

Ontologias e Interoperabilidade Semântica entre SIGs

FREDERICO FONSECA¹²

MAX EGENHOFER¹

KARLA A. V. BORGES²

¹National Center for Geographic Information and Analysis
Department of Spatial Information Science and Engineering
University of Maine, Orono, ME 04469-5711, USA

{fred,max}@spatial.maine.edu

² Prodabel - Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte

Av. Presidente Carlos Luz, 1275

31230-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil

karla@pbh.gov.br

Abstract. The complexity and richness of geospatial data and the difficulty of their representation create specific problems for geographic information systems interoperability. This paper proposes the creation of software components from ontologies as a way to integrate geographic information. These software components are derived from ontologies using an object-oriented mapping. The translation of ontologies into active information system components leads to ontology-driven geographic information systems. The approach introduced by this work enables the use of the architecture by users developing new applications and by GIS database designers. The results presented here answer many questions presented in past works that dealt with the quest for a new GIS. The proposed architecture is up to date with requirements of modern information systems that should provide interoperability and move from managing data and information to managing knowledge.

Resumo. A complexidade e riqueza das informações geográficas e a dificuldade de sua representação cria problemas específicos na tentativa de sua integração. Este trabalho apresenta a estrutura de um Sistema de Informação Geográfico baseado em ontologias, que são o principal componente neste tipo de sistema. Um mapeamento baseado em orientação a objetos é usado para criar classes a partir das ontologias. Esta abordagem proporciona um alto grau de interoperabilidade, permitindo integração parcial de informações, quando a integração completa não é possível. Este sistema permite ainda o reaproveitamento de classes já desenvolvidas incorporando, assim, nos novos sistemas, o conhecimento existente em outros SIGs. Os resultados deste trabalho respondem a muitas das questões apresentadas em trabalhos relacionados a nova geração de SIGs. A estrutura apresentada permite a resolução da interoperabilidade semântica, uma das características dos modernos sistemas de informação.

1 Introdução

Hoje em dia existe uma enorme quantidade de dados relativos ao planeta Terra. Estes dados vêm, não só de novos sistemas de informação geográficos (SIG), mas também de satélites novos e cada vez mais sofisticados. Ao mesmo tempo, a expansão da rede mundial de computadores e o aparecimento de novos domínios de aplicações introduziram mudanças importantes no desenvolvimento de sistemas de computação. Os sistemas modernos são distribuídos e altamente heterogêneos. Isto tudo leva a novos desafios com relação à pesquisa em SIG. Um deles é a integração de diferentes tipos de informação, não apenas com relação ao conteúdo, mas também com relação a sua própria natureza como é o caso de

informações geográficas e informações alfanuméricas em geral.

Interoperabilidade é capacidade que um sistema possui de compartilhar e trocar informações e aplicações (Bishr 1997). De acordo com Sheth (1999), a nova geração de sistemas de informação deverá ser capaz de resolver a interoperabilidade semântica, na qual um fato pode ter mais que uma descrição, para poder fazer um bom uso das informações disponíveis com a chegada da Internet e da computação distribuída. Estes sistemas deverão ser capazes de entender o modelo que o usuário faz do mundo e seus significados e entender também os modelos por trás das fontes de informação. Sheth (1999) acredita que o uso de mediadores (Wiederhold 1998) é a solução para ligação entre o usuário e estas fontes de informação.

Ontologia é uma antiga disciplina que vem desde o estudo feito por Aristóteles sobre as categorias e a metafísica, é a ciência que estuda o ser e suas propriedades. Para a comunidade de Inteligência Artificial, ontologias são teorias que especificam um vocabulário relativo a um certo domínio. Este vocabulário define entidades, classes, propriedades, predicados e funções e as relações entre estes componentes. Uma análise detalhada do uso de ontologias como suporte à interoperabilidade pode ser encontrada em Wiederhold & Jannink (1999) e Mena *et al.* (1998). Ontologias têm um papel chave na resolução da interoperabilidade semântica entre SIGs (Wiederhold 1994). Sheth (1999) acrescenta que além de ontologias, o uso do contexto também é fundamental nesta solução. Ele afirma também que a pesquisa sobre a nova geração de sistemas de informação deve se concentrar, a princípio, em domínios específicos, como os SIGs, e depois então desenvolver arquiteturas mais gerais.

A pesquisa sobre a nova geração de SIGs apesar de frequentemente estar focada em interoperabilidade (Câmara 1995; Kottman 1999; Sondheim *et al.* 1999), tem também observado outras áreas. Couclelis (1992) e Egenhofer & Mark (1995) argumentam em favor de um novo SIG que supere as limitações da geometria euclidiana. Pissinou *et al.* (1993) acreditam, que entre os rumos que a nova geração de SIGs deve tomar, estão o uso de orientação a objetos e Inteligência Artificial. Worboys (1995) descreve áreas em que a ciência da computação tem uma participação fundamental na especificação de uma nova geração de sistemas de informação e considera que SIGs com capacidade de lidar com objetos em 3 dimensões e SIGs baseados em sistemas de conhecimento fazem parte desta geração. Egenhofer & Mark (1995) introduzem a “Geografia do Cotidiano”, uma disciplina que estuda a maneira como as pessoas raciocinam sobre o espaço geográfico e o tempo, considerando que os futuros SIGs terão como base esta geografia.

Este trabalho aborda a questão da integração de informações geográficas e apresenta uma proposta para uma arquitetura de sistemas de informação geográficos baseados em ontologias. A arquitetura é baseada no uso de ontologias representadas formalmente e na sua tradução para componentes de software. Esta tradução é feita através do uso de técnicas de orientação a objetos. O resultado deste trabalho responde diversas questões apresentadas em trabalhos relacionados à nova geração de SIGs. A estrutura apresentada permite a resolução da interoperabilidade semântica, uma das características dos modernos sistemas de informação.

O restante deste artigo é organizado da seguinte maneira: a seção 2 faz uma revisão do uso de ontologias em sistemas de informação. A seção 3 apresenta um SIG baseado em ontologias. A seção 4 mostra os tipos de classes disponíveis no sistema e como é feita a navegação através da hierarquia de classes. A seção 5 apresenta conclusões e direções futuras deste trabalho.

2 Ontologias e Sistemas de Informação

Os motivos para se usar ontologias em sistemas de informação geográficos são discutidos em Smith & Mark (1998) e Frank (1997). Smith & Mark (1998) consideram que uma ontologia do mundo geográfico pode:

- ajudar a entender como diferentes comunidades compartilham informações;
- ajudar a descobrir certas distorções presentes nos processos cognitivos de apreensão do mundo geográfico;
- fornecer padrões para o desenvolvimento de SIGs.

Além disto, o uso de ontologias no desenvolvimento de SIGs permite estabelecer correspondências e relações entre os diferentes domínios de entidades espaciais.

Frank (1997) acredita que o uso de ontologias no desenvolvimento de sistemas contribui para uma melhor qualidade do produto final, já que elas podem ajudar a evitar problemas como (1) inconsistências entre ontologias implícitas em SIGs, (2) conflitos entre conceitos ontológicos e implementação e (3) conflitos entre ontologia do senso comum e conceitos matemáticos embutidos no software.

Kuhn (1993) acredita que ontologias podem levar os SIGs a superar a metáfora de mapas, que apresenta o mundo como camadas superpostas e independentes. Os problemas do uso da metáfora de mapas na construção de SIGs foram apontados em Nunes (1991) e Frank (1984).

2.1 Sistemas de Informação baseados em Ontologias

Filósofos e engenheiros de software têm pontos de vista diferentes sobre ontologias. Guarino (1998) apresenta a diferença entre ontologia no sentido filosófico e na maneira como o termo é usado pela comunidade de Inteligência Artificial. Para a engenharia de software, ontologia descreve uma certa realidade com um vocabulário específico, usando um conjunto de premissas de acordo com o sentido intencional das palavras do vocabulário. No sentido filosófico, ontologia é um sistema específico de categorias que reflete uma visão específica do mundo. Gruber (1992) define uma ontologia como uma especificação explícita de uma conceituação. Guarino (1998) revê e amplia esta definição: uma ontologia é uma

teoria lógica que corresponde ao significado intencional de um vocabulário formal, ou seja, um comprometimento ontológico com uma conceituação específica do mundo. Os modelos intencionais de uma linguagem lógica usando este vocabulário são controlados por seu comprometimento ontológico. Este comprometimento e a conceituação subentendida são refletidas na ontologia pela aproximação desses modelos intencionais.

Desta forma, podemos dizer que para o engenheiro de software existem diversas ontologias, enquanto que para o filósofo existe apenas uma, a Ontologia, com letra maiúscula. Para resolver esta questão, Smith (1998) sugere uma distinção terminológica entre uma ontologia baseada na realidade (ontologia-R) e uma ontologia epistemológica (ontologia-E). Ontologia-R é uma teoria que explica como o universo é organizado e corresponde ao mundo dos filósofos. Uma ontologia-E serve aos propósitos dos engenheiros de software e pode ser definida como uma teoria que explica como um indivíduo, grupo, linguagem ou ciência entende um determinado domínio.

2.2 Classificação de Ontologias

Guarino (1997) classifica as ontologias de acordo com sua dependência em relação a uma tarefa específica ou a um ponto de vista:

- *Ontologias de Alto Nível*: descrevem conceitos bem gerais. Em relação aos SIGs, estas ontologias descreveriam os conceitos básicos do espaço. Uma teoria descrevendo partes e todos, e suas relação com a topologia, chamada mereologia (Smith 1995), estaria neste nível;
- *Ontologias de Domínio*: descrevem um vocabulário relacionado a um domínio genérico. No caso de SIGs, poderia ser, por exemplo, uma descrição dos fatos e entidades relacionados a sensoriamento remoto ou ao ambiente urbano;
- *Ontologias de Tarefas*: descrevem uma tarefa ou uma atividade, como interpretação de imagens ou avaliação de poluição sonora em ambientes urbanos;
- *Ontologias de Aplicação*: descrevem conceitos que dependem tanto de um domínio específico como de uma tarefa específica, e geralmente são uma especialização de ambos. Em nossa proposta, estas ontologias são criadas a partir da combinação de ontologias de níveis superiores. Elas representam as necessidades dos usuários com relação a uma aplicação específica, como, por exemplo, a avaliação da disponibilidade de camarões na costa do Espírito Santo.

Outra distinção que Guarino (1998) faz é entre ontologias refinadas e não-refinadas, ou ainda, *off-line* e

on-line. Uma ontologia não-refinada tem um número mínimo de axiomas e seu objetivo é ser compartilhada por usuários que concordem sobre uma determinada visão de mundo. Uma ontologia refinada precisa de uma linguagem de alta expressividade e tem um grande número de axiomas. Ontologias não-refinadas têm mais chance de ser compartilhadas e deveriam ser usadas *on-line* para dar suporte à funcionalidade de sistemas de informação. Já as ontologias refinadas deveriam ser usadas *off-line* e somente para referência. A solução proposta aqui apresenta um modelo de navegação embutido nas classes básicas do sistema. Este modelo permite a transformação de objetos de uma classe para outra, sejam de classes pertencentes a ontologias refinadas para não-refinadas ou vice-versa. Este sistema de navegação esta descrito em Fonseca (1999) e permite que a distância entre as duas soluções sugeridas em Guarino (1998) seja diminuída.

3 SIGs baseados em Ontologias

O uso de ontologias explícitas no desenvolvimento e uso de sistemas de informação leva ao que são chamados de Sistemas de Informação baseados em ontologias (Guarino 1998). Em nossa proposta de um SIG baseado em ontologias, as ontologias são representadas em uma estrutura formal baseada em Rodriguez (2000), que descreve ontologias através seus componentes: partes, funções e atributos. Esta estrutura considera mais a robustez da implementação (Guarino *et al.* 1999), já que não é direcionada a ser usada em sistemas dedução automática e sim para extração e manipulação de informações. Em Cranefield (1999) pode ser encontrada uma discussão completa sobre as formas de armazenamento de ontologias de acordo com o uso pretendido. As ontologias são organizadas em uma estrutura hierárquica, já que está é considerada uma das melhores formas de se representar o mundo geográfico (Smith 1995; Harvey *et al.* 1999). O mapeamento das entidades presentes nas ontologias para componentes de software é feito usando-se técnicas de orientação a objeto e herança múltipla. Este tipo de mapeamento permite integração parcial de informações quando uma integração completa não é possível. Este sistema permite ainda o reaproveitamento de classes já desenvolvidas, incorporando, assim, nos novos sistemas, o conhecimento existente em outros SIGs.

Um SIG baseado em ontologias é composto por um editor de ontologias, por um servidor de ontologias, por ontologias especificadas formalmente e por classes derivadas de ontologias. A especificação de ontologias é feita através do uso de um editor de ontologias. Um sistema para editar, folhear, traduzir e reutilizar ontologias é o Ontolíngua (Gruber 1992). O sistema Ontolíngua

permite que a edição de ontologias seja feita por grupos de especialistas trabalhando simultaneamente. As ontologias podem ser traduzidas para linguagens como CORBA Interface Definition Language (IDL) (OMG 1991), Prolog (Clocksin and Mellish 1981), Epikit e KIF (Genesereth 1990). Em nossa proposta será usado um novo editor de ontologias, já que optamos por traduzir e implementar as classes derivadas das ontologias em Java, opção que não está disponível no sistema Ontolândia. O editor a ser implementado também será capaz de ler e escrever ontologias em XOL (Karp *et al.* 1999), uma linguagem que foi criada para facilitar o compartilhamento de ontologias e é baseada em *Extensible Markup Language* (XML) (Graham and Quin 1999).

Já que está sendo utilizada uma abordagem orientada a objetos na especificação das ontologias, é possível traduzir as classes para uma linguagem de computação orientada a objetos. Nós optamos por fazer a tradução para interfaces em Java. Uma interface em Java descreve um conjunto de métodos públicos que deverão ser implementados por classes em Java. Então, uma interface não é uma implementação. O mecanismo para implementação de herança múltipla em Java através do uso de Interfaces para um SIG baseado em ontologias está descrito em Fonseca *et al.* (2000b).

O resultado do processo inicial de uso de um SIG baseado em ontologias é um conjunto de ontologias especificadas formalmente e um conjunto de classes. Podemos chamar este processo inicial de geração de conhecimento (Figura 1). As ontologias são administradas por um servidor de ontologias. Este servidor permite o folheamento de ontologias, assim, colocando à disposição de usuários, os metadados referentes às informações disponíveis. O servidor de ontologias também contém apontadores para sistemas de informação geográficos. A comunicação entre o servidor de ontologias e os SIGs é feita através de mediadores. Estes mediadores são responsáveis por extrair as informações dos SIGs e criar as instâncias das classes. Estas classes são um ponto chave em nossa proposta. Elas vão conter as informações extraídas dos SIGs e o conhecimento extraído das ontologias.

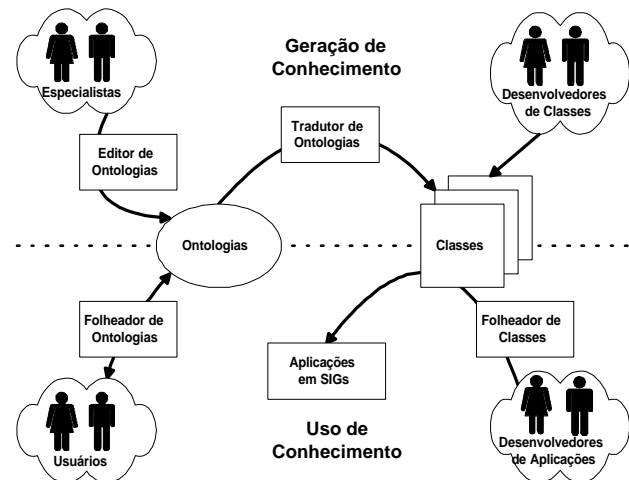


Figura 1 Esquema de um SIG baseado em Ontologias.

4 Classes e Navegação

Sistemas de informação geográficos baseados em ontologias são criados através do uso de classes extraídas de diversas ontologias. Estas classes são usadas como base para o desenvolvimento de novas aplicações. Desta forma, o conhecimento acumulado por especialistas pode ser reutilizado por diversos usuários. Considere, por exemplo, o caso de um usuário que precisa modelar uma classe para lidar com um objeto geográfico que tenha limites imprecisos. Este é um problema difícil, mas que é encontrado em diversas aplicações de SIGs. Uma ontologia que tenha estabelecido os tipos de limites existentes em objetos geográficos, e como eles devem ser tratados em termos de operações e características, pode ser usada neste caso. O usuário pode reaproveitar o conhecimento de especialistas e implementar seu objeto geográfico baseado nesta classe. Na seção 4.1 mostramos os dois tipos de classe presentes num ambiente de sistemas de informação geográficos baseados em ontologias. Na seção 4.2 introduzimos o modelo de navegação proposto.

4.1 Classes de Usuário e Classes de Ontologias

O desenvolvimento de aplicações usando-se classes derivadas de ontologias é feito criando-se o que chamamos de *Classes de Usuário* em oposição a *Classes de Ontologias* que são as classes logo após a tradução. *Classes de Usuário* são criadas através da combinação de *Classes de Ontologias* através do uso de herança múltipla. *Classes de Usuário* são muito mais específicas do que as *Classes de Ontologia* que são mais genéricas. *Classes de Usuário* pertencem ao nível *Ontologias de Aplicação* enquanto que *Classes de Ontologia* pertencem ao nível de *Ontologias de Alto Nível*, *Ontologias de Domínio* e

Ontologias de Tarefas (Guarino 1998). Na arquitetura proposta existem diferentes níveis de ontologias. O nível de detalhe da informação extraída é correspondente aos níveis das ontologias. *Ontologias de Alto Nível* são mais gerais e têm menos detalhes enquanto o contrário ocorre nas demais ontologias. As ontologias dos níveis mais baixos são criadas a partir de refinamentos das definições das ontologias dos níveis superiores. Assim cada novo nível de ontologias incorpora o conhecimento do nível superior (Figura 2).

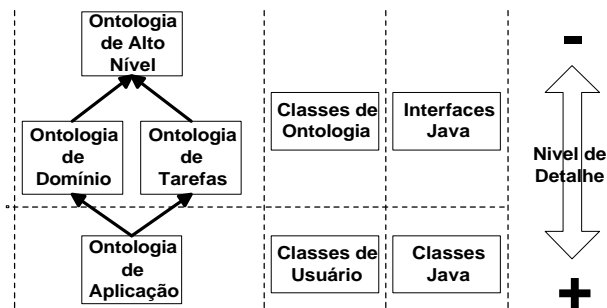


Figura 2 Níveis de Ontologias e Classes, estendido a partir de Guarino (1998).

4.2 Navegação

Em geral, as *Classes de Usuário* são derivadas de mais de uma entidade das ontologias. Então é necessário ter um mecanismo para implementar herança múltipla. Nós escolhemos implementar as classes usando vários papéis. Cada classe pai corresponde a um papel que o objeto pode representar. O modelo para implementar objetos que representam diversos papéis foi sugerido em Pernici (1990). Por exemplo, uma instância da classe lote pode ser vista como um lote ou um polígono. Embora uma instância de uma classe possa ser vista através de múltiplas interfaces, múltiplos papéis, ela nunca perde sua identidade. A identidade do objeto é preservada e o que é colocado à disposição do usuário são suas diversas interfaces.

Nós propomos aqui dois tipos de navegação: generalização/especialização e extração de papéis. Para implementar a generalização, um objeto tem de ter a capacidade de gerar a partir de si próprio uma instância imediatamente superior deste objeto. Para implementar a especialização, um objeto tem de ser capaz de gerar uma instância de si próprio a partir de uma instância da classe imediatamente superior. Estes dois métodos têm como principal objetivo: (1) a reutilização de conhecimento e (2) aplicações de operações que de outra maneira não estariam disponíveis para certas classes. Estas operações também permitem a integração de informações. Isto é feito através da navegação até pontos em comum na árvore de

hierarquia.

A extração de papéis é feita para se aplicar operações que estão disponíveis para certas classes. Ela também é usada para a geração de visões. Por exemplo, quando o usuário quer obter uma visão de rede de uma cidade, todos os objetos que têm as entidades nó ou trecho de rede, como um de seus papéis, fornecem estes papéis para serem exibidos e manipulados.

Um objeto pode ter de se adaptar a várias visões e relacionamentos através de mudanças de classes. Por exemplo, um objeto poligonal que tem de se fundir com um outro objeto que pertence a uma de suas superclasses, tem que se adaptar fazendo o papel desta superclasse. Assim a operação pode ser efetuada usando-se a classe superior comum a ambos os objetos. Informações nunca são perdidas em conversões porque elas ocorrem apenas nas representações dos objetos e não em sua forma original. A possibilidade de se usar operações de navegação em uma árvore hierárquica de ontologias como guia de operações de generalização de dados geográficos foi sugerida em Fonseca (2000a).

Os objetos geográficos têm de implementar, ou então herdar, todos os métodos das classes das quais eles são derivados. Já que estamos propondo uma arquitetura de objetos distribuídos, a implementação dos objetos pode se basear no uso de serviços externos para a execução de seus métodos. Por exemplo, quando da implementação de um objeto setor censitário, um programador tem de escrever um método para o cálculo de população de uma área que cobre diversos setores censitários. Em vez de desenvolver este método, o programador pode chamar um serviço que tenha uma implementação sofisticada deste cálculo. Do ponto de vista do usuário, o método é executado localmente, mas na realidade ele é processado usando métodos e serviços localizados em outro servidor.

Assim como em CORBA (OMG 1991) e Java (Gosling and McGilton 1995), onde todas as classes são derivadas de uma classe básica, nós propomos aqui que todas as classes sejam derivadas de uma classe única chamada Objeto. Esta classe tem dois métodos que são fundamentais para o sistema, os métodos `para cima()` e `a partir de()`. O método `para cima()`, quando aplicado a um determinado objeto, retorna um objeto da classe que deu origem a este objeto. O método `a partir de()` gera uma instância da própria classe a partir de uma instância de uma classe superior. Estes dois métodos proporcionam a navegação por toda a árvore de ontologias.

Consideremos o seguinte exemplo em que duas classes são derivadas da Classe `Setor_Censitário`: `Setor_Censitário_A` e `Setor_Censitário_B`

(Figura 3). O usuário quer usar a operação cálculo de população em Setor_Censitário_A. Mas a operação só está disponível em Setor_Censitário_B. Então é necessário que: (1) Setor_Censitário_A gere uma instância de Setor_Censitário usando para cima(); (2) Setor_Censitário_B gere uma instância de si mesmo a partir da instância de Setor_Censitário gerada na operação anterior; (3) a operação é aplicada na nova instância de Setor_Censitário_B e o resultado estará disponível para o usuário em uma instância de Setor_Censitário_B. O processo inverso poderia ser aplicado para se gerar uma instância de Setor_Censitário_A.

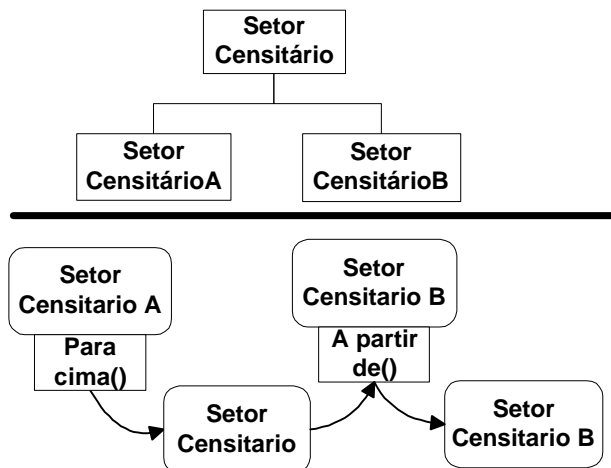


Figura 3: Navegação

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma proposta de um sistema de informação geográfico baseado em ontologias. Estas ontologias são especificadas formalmente e podem ser traduzidas em componentes de software. Estes componentes podem ser usados no desenvolvimento de aplicações geográficas e também na troca de informações. Foi proposta uma estrutura hierárquica para representação das ontologias. A tradução é feita através do uso de técnicas de orientação a objeto. A estrutura apresentada funciona como integradora de diversos sistemas de informação geográficos.

5.1 Resultados Principais

Devido a complexidade do mundo geográfico temos que conviver com diversas visões de mundo (Frank 1997). Assim, é preciso que os desenvolvedores de SIGs tenham ferramentas que permitam a combinação de várias ontologias. A solução apresentada aqui permitiu a formação de classes complexas oriundas de diversas

ontologias. Esta abordagem também possibilitou a integração de informações parciais, quando a integração total não foi possível. A interoperabilidade semântica foi resolvida através do uso de classes derivadas de ontologias. Toda a manipulação de informações foi feita baseada nas definições das entidades geográficas presentes nas ontologias.

O uso de orientação a objetos na tradução de ontologias em classes levou a uma estrutura hierárquica representando o mundo geográfico. O sistema de navegação fez uso desta estrutura e permitiu a geração de novas instâncias classes mais ou menos detalhadas. Estas instâncias permitiram o compartilhamento de informações geográficas e também a reutilização de conhecimento. O compartilhamento pôde ser parcial quando não foi possível um compartilhamento integral.

A possibilidade de se ter diversas visões do mesmo objeto geográfico através do destaque dos papéis que um objeto pode desempenhar atendeu a alguns dos requisitos básicos de um usuário de um sistema de informação geográfico (Laurini and Thompson 1992).

5.2 Direções Futuras

A estrutura comercial atual da Internet é bem diferente da do passado. Um dos modelos que está se estabelecendo é a oferta de serviços básicos gratuitos ao lado da cobrança por serviços mais sofisticados. Este interesse em captar novos consumidores pode ser o passo inicial para sistemas baseados em ontologias. Ontologia mais genéricas podem ser oferecidas gratuitamente enquanto ontologias mais detalhadas seriam cobradas. Outro papel que os provedores de serviços podem ter é o de integradores de informação. Um dos pontos mais importantes em sistemas de informação geográficos baseados em ontologias é a geração das instâncias das classes. É preciso conhecer a fonte das informações e, ao mesmo tempo, é preciso ter conhecimento das ontologias. Esta ligação é importante e delicada. Provedores de informação podem fazer este serviço para ter o direito de comercializar grandes bases de dados. Por exemplo, importantes bases de dados pertencentes a governos municipais poderiam estar disponíveis ao público em geral, e não estão apenas por falta de uma estrutura eficiente de acesso. Desta forma, uma das futuras direções desta pesquisa é analisar o papel destes provedores de serviços e informações como portais de entrada dos usuários do tipo de sistema apresentado aqui.

6 Agradecimentos

Este trabalho de Frederico Fonseca foi desenvolvido com financiamento de National Science Foundation, projetos

NSF SBR-9700465 e IIS-9970123, uma bolsa da NASA/EPSCoR número 99-58 e uma bolsa da ESRI. Além disto, a pesquisa de Max Egenhofer é financiada pelos projetos NSF IRI-9613646, BDI-9723873, e EIA-9876707; por National Imagery and Mapping Agency projeto número NMA202-97-1-1023; por National Institute of Environmental Health Sciences, NIH, projeto número 1 R 01 ES09816-01 e por um contrato com Lockheed Martin.

Referências

- Bishr, Y. (1997) *Semantic Aspect of Interoperable GIS*. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Câmara, G. (1995) *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Ph.D. Thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP.
- Clocksin, W. and Mellish, C. (1981) *Programming in Prolog*. Springer-Verlag, New York.
- Couclelis, H. (1992) People Manipulate Objects (but Cultivate Fields): Beyond the Raster-Vector Debate in GIS. in: A. U. Frank, I. Campari, and U. Formentini, (Eds.), *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space. Lecture Notes in Computer Science* 639, pp. 65-77, Springer-Verlag, Pisa.
- Cranefield, S. and Purvis, M. (1999) UML as an Ontology Modelling Language. in: D. Fensel, (Ed.) *Workshop on Intelligent Information Integration, 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Stockholm.
- Egenhofer, M. and Mark, D. (1995) Naive Geography. in: A. Frank and W. Kuhn, (Eds.), *Spatial Information Theory—A Theoretical Basis for GIS, International Conference COSIT '95, Semmering, Austria. Lecture Notes in Computer Science* 988, pp. 1-15, Springer-Verlag, Berlin.
- Fonseca, F. and Egenhofer, M. (1999) Ontology-Driven Geographic Information Systems. in: C. B. Medeiros, (Ed.) *7th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, Kansas City, MO, pp. 14-19.
- Fonseca, F., Egenhofer, M. and Davis, C. (2000a) Ontology-Driven Information Integration. in: C. Bettini and A. Montanari, (Eds.), *The AAAI-2000 Workshop on Spatial and Temporal Granularity*, Austin, TX.
- Fonseca, F., Egenhofer, M., Davis, C., and Borges, K. (2000b) Ontologies and Knowledge Sharing in Urban GIS. *CEUS - Computer, Environment and Urban Systems* 24(3): 232-251.
- Frank, A. (1984) Computer Assisted Cartography—Graphics or Geometry. in: *Journal of Surveying Engineering*. 110, pp. 159-168,
- Frank, A. (1997) Spatial Ontology: A Geographical Point of View. in: O. Stock, (Ed.) *Spatial and Temporal Reasoning*. pp. 135-153, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Genesereth, M. R. (1990) *The Epikit Manual*. Epistemics, Inc., Palo Alto, CA, Technical Report.
- Gosling, J. and McGilton, H. (1995) *The Java Language Environment: a White Paper*. Sun Microsystems, Mountain View, CA, Technical Report.
- Graham, I. and Quin, L. (1999) *XML Specification Guide*. John Wiley & Sons, New York.
- Gruber, T. (1992) *A Translation Approach to Portable Ontology Specifications*. Knowledge Systems Laboratory - Stanford University, Stanford, CA, Technical Report KSL 92-71.
- Guarino, N. (1997) Semantic Matching: Formal Ontological Distinctions for Information Organization, Extraction, and Integration. in: M. Pazienza, (Ed.) *Information Extraction: A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology, International Summer School, SCIE-97*, Frascati, Italy, pp. 139-170.
- Guarino, N. (1998) Formal Ontology and Information Systems. in: N. Guarino, (Ed.) *Formal Ontology in Information Systems*. pp. 3-15, IOS Press, Amsterdam, Netherlands.
- Guarino, N., Masolo, C. and Vetere, G. (1999) OntoSeek: Content-Based Access to the Web. *IEEE Intelligent Systems* 14(3): 70-80.
- Harvey, F., Bittenfield, B. and Lambert, S. (1999) Integrating Geodata Infrastructures from the Ground Up. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65(11): 1287-1291.
- Karp, P., Chauhdri, V. and Thomere, J. (1999) *XOL: an XML-based Ontology Exchange Language*. Artificial Intelligence Center SRI International, Menlo Park, CA, Technical Report.
- Kottman, C. (1999) Introduction: System and Experiences. in: M. Goodchild, M. Egenhofer, R. Fegeas, and C. Kottman, (Eds.), *Interoperating Geographic Information Systems*. pp. 215-219, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Kuhn, W. (1993) Metaphors Create Theories for Users. in: A. Frank and I. Campari, (Eds.), *Spatial Information Theory. Lectures Notes in Computer Science* 716, pp. 366-376, Springer-Verlag, Berlin.
- Laurini, R. and Thompson, D. (1992) *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic Press, London.

- Mena, E., Kashyap, V., Illarramendi, A., and Sheth, A. (1998) Domain Specific Ontologies for Semantic Information Brokering on the Global Information Infrastructure. in: N. Guarino, (Ed.) *Formal Ontology in Information Systems*. pp. 269-283, IOS Press, Amsterdam.
- Nunes, J. (1991) Geographic Space as a Set of Concrete Geographical Entities. in: D. Mark and A. Frank, (Eds.), *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space*. pp. 9-33, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- OMG, Ed. (1991) *The Common Object Request Broker: Architecture and Specification, Revision 1.1*. OMG Document No. 91.12.1 Framingham, MA.
- Pernici, B. (1990) Objects with Roles. in: *IEEE/ACM Conference on Office Information Systems*, , pp. 205-215.
- Pissinou, N., Makki, K. and Park, E. (1993) Towards the Design and Development of a New Architecture for Geographic Information Systems. in: B. K. Bhargava, T. W. Finin, and Y. Yesha, (Eds.), *Second International Conference on Information and Knowledge Management*, Washington, DC, USA, pp. 565-573.
- Rodriguez, A. (2000) *Assessing Semantic Similarity among Spatial Entity Classes*. University of Maine, Orono.
- Sheth, A. (1999) Changing Focus on Interoperability in Information Systems: from System, Syntax, structure to Semantics. in: M. Goodchild, M. Egenhofer, R. Fegeas, and C. Kottman, (Eds.), *Interoperating Geographic Information Systems*. pp. 5-29, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Smith, B. (1995) On Drawing Lines on a Map. in: A. Frank and W. Kuhn, (Eds.), *Spatial Information Theory—A Theoretical Basis for GIS, International Conference COSIT '95, Semmering, Austria. Lecture Notes in Computer Science 988*, pp. 475-484, Springer Verlag, Berlin.
- Smith, B. (1998) An Introduction to Ontology. in: D. Peuquet, B. Smith, and B. Brogaard, (Eds.), *The Ontology of Fields*. pp. 10-14, NCGIA, Bar Harbor, ME.
- Smith, B. and Mark, D. (1998) Ontology and Geographic Kinds. in: *International Symposium on Spatial Data Handling*, Vancouver, Canada, pp. 308-320.
- Sondheim, M., Gardels, K. and Buehler, K. (1999) GIS Interoperability. in: P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire, and D. Rhind, (Eds.), *Geographical Information Systems. 1 Principles and Technical Issues*, John Wiley & Sons, INC, New York.
- Wiederhold, G. (1994) Interoperation, Mediation and Ontologies. in: *International Symposium on Fifth Generation Computer Systems (FGCS94)*, Tokyo, Japan, pp. 33-48.
- Wiederhold, G. (1998) *Value-added Middleware: Mediators*. Stanford University, Technical Report.
- Wiederhold, G. and Jannink, J. (1999) Composing Diverse Ontologies. in: *8th Working Conference on Database Semantics (DS-8)*, Rotorua, New Zealand.
- Worboys, M. F. (1995) *GIS - A Computing Perspective*. Taylor & Francis Inc., Bristol, PA.