Couclelis (2005), a complexidade da gerência, da manutenção e da operação dos aspectos espaço-temporais gera, atualmente, forte demanda de pesquisa nessa área, já que muitas questões desafiadoras ainda permanecem sem resolução. Segundo Le (2005b), a questão da modelagem de dados espaço-temporal é um elemento-chave na busca pela incorporação da variável tempo em sistemas de informação geográfica.

Um modelo de dados é definido por Peuquet (1984) como uma descrição geral de conjuntos específicos de entidades e de seus relacionamentos. A característica mais básica de um modelo de dados é que se trata de uma abstração da realidade. O modelo de dados é o cerne conceitual de um sistema de informação; ele define as entidades, os relacionamentos, as operações e as regras, para manter a integridade do banco de dados. Como os SIG não são capazes de processar a informação que está além das capacidades de representação de seus modelos de dados, a representação geográfica e os modelos de dados são críticos para melhorar o processamento de consultas e as análises da informação geográfica (WORBOYS *et al.*, 1990).

De acordo com Peuquet (2002), o desenvolvimento da capacidade temporal em modelos de dados geográficos, e SIG em geral, começou com o então inovador trabalho de Langran, no final dos anos 1980 (LANGRAN e CHRISMAN, 1988). Segundo Peuquet (1992), a publicação “*Time in Geographic Information Systems*” de Langran (1992) é considerada um ponto de

referência em SIG temporal. A partir daí, vários modelos de dados espaço-temporais que incorporam tempo em SIG vêm sendo propostos.

O presente artigo tem como objetivo abordar e discutir a questão da modelagem de dados espaço-temporal em SIG. Para tanto, apresentam-se, inicialmente, questões relacionadas aos estágios no desenvolvimento de SIG com características espaço-temporais e à representação de dados em SIG. Em seguida, apresentam-se alguns dos principais modelos de dados espaço-temporais em SIG, desenvolvidos nas últimas décadas.

2 Estágios no Desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica Espaço-Temporais

Worboys (2005) descreve quatro estágios principais na introdução da dimensão temporal em sistemas de informação geográfica. São eles o estágio zero (SIG estático), o estágio um (instantâneos temporais), o estágio dois (mudança do objeto) e o estágio três (eventos, ações e processos).

O estágio zero é, em geral, onde a tecnologia SIG comercial está atualmente. Neste estágio é possível representar o passado ou o futuro, mas somente um único momento no tempo pode ser representado. Além disso, não é possível fazer comparações entre os estados do objeto entre diferentes datas.

No estágio um, o mundo é visualizado como uma sucessão de configurações espaciais de objetos em instâncias temporais. Esta tem sido a abordagem mais comum em modelos espaço-temporais até agora. Um instantâneo temporal é uma representação do estado de um objeto de estudo em um domínio particular e em um único momento no tempo. Uma sequência de instantâneos é uma coleção de instantâneos temporais, geralmente todos da mesma área, indexados por uma variável temporal. Não é realmente o domínio do tempo que dita estas propriedades, mas a natureza do fenômeno que está sendo considerado.

No estágio dois, o foco muda da sequência temporal de objetos, seus atributos e relacionamentos, para mudanças que podem acontecer a objetos, a atributos e a relacionamentos. Um modelo do mundo baseado na evolução de objetos ao longo do tempo, retendo identidade, mas modificando atributos espaciais e outros, parece natural. Entretanto, surgem problemas relacionados à continuidade da identidade do objeto ao longo do tempo.

O estágio três, na evolução dos sistemas de informação espaço-temporal, é um tratamento completo de mudança em termos de eventos, ações e processos. No estágio três espera-se que sejam modelados eventos complexos, a maneira com que objetos podem participar nesses eventos e as relações entre os eventos.

3 Representação de dados em sistemas de informações geográficas

De acordo com Yuan et al. (2004), a representação geográfica constitui um elemento central no desenvolvimento de um SIG. Ela é uma maneira de comunicar a informação geográfica e é também uma estrutura binária em um meio computacional ou de armazenamento eletrônico que corresponde a um objeto, medida ou fenômeno do mundo. A representação em SIG inclui três aspectos das entidades do mundo real: sua localização na superfície da terra, seus atributos e qualquer relacionamento importante entre entidades (GOODCHILD, 2008). Como a representação proporciona fundamentos conceituais e computacionais para processar, integrar, analisar e visualizar dados geográficos, a representação escolhida para um fenômeno geográfico tem um profundo impacto em sua interpretação e análise (YUAN, 2010).

Os sistemas de informação geográfica e as análises espaciais são influenciados pelas representações em três níveis distintos: o nível de modelo de dados, o nível de formalização e o nível de visualização. O modelo de dados é o cerne conceitual de um sistema de informação, ele define as entidades, os relacionamentos, as operações e as regras para manter a integridade do banco de dados.

Nas quatro últimas décadas, testemunha-se uma massiva proliferação de modelos de dados representados em um SIG, estrutura de dados e discussões envolvendo representação e ontologia geográfica. A matriz geográfica de Berry (BERRY, 1964) e o esquema tridimensional de Sinton (SINTON, 1978) proporcionaram antigos modelos do mundo geográfico, como representações vetoriais e matriciais. Nos anos 1970, as estruturas de dados topológicas foram extensivamente discutidas; nos anos 1980, verificou-se que o modelo relacional oferecia uma maneira simples de implementar estruturas topológicas em SIGs comerciais (WORBOYS, 1995). Nos anos 1990, o modelo orientado a objeto foi amplamente adotado, embora frequentemente utilizando tecnologia de banco de dados relacional. Recentemente, esforços são realizados no sentido de estender estes modelos para incluir a dimensão temporal (GOODCHILD et al., 2007). Nesse processo de desenvolvimento dos SIGs, a distinção entre os conceitos de objeto discreto e campo contínuo recebe considerável atenção.

Couclelis (2005) argumenta que a distinção entre a representação com base em campo e a com base em objeto foi fundamental para o entendimento do mundo em nossa volta, e fortemente relacionado à percepção humana. Segundo Goodchild et al. (2007), os conceitos de objeto discreto e campo contínuo que foram introduzidos no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, têm dominado o pensamento sobre a concepção humana do espaço geográfico.

Na visão de campo, a realidade é modelada por variáveis que possuem uma distribuição contínua no espaço. Toda posição no espaço geográfico pode ser caracterizada através de um conjunto de atributos medidos para um conjunto de coordenadas geográficas. Na prática, a variação contínua dos atributos é percebida como um conjunto de elementos discretos. (KJENSTAD, 2006).

Na visão de objeto, a realidade consiste de entidades individuais, bem definidas e identificáveis. Cada entidade tem suas propriedades e ocupa um determinado lugar no espaço. A realidade é modelada como um grande espaço onde entidades estão distribuídas sem que, necessariamente, todas as posições do espaço estejam ocupadas. Duas ou mais entidades podem estar situadas sobre uma mesma posição geográfica (KJENSTAD, 2006).

Outros conceitos são os de objeto campo e de campo de objetos. Yuan (1999) define objeto campo como um geo-objeto com heterogeneidade interna semelhante a um campo. Cova e Goodchild (2002) apresentam o conceito de campo de objetos, no qual cada ponto no mapa não é um valor, mas um geo-objeto.

Goodchild et al. (2007) introduzem os conceitos de geo-átomo e mostram que ele pode proporcionar a base tanto para a concepção de objeto discreto quanto de campo contínuo. Como os geo-campos e geo-objetos são os únicos elementos disponíveis na teoria proposta, pode-se inferir que objetos discretos e campos contínuos são de fato as únicas bases possíveis para a concepção do mundo geográfico. A teoria é limitada pelo seu foco na concepção baseada em conjuntos de pontos, e assim na agregação de geo-átomos em geo-campos e em geo-objetos.

De acordo com Peuquet (2002), a tradicional dicotomia campo-objeto utilizada na modelagem de um SIG tem resultado em uma relativa negligência de representações de dados geográficos com base no tempo na comunidade de pesquisa. Esse terceiro elemento da perspectiva o que/onde/quando é necessário para representar explicitamente as situações de entidades e localizações e os seus inter-relacionamentos ao longo do tempo.

Segundo Peuquet (2001, 2005), existem basicamente três abordagens para a representação dos dados espaço-temporais: representação com base na localização, representação com base em entidade e representação com base no tempo. Segundo a autora, é possível ainda desenvolver abordagens combinadas a partir dessas três. Partindo dessas abordagens, vários modelos de dados espaço-temporais vêm sendo propostos.

A incorporação do tempo em modelos que se baseiam em localização frequentemente é vista como uma solução óbvia para representação da mudança espacial. Tratar o tempo como espaço é algo útil para melhorar a percepção em contextos de problemas específicos. Entretanto,

ele não permite que as propriedades únicas e específicas do tempo sejam explicitamente representadas (PEUQUET, 2002).

Na representação com base em entidade para dados espaço-temporais, os modelos propostos registram explicitamente mudanças espaciais ao longo do tempo relacionadas a entidades geográficas específicas ao invés de localizações. Em um nível conceitual, todos os modelos propostos com essa abordagem representam extensões da abordagem vetor topológica. Como tais, eles localizam mudanças na geometria de entidades ao invés do tempo. Um caso particular da abordagem com base em entidade é aquela orientada a objeto. (PEUQUET, 2005).

Na abordagem que tem como base o tempo, a localização no tempo se torna a base organizacional primária para o registro de mudanças. A sequência de eventos ao longo do tempo, representando a manifestação espaço-temporal de algum processo, é percebida via linha do tempo ou vetor temporal (uma linha unidimensional na dimensão tempo ao invés de uma superfície bi-dimensional sobre o espaço). Com este tipo de representação, as mudanças relativas ao tempo são explicitamente armazenadas (PEUQUET, 2005).

4 Modelos para Representação Espaço-Temporal em SIG

A partir das três abordagens básicas para a representação dos dados espaço-temporais apresentadas por Peuquet (2001, 2005), vários modelos de dados espaço-temporais foram propostos.

Em 1988, os modelos propostos por Armstrong e por Langran e Chrisman foram a tentativa inicial de organizar conceitualmente dados espaço-temporais. Armstrong apresentou o modelo “Retratos Sequenciais” (*Sequent Snapshots*), que tem como base o tempo para organizar as mudanças ocorridas em uma localização. Langran e Chrisman propuseram o modelo “Composição Espaço-Temporal” (*Space-Time Composite – STC*), que tem como base a localização.

Em 1989, Langran apresentou o modelo “Estado Inicial com Emendas” (*Base State with Amendments*), que armazena somente as mudanças (isto é, emendas).

Em 1992, Kuchera e Sondheim apresentaram o SAIF (*Spatial Archive and Interchange Format*) (SONDHEIM *et al.*, 1997), orientado a objeto. Worboys propôs o “Modelo Objeto Espaço-Temporal” (*Spatio-temporal Object Model*), que tem como base objetos espaciais. Langran (1992) apresentou uma versão do modelo “Composição Espaço-Temporal” com base no modelo de dados campo.

Peuquet (1994) propôs o modelo TRIAD, que utiliza três modelos de representação (localização, objeto e tempo) para tratar de forma distinta espaço e tempo.

Raper e Livingstone (1995) propuseram o “Modelo de Dados Geomorfológicos Orientado a Objeto” (*Object-oriented Geomorphologia Data Model – Oogeomorph*), que atribui referência espaço-temporal a todas as instâncias de todas as variáveis, evitando assim o uso de uma única linha do tempo. Peuquet e Duan apresentaram o “Modelo de Dados Espaço-Temporais com Base em Eventos” (*Event-based Spatio-Temporal Data Model – ESTDM*).

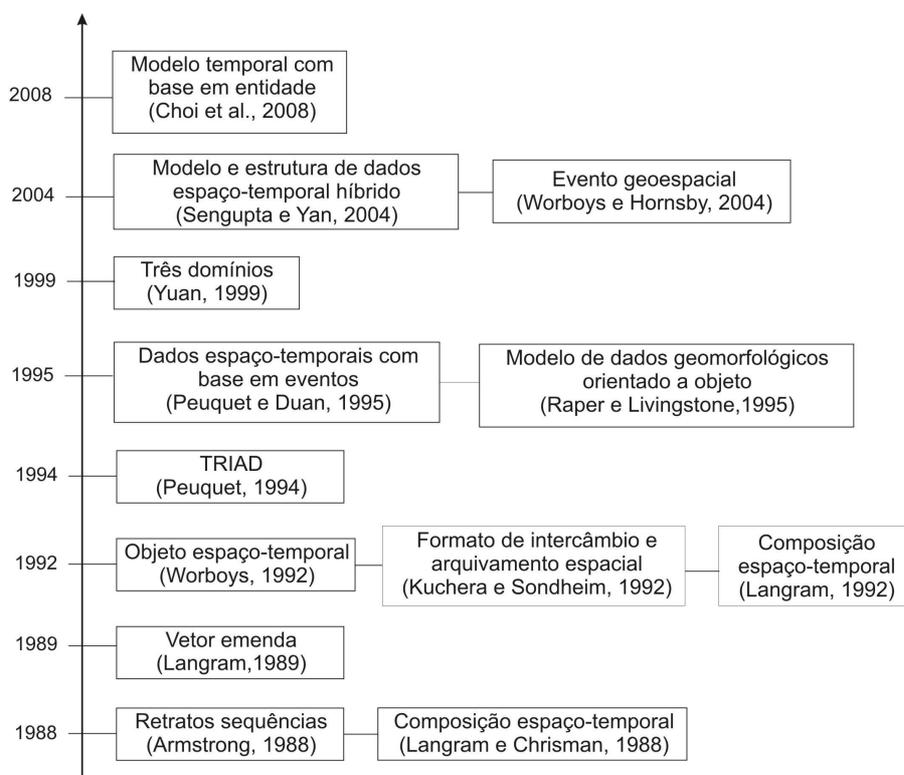
Yuan (1999) propôs um modelo de três domínios (tempo, espaço e semântica), estendendo o TRIAD proposto por Peuquet em 1994.

Worboys e Hornsby (2004) apresentaram o “Modelo Evento Geoespacial” (*Geospatial Event Model – GEM*), que estende os modelos geoespaciais baseados em objeto tradicionais. Esse modelo adota uma abordagem híbrida, que permite três categorias de entidades: objetos, eventos e cenários. Sengupta e Yan (2004) propuseram o “Modelo e Estrutura de Dados Espaço-Temporal Híbrido” (*Hybrid Spatio-Temporal Data Model and Structure – HST-DMS*).

Choi *et al.* (2008) propuseram o “Modelo Temporal com Base em Entidade” (*Feature-Based Temporal Model – FBTM*), que tem como objetivo gerenciar a história de entidades. Esse

modelo adota e estende os conceitos-chave do Modelo Objeto Espaço-Temporal e do modelo de três domínios.

No esquema 1 apresentam-se, em ordem cronológica, os modelos citados acima.



Esquema 1: Modelos para representação de dados espaço-temporais em SIG (organizado pelos autores).

Le (2005a) classifica os modelos espaço-temporais desenvolvidos para SIG em sete abordagens: 1) retratos sequenciais; 2) composição espaço-temporal; 3) estado inicial com emendas; 4) modelos com base em evento ou no tempo; 5) modelos com base em objeto, entidade, identidade, processo ou atividade; 6) abordagem combinada/integrada; e 7) modelos orientados a eventos. A seguir, descrevem-se as principais características de cada uma dessas abordagens.

Modelo Retratos Sequenciais: O modelo Retratos Sequenciais foi proposto por Armstrong (1988). É um dos modelos de dados espaço-temporais mais simples, sendo possível implementá-lo nos softwares SIG tradicionais. Embora normalmente empregue um modelo de dados *campo*, pode também empregar um modelo *objeto*. Ele incorpora a informação temporal mediante uma série temporal de cenários registrados espacialmente. O modelo trabalha com um conjunto de cenários da área em estudo, em que cada cenário é uma camada (*layer*) matricial que representa um estado do mundo real em um instante, como uma fotografia. A figura 1 ilustra a representação da evolução de uma área urbana por meio de “retratos sequenciais”. Cada cenário representa o estado de determinado local em determinado momento.

Modelo Composição Espaço-Temporal: O modelo Composição Espaço-Temporal foi proposto por Langram e Chrisman (1988) e é uma evolução do modelo Retratos Sequenciais. Composições espaço-temporais são unidades com atributo único, espacialmente homogêneas e temporalmente uniformes. Cada unidade apresenta uma mudança distinta no valor do atributo ao

longo do tempo (YUAN, 2001). As mudanças nos atributos são registradas em intervalos discretos, embora sua resolução temporal não seja necessariamente precisa (YUAN, 1996b).

Modelo Estado Inicial com Emendas: O modelo Estado Inicial com Emendas, proposto por Langran em 1989, utiliza um modelo tridimensional (duas dimensões espaciais e uma dimensão temporal). O modelo tem como base o modelo de dados *objeto* e registra as mudanças que ocorrem na geometria das entidades. A partir de uma data inicial, qualquer mudança em uma entidade é registrada incrementalmente através de um vetor emenda, criando um novo objeto.

Abordagem com Base em Eventos ou no Tempo: Modelos que adotam a Abordagem com Base em Eventos foram propostos por Claramunt e Thériault (1995), Peuquet e Duan (1995), Chen e Jiang (1998) e Sengupta e Yan (2004), entre outros. Entre essas abordagens, algumas são diferentes em sua essência, enquanto outras são similares. A idéia comum por trás desse tipo de modelo é apresentar explicitamente os sucessivos relacionamentos temporais usando ponteiros que permitam ir para frente ou para trás (com relação à linha temporal) no banco de dados (LE, 2005a).

Abordagem com Base em Objeto, Entidade, Identidade, Processo ou Atividade: Abordagens orientadas a objeto, com base em entidade, em identidade, em processo e em atividade são conceitualmente similares. Todas elas tratam um objeto, uma entidade, uma identidade, um processo ou uma atividade identificável como a base para a modelagem espaço-temporal (LE, 2005a). Os modelos apresentados no esquema 1 que se enquadram nessa classificação são: Modelo Objeto Espaço-Temporal, *Spatial Archive and Interchange Format* (SAIF), Modelo de Dados Geomorfológicos Orientado a Objeto, Modelo de três domínios proposto por Yuan, Modelo Temporal com Base em Entidade.

Abordagem combinada/integrada: Um exemplo de modelo de dados espaço-temporal que adota a abordagem combinada/integrada é o TRIAD, proposto por Peuquet (1994) com o intuito de armazenar eventos. Esse modelo trabalha com três tipos de representação, com o objetivo de possibilitar a concepção de um histórico do mundo real: 1) um modelo de localização (onde); 2) um modelo de objeto (o quê); e 3) um modelo temporal (quando).

Abordagem Orientada a Evento: Worboys e Hornsby (2004) propuseram o Modelo Evento Geoespacial (GEM), que estende o modelo geoespacial tradicional introduzindo eventos no paradigma orientado a objeto. O modelo visa contribuir para o desenvolvimento de uma abordagem geral para a modelagem de fenômenos geoespaciais dinâmicos no contexto de SIG. O modelo adota uma abordagem híbrida, permitindo três categorias de entidades: objetos, eventos e *settings*. Nessa abordagem, os acontecimentos são representados como eventos. Embora a abordagem orientada a eventos soe como “modelo com base em eventos”, é mais próxima da abordagem com base em processo.

6 Considerações finais

Incorporar o elemento temporal em SIG tradicional é um desafio que tem sido pesquisado por muitos anos e que apresenta diversas propostas de solução. Os modelos de dados espaço-temporais determinam a maneira e a eficiência com que os dados podem ser acessados e manipulados.

Em abordagens que modelam o estado do mundo real como um cenário, é simples recuperar o estado de um local em dado momento, mas difícil consultar as mudanças que ocorreram entre duas datas. Em abordagens que modelam mudanças, como o modelo Estado

Inicial com Emendas, é mais fácil recuperar as mudanças que ocorreram entre duas datas do que o estado de um local em determinado momento. Para abordagens com base em entidade, a história de uma única entidade é mais fácil de ser traçada do que a história referente a determinado local. Em abordagens com base em localização, é simples traçar a história de um local. Abordagens combinadas ou integradas podem ser eficientes para recuperar a história de determinado local, entidade e/ou tempo (por exemplo, a data). Assim, esse tipo de abordagem é mais flexível do que outros no acesso aos dados, porém é mais complexo e requer mais espaço de armazenamento quando comparado com os demais tipos de abordagens citados (LE, 2005a).

A maior parte dos modelos de dados espaço-temporais existentes foram desenvolvidos para aplicações específicas, cada um focando em aspectos particulares dos dados espaço-temporais (PELEKIS *et al.*, 2004). Sendo assim, nenhuma solução proposta até o momento abrange todos os aspectos possíveis desse tipo de informação e, segundo Nadi e Delavar (2005), não existe um modelo geral amplamente aceito. Dessa forma, a representação espaço-temporal em SIG continua a ser um desafio (YUAN, 2008).

Como argumenta Yuan (2010), a incorporação da componente temporal em uma representação espacial não é uma tarefa trivial, pois tempo e espaço possuem propriedades distintas. Embora tenha ocorrido um grande progresso no desenvolvimento de modelos de dados para SIG que vão além da abordagem retratos seqüenciais, a criação de um SIG verdadeiramente espaço-temporal permanece como um desafio não alcançado.

Referências Bibliográficas

- Abraham, T.; Roddick, J. F. Survey of spatio-temporal databases. **GeoInformatica**, v. 3, n. 1, p. 61-99, 1999.
- Armstrong, M. P. Temporality in spatial databases. In: GIS/LIS'88 - AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 1988. **Proceedings...** San Antonio, 1988. p. 880-889.
- Berry, B. J. L. Approaches to regional analysis: a synthesis. **Annals of The Association of American Geographers**, v. 54, p. 2-11, 1964.
- Choi, J. et al. Innovations in individual feature history management-The significance of feature-based temporal model. **Geoinformatica**, v. 12, n. 1, p. 1-20, 2008.
- Couclelis, H. Space, time, geography. In: LONGLEY, P. A. et al. (Ed.). **Geographical information systems: principles, techniques, management, and applications**. New Jersey: Sons, John Wiley & Sons, 2005. p. 29-38.
- Cova, T. J.; Goodchild, M. F. Extending geographical representation to include fields of spacial objects. **International journal of geographical information science**, vol. 16, n. 6, 2002. 509-532.
- Goodchild, M. F.; Yuan, M.; Cova, T. J. Towards a general theory of geographic representation in GIS. **International journal of geographical information science**, vol. 21, n. 3, 2007. 239-260.
- Goodchild, M. F. Combining space and time: new potential for temporal GIS. In: KNOWLES, A. K. (Ed.). **Placing history: how maps, spatial data and GIS are changing historical scholarship**. Redlands, CA: ESRI Press, 2008. p. 179-197.
- Kjenstad, K. On the integration of object-based models and field-based models in GIS. **Internacional journal of geographical information science**, vol. 20, n. 5, May 2006. 491-509.
- Langran, G. **Time in geographic information systems**: TAYLOR & FRANCIS, 1992.
- Langran, G.; Chrisman, N. R. A framework for temporal geographic information. **Cartographica**, v. 25, n. 3, p. 1-14, 1988.
- Le, Y. **Representing time in base geographic data**. 2005. Dissertation (Doctor of Philosophy) – University of Georgia Athens, Georgia, 2005a.
- Le, Y. A prototype temporal GIS for multiple spatio-temporal representations. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 32, n. 4, p. 315-329, 2005b.
- Pelekis, N. et al. Literature review of spatiotemporal database models. **The Knowledge Engineering Review**, v. 19, p. 235-274, 2004.

- Nadi, S.; Delavar, M. R. Toward a general spatio-temporal database structure for GIS applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL-TEMPORAL MODELING, SPATIAL REASONING, SPATIAL ANALYSIS, DATA MINING, DATA FUSION, 2005, Beijing-China. **Proceedings...** Beijing-China, 2005. p. 27-29.
- Peuquet, D. J. A conceptual framework and comparison of spatial data models. **Cartographica**, v. 21, n. 4, p. 66-113, 1984.
- Peuquet, D. J. It's about time: a conceptual framework for the representation of temporal dynamics in Geographic Information Systems. **Annals of Association of American Geographers**, v. 84, n. 3, p. 441-461, 1994.
- Peuquet, D. J. Making space for time: issues in space-time data representation. **GeoInformatica**, v. 5, n. 1, p. 11-32, 2001.
- Peuquet, D. J. **Representations of space and time**. New York: Guilford, 2002.
- Peuquet, D. J. Time in GIS and geographical databases. In: LONGLEY, P. A. et al. (Ed.). **Geographical information systems: principles, techniques, management, and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. p. 91-103.
- Peuquet, D. J.; Duan, N. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 9, n. 1, p. 7-24, 1995.
- Raper, J.; Livingstone, D. **Spatio-temporal interpolation in four dimensional coastal process models**. Disponível em: <<http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTAFECROM/sfpapers/RAPERjonathan/RAPERliv.html>>. Acesso em: 15 nov. 2009.
- Sengupta, R.; Yan, C. A hybrid spatio-temporal data model and structure (HST-DMS) for efficient storage and retrieval of land use information. **Transactions in GIS**, v. 8, n. 4, p. 351-366, 2004.
- Sinton, D. The inherent structure of information as a constraint to analysis - mapped thematic data as a case study. **Harvard Papers on GIS**, 7, 1978.
- Sondheim, M. et al. Spatial archive and interchange format (SAIF) Canada. In: MOELLERING, H.; HOGAN, R. (Ed.). **Spatial database transfer standards 2: characteristics for assessing standards and full descriptions of the national and international standards in the world**. New York: Elsevier, 1997. p. 31-38.
- Worboys, M. F. **GIS: A computing perspective**. London: Taylor and Francis, 1995.
- Worboys, M. F. Relational databases and beyond. In: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographical information systems - Principles, techniques, management and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. p. 163-174.
- Worboys, M. F.; Hornsby, K. From objects to events: GEM, the geospatial event model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GISCIENCE, 3., **Proceedings...** Heidelberg-Berlin: Springer-Verlag, 2004. v. 3234, p. 327-343.
- Yuan, M. GIS and spatio-temporal modeling. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, 3., Santa Fé. **Proceedings...** Santa Fé, New México, USA: NGCIA. 1996a.
- Yuan, M. Modeling semantical, temporal and spatial information systems. In: CRAGLIA, M.; COUCLELIS, H. (Ed.). **Geographic information research: bridging the Atlantic**. London: Taylor & Francis, 1996b.
- Yuan, M. Use of a three-domain representation to enhance GIS support for complex spation-temporal queries. **Transactions in GIS**, v. 3, n. 2, p. 137-159, 1999.
- Yuan, M. Representing complex geographic phenomena with both object and field-like properties. **Cartography and Geographical Information Science**, v. 28, n. 2, p. 83-96, 2001.
- Yuan, M. Temporal GIS and Applications. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H. **Encyclopedia of geographic information science**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- Yuan, M. Geographic Data Structures. In: **Manual of geospatial science and technology**. BOSSLER, J. (editor). New York: CRC Press, 2010.