



Revista Brasileira de Cartografia (2013) N^o 65/1: 175-187
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MODELOS PARA A REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS EM SIG

Models for Representation of Spatio-temporal Data in GIS

Alexandro Gularte Schafer^{1,2} & Ruth Emília Nogueira³

¹Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Campus Bagé

Travessa 45, n^o 1650 - Bairro Malafaia - Bagé - RS - CEP: 96413-170
alexandro.schafer@unipampa.edu.br

²Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Departamento de Geociências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Campus universitário, Sn, Trindade – CEP 88010-970 - Florianópolis - SC, Brasil
ruthenogueira@gmail.com

Recebido em 08 de dezembro, 2011/ Aceito em 15 de março, 2012

Received on december 08, 2011/ Accepted on march 15, 2012

RESUMO

A modelagem de dados espaço-temporal consiste em um importante ponto na busca pela incorporação da variável tempo em sistemas de informação geográfica (SIG). Quanto mais próximo um modelo de dados espaço-temporal estiver de nossos próprios conceitos de espaço e tempo, com mais facilidade e rapidez o conhecimento espaço-temporal poderá ser representado em meio computacional. A partir do final da década de 1980, vários modelos de dados espaço-temporais que incorporam a dimensão temporal em SIG vêm sendo propostos. O presente artigo tem como objetivo apresentar e discutir alguns desses modelos. Inicialmente, os modelos de dados espaço-temporais são apresentados em ordem cronológica. Em seguida, esses modelos são classificados de acordo com o tipo de abordagem característica em: 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; 7) modelos orientados a eventos. Por fim, são apresentadas as principais características, vantagens e desvantagens de cada um dos modelos. Conclui-se com uma análise da eficiência das principais abordagens apresentadas com relação ao acesso e à manipulação dos dados.

Palavras chaves: SIG, Modelo de Dados, Dados Espaço-temporais.

ABSTRACT

Spatio-temporal modeling is an important issue for incorporation of time in geographic information systems (GIS). The closer a spatio-temporal model is of our own concepts of space and time, more ease and speed knowledge-space can be represented in computational media. From the late 1980s, several spatio-temporal data models that incorporate the temporal dimension in GIS have been proposed. This paper aims to present and discuss some of these models. Initially the spatio-temporal data models are presented in chronological order. Then, these models are classified according to the type of approach: 1) sequential snapshots, 2) space-time composite, 3) base state with amendments, 4) event- or time-based, 5) object-, feature-, identity-, process- or activity-based, 6) combined / integrated; 7) event-oriented. Finally, we

present the main features, advantages and disadvantages of each of these models. In conclusion, we analyze the efficiency with respect to data access and manipulation of the main approaches presented.

Keywords: GIS, data model, spatio-temporal data.

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 Peuquet (2002), embora os SIG constituam uma tecnologia capacitada para abordar problemas que envolvam o aspecto temporal dos dados, a questão de como representar a dinâmica espaço-temporal nesses sistemas foi ignorada até o final dos anos 1980. De fato, diversos autores, como Hornsby e Egenhofer (2000), Worboys (2001), McMaster e Usery (2004), Worboys e Hornsby (2004), Ahola *et al.* (2007), argumentam que a maioria dos SIG atuais são estáticos. Ainda, segundo Camossi *et al.* (2006), eles não gerenciam adequadamente aplicações que envolvam o aspecto temporal dos dados.

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. De acordo com Codd (1980), 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.

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar e discutir alguns dos principais modelos de dados espaço-temporais em SIG apresentados na literatura nas últimas décadas.

2 MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS EM SIG

Segundo Peuquet (2001, 2005), existem basicamente três abordagens para a representação dos dados espaço-temporais: 1) representação com base em localização; 2) representação com base em entidade; e 3) representação com base no tempo. Segundo a autora, é possível ainda desenvolver abordagens combinadas a partir delas. Partindo dessas abordagens, 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.

Na figura 1 apresentam-se, em ordem cronológica, os modelos citados acima.

Le (2005a) classifica os modelos espaço-temporais desenvolvidos para SIG em sete

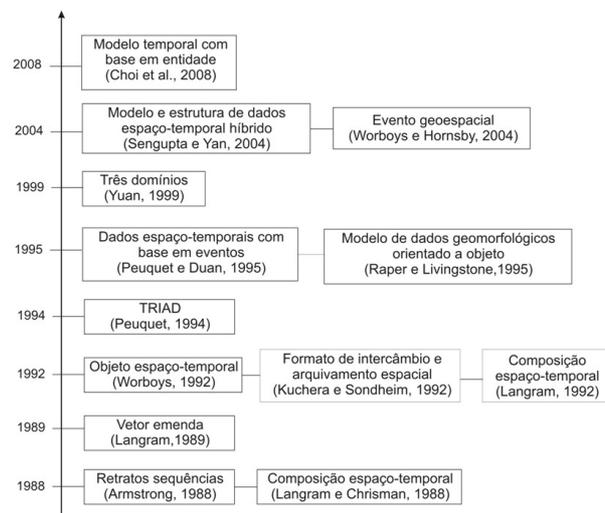


Fig. 1: Modelos para representação de dados espaço-temporais em SIG (organizado pelos autores).

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, os modelos aqui apresentados são organizados e discutidos de acordo com as sete abordagens propostas por Le (2005a).

2.1. 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 2 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.

Existem basicamente duas limitações no modelo Retratos Sequenciais. Primeiro, as mudanças que ocorrem entre cenários não são explicitamente armazenadas. A fim de detectar diferenças, dois instantâneos devem ser comparados

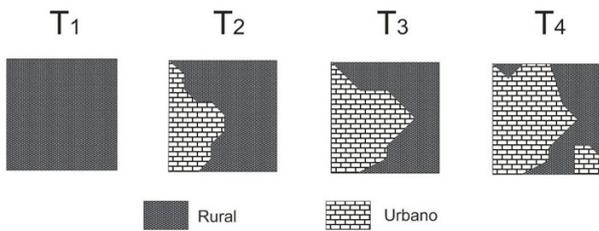


Fig. 2 - Retratos sequenciais representando a expansão urbana em uma área rural (adaptado de Langran, 1992).

exaustivamente. O método negligencia os eventos ocorridos separadamente entre os cenários. Segundo, existe armazenamento de informações redundantes (LANGRAN, 1992; YUAN, 1996a), resultante da inclusão em cada cenário tanto dos dados modificados quanto dos não modificados (CHOI *et al.*, 2008).

2.2. Modelo Composição Espaço-Temporal

O modelo Composição Espaço-Temporal foi proposto por Langran 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).

A figura 3 apresenta uma composição espaço-temporal da expansão urbana, representada por retratos sequenciais na figura 2. A partir de uma base cartográfica que representa a realidade em determinado momento, são adicionados novos nós e conexões cada vez que ocorre uma mudança, decompondo-se o espaço ao longo do tempo em fragmentos cada vez menores, com sua própria história distinta (FERREIRA *et al.*, 2009). Cada unidade possui uma lista ordenada de registros, que contém um conjunto de atributos, além da indicação da data para a qual esse conjunto de atributos é válido.

O modelo Composição Espaço-Temporal apresenta basicamente três limitações. Em primeiro lugar, cada vez que um objeto divide-se em dois, cada ocorrência do objeto antigo é efetivamente substituída por dois novos objetos com novos identificadores, aumentando a complexidade das

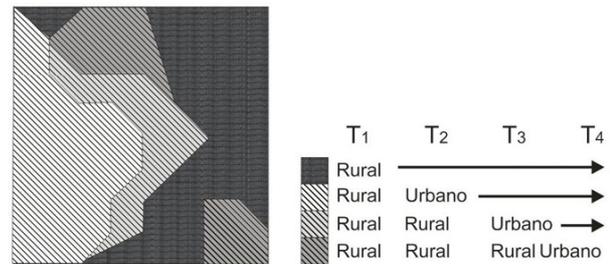


Fig. 3 - Composição espaço-temporal de expansão urbana (adaptado de Langran, 1992).

operações (LANGRAN, 1992). Segundo, atualizar um banco de dados nesse modelo requer a reconstrução de unidades da composição espaço-temporal. Com a ocorrência de mudanças nos relacionamentos geométricos e topológicos entre essas unidades, todo o banco de dados (tanto os objetos quanto os atributos) necessita ser reorganizado. Por fim, esse modelo falha em capturar a temporalidade em atributos que apresentem o movimento com o passar do tempo (YUAN, 1996b).

2.3. 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. Na figura 4 apresenta-se a evolução da mesma área urbana representada pelo modelo Retratos Sequenciais na figura 2 e pelo modelo Composição Espaço-Temporal na figura 3, agora utilizando o modelo Estado Inicial com Emendas.

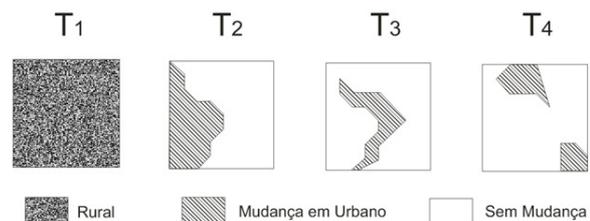


Fig. 4 - Avanço de ocupação urbana representado a partir do modelo Estado Inicial com Emendas (adaptado de Langran, 1992).

No modelo Estado Inicial com Emendas, a redundância é mínima porque uma versão do objeto é armazenada uma única vez (LANGRAN, 1992). Além de manter explicitamente a integridade de entidades individuais e sua topologia ao longo do tempo, esse modelo também tem a vantagem de possibilitar a representação de mudanças assíncronas em entidades e de facilitar a realização de consultas acerca de mudanças em determinado local. Essa capacidade, entretanto, vem com um custo significativo: com o passar do tempo, o número de vetores emenda aumenta, tornando a topologia espaço-temporal desses vetores cada vez mais complexa (PEUQUET, 2005). Pequet (2002) cita ainda como limitação desse modelo o fato de ele manipular somente mudanças discretas e referentes aos limites dos objetos.

Como alternativa ao modelo Composição Espaço-Temporal com base no modelo de dados *objeto*, Langran (1992) propôs o modelo Composição Espaço-Temporal com base no modelo de dados *campo*.

Nessa versão do modelo, a cada célula da matriz é associada uma lista de atributos, de tamanho variável. Cada entrada nessa lista refere-se a uma mudança ocorrida em um local específico. São registrados o novo valor da célula e o momento em que a mudança ocorreu (figura 5). Dessa forma, cada lista apresenta um histórico de eventos para aquela célula (localização), ordenados temporalmente. O registro mais recente refere-se à situação atual (SOUZA, 2004).

Ao contrário da representação com base em “retratos”, esta representação armazena apenas as mudanças relativas a cada localização, o que elimina a redundância de informações (PEUQUET, 2005).

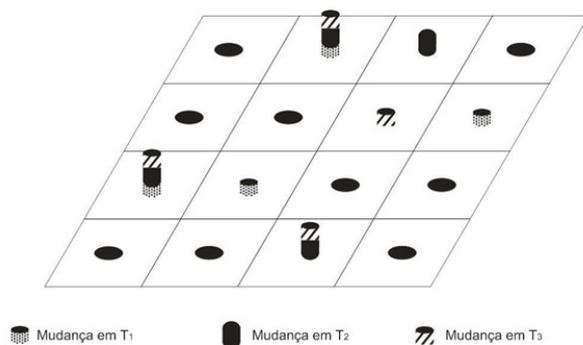


Fig. 5 - Exemplo de representação utilizando o modelo Composição Espaço-Temporal com base na abordagem *campo* (adaptado de Langran, 1992).

2.4. Abordagem com Base em Eventos ou no Tempo

Modelos que adotam a Abordagem com Base em Eventos foram propostos por Claramunt e Thériault (1995), Pequet 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 ideia 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). A seguir, discutem-se mais detalhadamente dois modelos com base em eventos e tempo.

2.4.1. Modelo de Dados Espaço-Temporal com Base em Eventos

O Modelo de Dados Espaço-Temporal com Base em Eventos (ESTDM) foi proposto por Pequet e Duan (1995). É um modelo de dados que tem como base o modelo de dados *campo* e utiliza o tempo para organizar a informação espaço-temporal sobre as mudanças na localização. O ESTDM tem capacidade e eficiência para suportar tanto consultas espaciais quanto consultas temporais (YUAN, 1996a). A figura 6 apresenta os elementos primários e a estrutura básica do ESTDM.

O ESTDM consiste em um mapa-base que registra a configuração espacial de determinada área em uma data inicial, t_0 . Os eventos são registrados quando as mudanças ocorrem (em qualquer resolução temporal). O conjunto de mudanças (C_i) consiste no conjunto de cada localização x, y onde ocorreram mudanças a partir da data inicial, t_0 , e no novo valor apresentado em cada local no tempo, t . Cada evento listado é associado às mudanças relacionadas a um único domínio temático. O tempo associado a cada mudança é armazenado em ordem temporal crescente com relação ao estado inicial

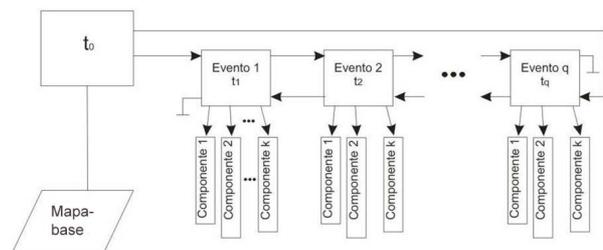


Fig. 6 - Elementos primários e estrutura básica do ESTDM (adaptado de Pequet e Duan, 1995).

(PEUQUET e DUAN, 1995). Com isso, a evolução no espaço e no tempo de um tema com atributo único (um evento) pode ser explicitamente armazenada em um banco de dados SIG (YUAN, 2001). A diferença entre os tempos armazenados diz respeito ao intervalo temporal entre eventos sucessivos. Mudanças armazenadas dentro dessa linha do tempo ou “vetor temporal” podem ser relacionadas a localizações, a entidades ou a ambas.

Uma das principais desvantagens desse modelo tem relação com o tempo de processamento de consultas temporais. Nesse tipo de consulta, para qualquer data consultada, as pesquisas iniciam-se a partir do mapa-base; na sequência, todos os componentes na lista de eventos são comparados (pois os componentes armazenam somente as mudanças). Onde não houve modificações, a pesquisa dá-se pela extração de todos os componentes modificados a partir do mapa-base, o que pode ser um processo demorado.

2.4.2 Modelo e Estrutura de Dados Espaço-Temporal Híbrido

O Modelo e Estrutura de Dados Espaço-Temporais Híbrido (HST-DMS) foi proposto por Sengupta e Yan (2004). Esse modelo é melhor que o ESTDM com relação ao tempo de consulta, por armazenar, para cada evento, tanto mapas de mudança quanto mapas de complemento.

A figura 7 apresenta a estrutura do modelo HST-DMS com o auxílio de um conjunto de dados matriciais compreendido por 16 células, representando mudanças no uso do solo. Os elementos que nunca sofreram alterações estão com um fundo cinza; os elementos que sofreram alterações com relação ao momento anterior estão em negrito.

A mudança é armazenada entre intervalos de tempo como dois grupos separados: um grupo registra os elementos que mudaram desde o intervalo anterior (chamado “mapa de mudança em t_i ”); e o outro grupo registra os elementos que sofreram mudança em algum período anterior no tempo (chamado “mapa complemento em t_i ”). Adicionalmente, o mapa-base armazena somente aqueles elementos que nunca mudaram ao longo de todo o período representado pela lista de eventos. Reciprocamente, um “mapa complemento inicial” registra aqueles elementos que mudaram alguma vez durante o período representado pela lista de eventos. Nota-se que o mapa-base e o mapa

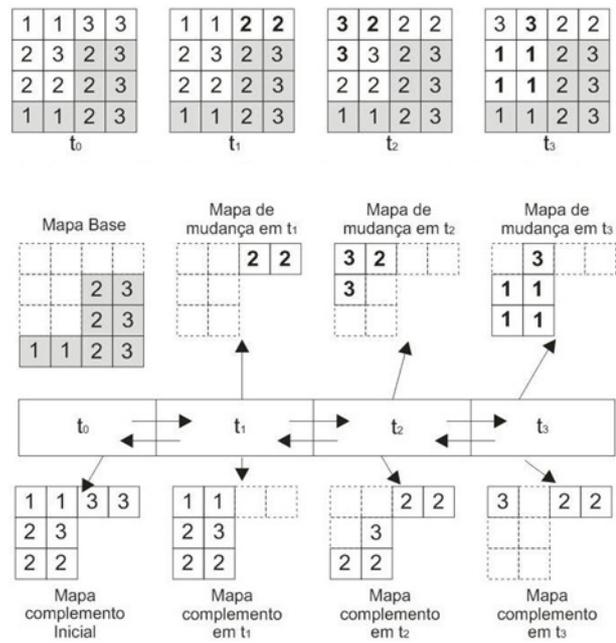


Fig. 7 - Exemplo de aplicação do modelo HST-DMS (adaptado de Sengupta e Yan, 2004).

complemento inicial são associados ao tempo inicial, t_0 . Um mapa de mudança em t_i e o mapa complemento em t_i são associados ao nó de tempo em t_i (onde $i > 0$) (SENGUPTA e YAN, 2004).

O HST-DMS herda a topologia espacial implícita e temporal explícita do ESTDM. A topologia temporal adicional pode ser usada para traçar a história temporal de células individuais e para responder a complicadas consultas espaço-temporais relacionadas à história temporal dessas células. Uma das desvantagens do modelo é que o banco de dados é estático (SENGUPTA e YAN, 2004).

2.5. 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). A seguir, apresentam-se os modelos citados anteriormente que se enquadram nessa classificação.

2.5.1 Modelo Objeto Espaço-Temporal

O Modelo Objeto Espaço-Temporal (STOM) foi proposto por Worboys em 1992. O STOM apresenta uma estrutura hierárquica de objetos e átomos espaço-temporais discretos (figura 8).

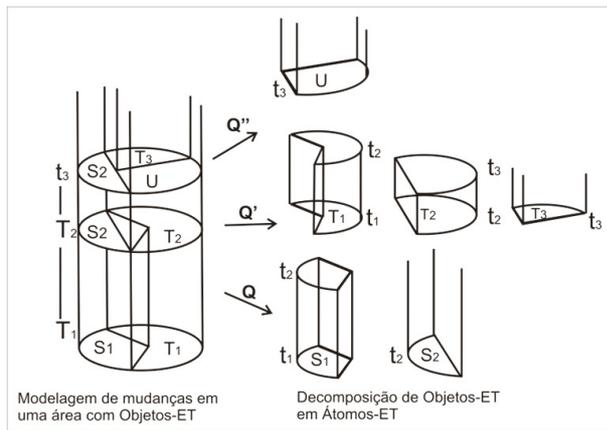


Fig. 8 - Exemplo de modelo objeto espaço-temporal com átomos espaço-temporais (adaptado de Worboys, 1992).

Com essa estrutura, a composição espacial de um fenômeno geográfico pode ser explicitamente registrada ao longo do tempo, descrevendo a distribuição de seus atributos no fenômeno geográfico (YUAN, 2001).

Um objeto espaço-temporal é um agregado de átomos espaço-temporais, a mais extensa e espacialmente homogênea unidade temporal com propriedades, que ocorre tanto no espaço quanto no tempo. O átomo espaço-temporal é usado para formar objetos espaço-temporais que representam as mudanças no mundo real.

Um objeto espaço-temporal pode apresentar mudanças no espaço e no tempo, embora não ocorram mudanças dentro de cada um de seus átomos espaço-temporais. Sendo assim, é possível registrar as mudanças nas dimensões espacial e temporal (conjunta ou separadamente) que ocorram em um objeto espaço-temporal. Mudanças graduais no espaço ao longo do tempo não podem ser representadas nesse modelo, pois seus átomos espaço-temporais são discretos. Embora esse modelo seja similar ao modelo Retratos Sequenciais e ao modelo Composição Espaço-Temporal, ele representa somente mudanças repentinas em uma estrutura de tempo independente, discreta e linear.

Worboys (1994, 2001), posteriormente, estende o STOM para um modelo espacial bitemporal, com a proposição de um modelo unificado para a informação espacial e temporal. O tempo de evento e o tempo de banco de dados (tempo de transação) são incluídos como dois eixos ortogonais, com o objetivo de registrar a existência

de um objeto no mundo real e de um no sistema de banco de dados respectivamente.

Nessa extensão do modelo STOM, o espaço bidimensional e o tempo bidimensional de um objeto geográfico são fundidos em um objeto espacial bitemporal. A extensão espacial é representada como *complexes*, que são feitos de *simplexes* não sobrepostos. Um *simplex* pode ser um único ponto, um segmento de linha ou um polígono. A extensão bitemporal é representada por elementos bitemporais (BTE), compostos do tempo de evento e do tempo de transação. Para representar objetos espaciais bitemporais, BTEs são anexados como rótulos aos *simplexes*, originando dois novos tipos de dados, chamados *ST-simplexes* e *ST-complexes*. Um *ST-simplex* consiste de um par ordenado (S, T), onde S é um simplex e T é um BTE. Um *ST-complex* é um conjunto finito de *ST-simplexes*. Além dos tipos de dados, esse modelo define um conjunto de operações espaço-temporais, tais como *ST-Union*, *ST-intersection* e *ST-difference* (FERREIRA *et al.*, 2009).

2.5.2 Spatial Archive and Interchange Format (SAIF)

O SAIF, proposto por Kuchera e Sondheim em 1992, foi apresentado como um meio de compartilhar dados espaciais e espaço-temporais. Desenvolvido pelo Setor de Levantamento e Mapeamento de Recursos do Ministério do Meio Ambiente do Canadá, foi reconhecido pelo *Canadian General Standards Board* em 1993.

Existem três componentes principais para a definição formal do SAIF: 1) o modelo de dados SAIF; 2) o esquema padrão SAIF; e 3) a linguagem SAIFtalk. Em associação a esses componentes, existem esquemas externos que podem ser definidos pelo usuário (SONDHEIM *et al.*, 1997).

O modelo de dados SAIF apresenta um paradigma orientado a objeto. O modelo em si é destituído de significado geográfico. A semântica geográfica é proporcionada pelo esquema padrão do SAIF e pelos esquemas definidos pelo usuário.

O esquema padrão do SAIF consiste na definição de aproximadamente 300 tipos ou classes com base no modelo de dados. Os objetos são considerados como instâncias de tipos (classes) que seguem uma hierarquia. Cada objeto é único e pode ser referenciado por um identificador. Há três tipos de associações possíveis entre objetos: agregação,

generalização/ especialização e associação (SAFE SOFTWARE, 2009).

No SAIF, um objeto espaço-temporal é definido como um objeto que ocupa uma área no espaço e no tempo, e apresenta quatro aspectos: geometria; referência espacial; tempo; e referência temporal. A geometria define a forma do objeto e é expressa em termos de ponto, linha, área e volume (valores de coordenadas fazem parte da geometria). A referência espacial indica o sistema de referência horizontal e vertical das coordenadas. Os valores de tempo podem indicar tempo relativo ou absoluto, datas e durações (BRITISH COLUMBIA, 2009).

A estrutura do SAIF permite que sejam modelados dados espaço-temporais e informações tradicionais. Além disso, é possível trabalhar com todos os tipos de dados geográficos (contendo ou não atributos), em uma estrutura vetorial ou matricial, e com duas ou três dimensões (BRITISH COLUMBIA, 2009).

2.5.3 Modelo de Dados Geomorfológicos Orientado a Objeto

Raper e Livingstone (1995) propuseram o Modelo de Dados Geomorfológicos Orientado a Objeto (OOgeomorph). A filosofia que guiou o desenvolvimento do OOgeomorph foi direcionada à criação de um sistema que incorporasse processos e teorias geomorfológicas como classes em uma representação orientada a objeto (RAPER e LIVINGSTONE, 1995).

O modelo foi desenvolvido com ênfase na ideia de que o tempo é uma propriedade de entidades identificáveis (tais como uma linha costeira), e não um atributo de um objeto espacial. Assim, as entidades são representadas por pontos, agregados a uma extensão espacial e temporal por suas formas, processos e materiais, e são definidas pelo usuário de acordo com as necessidades da aplicação (YUAN, 2001).

A figura 9 apresenta o projeto do OOgeomorph. Um módulo `geomorph_info` modela dados geomorfológicos para a representação de dados a ser usados no módulo `sistema_geomorph`. O módulo `sistema_geomorph` representa a dinâmica de um sistema geomorfológico, como um sistema costeiro ou um sistema fluvial, incluindo teorias geomorfológicas. Um conjunto de ferramentas CASE (*computer-aided software engineering*), `mforma`, `mprocesso` e `mmaterial`, associa dados de atributos sobre as formas, processos e materiais

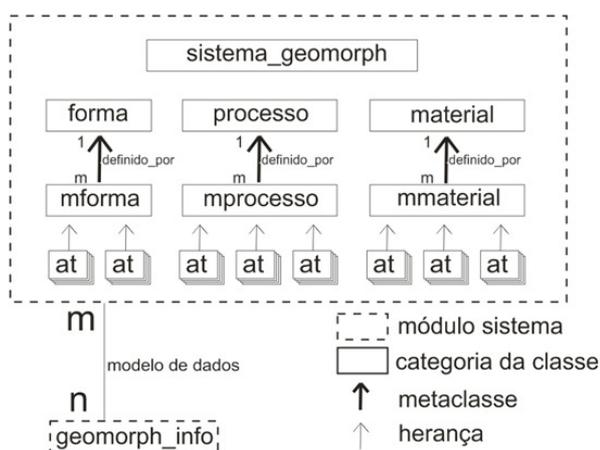


Fig. 9 - O projeto do OOgeomorph (adaptado de Raper e Livingstone, 1995).

geomorfológicos. Dados de entrada do `geomorph_info` são usados para ativar objetos geomorfológicos com base em estruturas definidas nas classes `forma`, `processo` e `material`. Dessa maneira, cada fenômeno geomorfológico é representado por um conjunto de objetos contendo informações e atributos específicos relativos a forma, processo ou material (YUAN, 1996a).

O OOgeomorph pode manipular bem informações de localização representadas, como pontos, mas apresenta dificuldades em manipular dados no formato poligonal, assim como relacionamentos topológicos (YUAN, 1996b).

2.5.4 Modelo de três domínios proposto por Yuan

Yuan (1996b, 1999, 2000) propôs um modelo de três domínios (temporal, espacial e semântico) com o objetivo primário de incorporar em um único modelo de dados os conceitos de fenômenos complexos que possuam propriedades tanto de campos quanto de objetos. Expandido o modelo de três domínios, Yuan (2001) propôs um sistema que organiza dados espaciais e temporais em uma hierarquia de eventos, processos e estados. Com isso é possível selecionar informações sobre comportamentos e relacionamentos no espaço e no tempo com base em eventos e processos.

Objetos discretos são usados para mostrar como os eventos e processos progridem no espaço e no tempo, e campos são usados para modelar como o estado de um tema varia espaço-temporalmente (YUAN, 2001).

Como evidencia a figura 10, o nível de evento registra todas as ocorrências de um evento e de

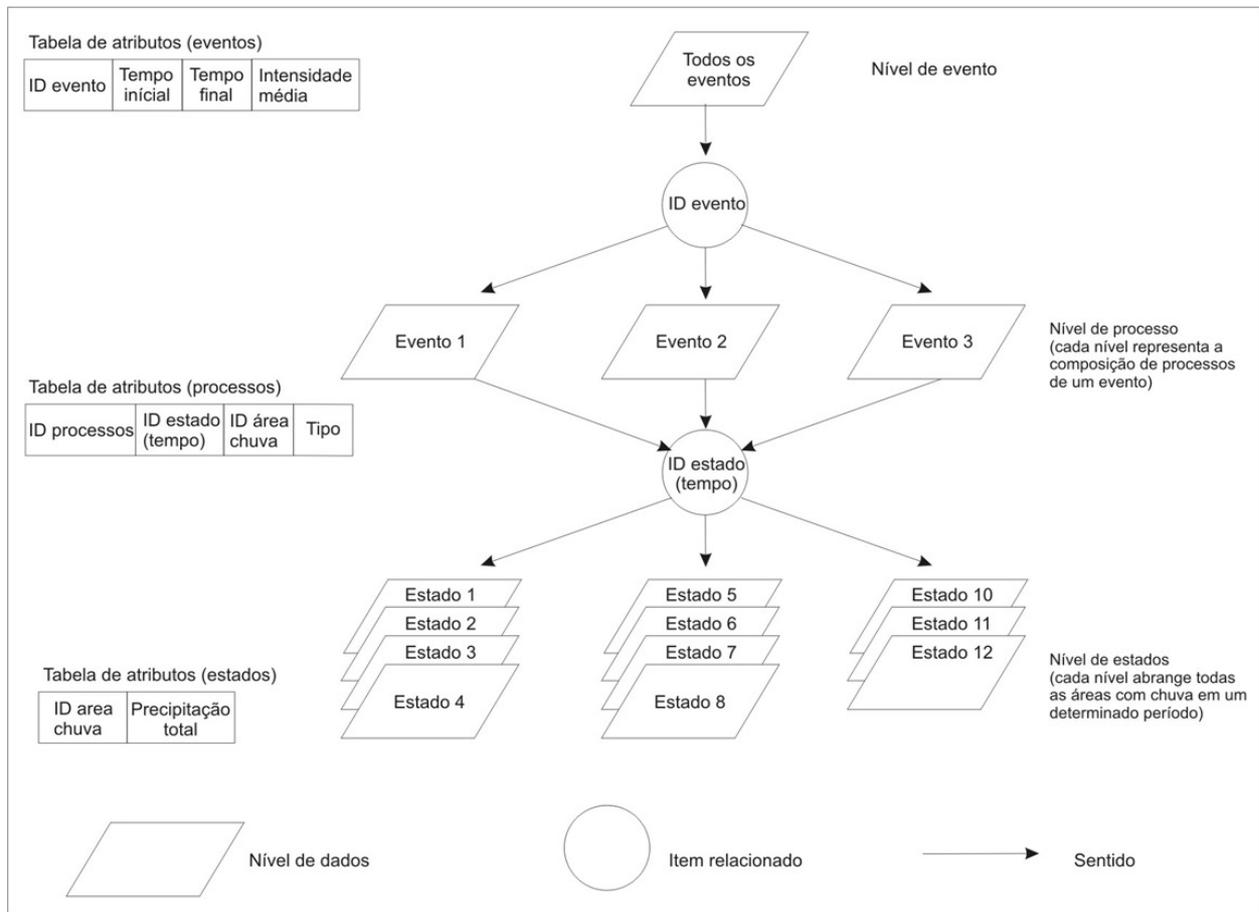


Fig. 10 - Estrutura hierárquica de eventos, processos e estados. Adaptado de Yuan (2001) e Souza (2004).

seus atributos (como horário inicial e final). Cada evento é associado a um conjunto de processos no nível de processo, composto destes e de seus atributos. Cada processo é associado a um conjunto de estados, e uma tabela com seus atributos é criada para registrar características individuais de cada ocorrência. Assim, propriedades do tipo *objeto* são armazenadas nos níveis de eventos e processos, e propriedades do tipo *campo* são armazenadas nos níveis de estado. O nível de eventos proporciona informações sobre “o que aconteceu”, enquanto o nível de processos oferece informações relativas a “como isso (um evento) aconteceu”. É possível consultar o nível de eventos para identificar eventos de interesse e relacioná-los no nível de processos correspondente, obtendo-se, assim, os processos espaço-temporais relacionados a esses eventos (YUAN, 2001).

Como o modelo manipula informações semânticas, espaciais e temporais separadamente, suporta uma ampla gama de consultas espaço-temporais.

O esquema do banco de dados desse modelo pode ser implementado em um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) espacial, como o PostGIS e o Oracle Spatial, usando seu suporte para lidar com informações espaciais. É um modelo muito simples, no qual não são definidos tipos de dados ou operações espaço-temporais. O modelo utiliza os tipos de dados e a linguagem de consulta proporcionada pelo SGBD (FERREIRA *et al.*, 2009).

2.5.5 Modelo Temporal com Base em Entidade

Choi *et al.* (2008) propuseram o Modelo Temporal com Base em Entidade (FBTM).

Quando se consideram mudanças no espaço e no tema de uma entidade, existem três tipos de mudanças temporais: 1) mudança na geometria ao longo do tempo, com mudança no tema; 2) mudança na geometria ao longo do tempo, sem mudança no tema; e 3) mudança no tema ao longo do tempo, sem mudança na geometria (CHOI *et al.*, 2008). O FBTM tem como objetivo gerenciar a história

das entidades, representando esses três tipos de mudança explicitamente. Esse modelo adota e estende os conceitos-chave dos modelos propostos por Worboys (1994) e Yuan (1999, 2001).

Para a representação de uma entidade, o FBTM segue a abordagem Três Domínios para capturar atributos temáticos independentemente dos atributos espaciais, mas usa um identificador de entidade único para conectar espaço, tema e tempo, em vez da tabela de ligação de domínio (figura 11). O modelo também adota e modifica o esquema temporal da ISO (ISO, 2000), para proporcionar detalhes na dimensão temporal.

O FBTM mantém identificadores de objetos persistentes para mudanças espaciais, com um identificador de objeto para mudanças temáticas. Um relacionamento temporal explícito é também adicionado ao FBTM para armazenar a topologia temporal e os tipos de mudanças, e para permitir a realização de consultas espaciais e temáticas ao longo do tempo. Primitivas temporais são usadas para os elementos temporais básicos, a fim de construir um relacionamento temporal explícito (CHOI *et al.*, 2008).

O FBTM usa tempo linear para modelar mudanças discretas em entidades e apresenta limitações para capturar mudanças contínuas sobre entidades que estão em movimento (CHOI *et al.*, 2008).

2.6. 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).

O modelo de dados *campo* é a base para os modelos de localização e de tempo. O modelo de objeto emprega o modelo de dados *objeto* e descreve as mudanças nos atributos temáticos dos objetos ao longo do tempo. O modelo de localização descreve as mudanças que ocorrem em determinado local ao longo do tempo. Os detalhes de cada evento (momento e localização da ocorrência) são armazenados cronologicamente, formando uma cadeia de eventos no modelo temporal.

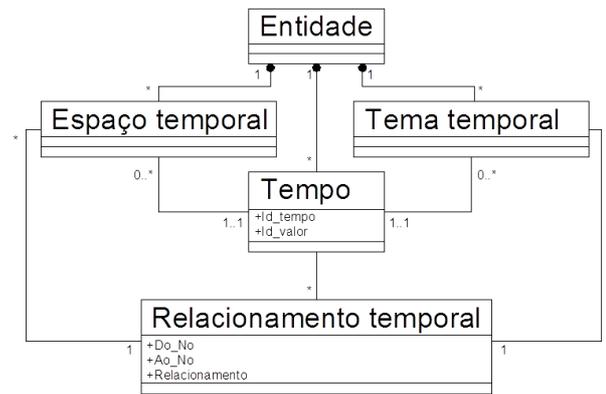


Fig. 11 - Representação conceitual do Modelo Temporal com Base em Entidade (adaptado de Choi *et al.*, 2008).

O modelo de objeto utiliza os paradigmas da orientação a objeto: hierarquia (os objetos podem herdar atributos de objetos-pais) e associações (à medida que os objetos alteram-se, eles podem agrupar-se ou dividir-se em novos objetos, dependendo do processo envolvido). Segundo Raper (2000), o TRIAD pode proporcionar respostas a questões relacionadas a objetos, localizações e tempo, do tipo “Qual a localização deste objeto em determinado momento?”, “O que existia neste local em determinado momento?” e “Quando determinado objeto esteve neste local?”. Uma desvantagem do TRIAD é que ele aplica-se apenas a entidades geográficas com identidade espacial e temporal discreta. Além disso, Galton (2001) argumenta que o TRIAD é esquemático e não pode evitar duplicações de informação inaceitáveis quando implementado.

2.7. 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.

Além dos conceitos de evento, esse modelo define dois tipos de relacionamentos: objeto-evento e evento-evento. Cada objeto ou evento tem um único *setting*. Um *setting* pode ser espacial (ponto, linha ou área), temporal (instante, intervalo ou período) ou espaço-temporal (trajetória, história ou linha de vida geoespacial). Um *setting* espaço-temporal é uma função de um *setting* temporal para um *setting* espacial. Finalmente, um evento geoespacial é associado a um *setting* espaço-temporal. Alguns exemplos de relacionamentos objeto-evento são divisão e fusão (um evento que cria/destrói um limite entre objetos). Alguns exemplos de relacionamentos evento-evento são iniciação e conclusão (a ocorrência do evento *A* inicia/termina o evento *B*) (FERREIRA *et al.*, 2009).

A abordagem de Worboys (2005) é interessante para o raciocínio espaço-temporal e apropriada para a representação de processos ou atividades claramente definidos, como o movimento de um veículo (LE, 2005a).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Problemas encontrados em SIG devido ao fato de ser uma tecnologia que tem como base o computador para manipular e analisar dados geográficos têm conduzido ao aumento da relevância de questões relacionadas à representação geográfica, tanto de uma perspectiva cognitiva quanto de uma perspectiva das ciências naturais (PEUQUET, 2002). Do ponto de vista cognitivo, as questões dizem respeito à representação dos dados geográficos em bancos de dados e à visualização gráfica desses dados de uma maneira mais intuitiva aos usuários. Do ponto de vista da análise científica, a questão é: como proporcionar técnicas de representação coerentes e consistentes que preservem o conteúdo da informação relativa aos dados e que também possam ser usadas em uma ampla variedade de contextos analíticos e de modelagem? Parte dessa questão envolve a representação espaço-temporal.

Incorporar o elemento temporal em SIG tradicional é um desafio que tem sido pesquisado por muitos anos e que apresenta diversas propostas de solução. Entre todas as representações espaço-temporais, a representação tradicional com base em camadas (*layer*) é a única possível de ser implementada em SIG existentes. Entretanto, pesquisas mostram que ela é insuficiente para

representar a informação temporal, porque somente cenários ou mudanças são representados.

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).

Ressalta-se, por fim, que 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, como argumenta Yuan (2008), a representação espaço-temporal em SIG continua a ser um desafio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, T.; RODDICK, J. F. Survey of spatio-temporal databases. **GeoInformatica**, v. 3, n. 1, p. 61-99, 1999.
- AHOLA, T. et al. A spatio-temporal population model to support risk assessment and damage analysis for decision-making. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 8, p. 935-953, 2007.
- 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.
- BRITISH COLUMBIA (PROVÍNCIA). **Spatial archive and interchange format**: formal definition. Disponível em: <<http://srmwww.gov.bc.ca/bmgs/fmebc/histfmt.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- CAMOSSI, E.; BERTOLOTTI, M.; BERTINO, E. A multigranular object-oriented framework supporting spatio-temporal granularity conversions. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 8, p. 511-534, 2006.
- 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.
- FERREIRA, K. R.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Towards an algebra for spatio-temporal databases**. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/06.03.14.41>>. Acesso em: 18 dez. 2009.
- 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.
- HORNSBY, K.; EGENHOFER, M. J. Identity-based change: A foundation for spatio-temporal knowledge representation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 64, n. 1, 2000. P. 207-224
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO). **Geographic information-temporal schema**, ISO/DIS 19108. Switzerland, 2000. 48 páginas.
- LANGRAN, G. **Time in geographic information systems**. London: Taylor & Francis, 1992. 189 páginas.
- 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. 155 páginas.
- LE, Y. A prototype temporal GIS for multiple spatio-temporal representations. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 32, n. 4, p. 315-329, 2005b.
- MCMASTER, R. B.; USERY, E. I. **A research agenda for geographic information science**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. 416 páginas.
- 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.
- PELEKIS, N. et al. Literature review of spatiotemporal database models. **The Knowledge Engineering Review**, v. 19, p. 235-274, 2004.
- 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. 380 páginas.
- 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.

- PEUQUET, D. L. A conceptual framework and comparison of spatial data models. **Cartographica**, v. 21, n. 4, p. 66-113, 1984.
- PULTAR, E. et al. Dynamic GIS case studies: wildfire evacuation and volunteered geographic information. **Transactions in GIS**, v. 13, n. 1, p. 83-104, 2009.
- RAPER, J. **Multidimensional geographic information science**. London: Taylor & Francis, 2000. 332 páginas.
- RAPER, J.; LIVINGSTONE, D. **Spatio-temporal interpolation in four dimensional coastal process models**. Disponível em: <<http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTAFECDFROM/sfpapers/RAPERjonathan/RAPERliv.html>>. Acesso em: 15 nov. 2009.
- SAFE SOFTWARE INC. **Spatial archive and interchange format (SAIF) home page**. 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.
- 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.
- SOUZA, J. D. **Modelo Espaço-Temporal em SIG para análise de qualidade da água em uma bacia hidrográfica**. 2004. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- WACHOWICZ, M. **Object-oriented design for temporal GIS (Research monographs in GIS)**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. 196 páginas.
- WORBOYS, M. F. A unified model for spatial and temporal information. **The Computer Journal**, v. 37, n. 1, p. 26-34, 1994.
- WORBOYS, M. F.; HEARNshaw, H. M.; MAGUIRE, D. J. Object-oriented data modeling for spatial database. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 4, n. 4, p. 369-383, 1990.
- WORBOYS, M. F. Modelling changes and events in dynamic spatial systems with reference to socio-economic units. In: FRANK, A. U.; RAPER, J.; CHEYLAN, J. P. (Ed.). **Life and motion of socio-economic units**. London: Taylor and Francis, 2001. p. 129-138. (ESF GISDATA Series, v. 8).
- 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: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, 3., Santa Fé. **Proceedings...** Santa Fé, New México, USA: NGCIA. 1996a. p. 124-136.
- 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. p. 334-347.
- YUAN, M. Use of a three-domain representation to enhance GIS support for complex spatio-temporal queries. **Transactions in GIS**, v. 3, n. 2, p. 137-159, 1999.
- YUAN, M. Representation of dynamic geographic phenomena based on hierarchical theory. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, 9., New Jersey. **Proceedings...** New Jersey, 2000. p. 19-29.
- YUAN, M. Representing complex geographic phenomena with both object and field-like properties. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 28, n. 2, p. 83-96, 2001.
- YUAN, M. et al. Extensions to geographic representation. In: MCMASTER, R.; USERY, L. (Ed.). **A research agenda for geographic information science**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. cap. 5, p. 129-156.