

UMA ONTOLOGIA COLABORATIVA PARA GESTÃO DE DADOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS COM LÓGICA FUZZY

Gustavo Ferreira Afonso ¹, gustavo.afonso@unifal-mg.edu.br;
Ronaldo Luiz Mincato ², ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br;

RESUMO

A gestão de bacias hidrográficas exige a integração e análise de dados de diversas fontes, o que demanda uma estruturação semântica complexa para sua interpretação e interoperabilidade. Este estudo propõe o desenvolvimento de uma ontologia colaborativa para estruturar e representar dados sobre bacias hidrográficas, englobando parâmetros físicos, químicos, biológicos, uso e ocupação do solo, além de aspectos espaçotemporais. A construção da ontologia contou com a participação de especialistas de diferentes áreas, garantindo uma modelagem robusta e multidisciplinar. Adicionalmente, uma metaontologia foi empregada para assegurar a coerência estrutural do modelo, enquanto a lógica *fuzzy* permitiu a modelagem das incertezas inerentes aos dados ambientais. A implementação da ontologia facilitou a integração de dados heterogêneos, resultando em consultas mais precisas e análises mais flexíveis sobre padrões ambientais e impactos antrópicos em bacias hidrográficas.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, ontologia, modelagem de dados, lógica *fuzzy*, gestão ambiental.

INTRODUÇÃO

A análise de bacias hidrográficas transcende a mera avaliação dos componentes naturais da água, abrangendo uma vasta gama de parâmetros que influenciam diretamente os indicadores qualitativos e quantitativos da bacia como um todo. As características biogeofísicas são cruciais na formação e dinâmica das bacias, impactando diretamente a composição e qualidade da água (Samal et al., 2017; Tundisi, 2008). Além disso, fatores antrópicos, como urbanização e uso da terra, afetam significativamente a sustentabilidade ambiental dessas áreas (Couto et al., 2020).

Uma compreensão abrangente da dinâmica hidrológica e ecológica de uma bacia requer a consideração de múltiplos elementos, incluindo uso e ocupação do solo, atributos físicos e químicos da água, composição e estrutura do solo, relevo, densidade populacional, infraestrutura de saneamento e biodiversidade aquática. A integração desses fatores permite a formulação de modelos hidrológicos e ecológicos mais precisos e realistas (Parajuli; Ouyang, 2013). No entanto, essa abordagem holística exige a coleta e análise de um grande volume de dados de diversas fontes e formatos, cuja heterogeneidade estrutural e semântica representa um desafio significativo para sua integração e interpretação. Diante desse cenário, a modelagem semântica através de ontologias tem se mostrado uma solução eficaz para organizar, interoperar

¹ Doutorando em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Alfenas;

² Orientador: Doutor em Ciências (Geociências) pela Universidade Estadual de Campinas;

e analisar informações ambientais de forma estruturada (Putrama; Martinek, 2024; Ranatunga et al., 2025).

Neste estudo, propõe-se o desenvolvimento de uma ontologia colaborativa para a modelagem de dados de bacias hidrográficas. A metodologia adotada incorpora uma metaontologia para garantir a consistência e padronização dos conceitos, e utiliza a lógica fuzzy para modelar a incerteza inerente às variáveis ambientais.

MATERIAIS E MÉTODOS

A palavra "ontologia" tem suas raízes na filosofia grega, mas no contexto da ciência da computação, é definida como uma especificação explícita e formal de uma conceitualização compartilhada (Gruber, 1993; Studer; Benjamins; Fensel, 1998). Isso significa que ela representa formalmente os conceitos de um domínio específico e as relações entre eles, permitindo a interoperabilidade entre sistemas de informação e a organização estruturada do conhecimento.

A ontologia apresentada foi desenvolvida por meio de um processo colaborativo e multidisciplinar, envolvendo especialistas em diversas áreas do conhecimento relacionadas a bacias hidrográficas, além de um analista de sistemas para estruturar o modelo e formatar os conceitos e relações em linguagem formal. A construção da ontologia seguiu as seguintes etapas (Noy; McGuinness, 2001):

- Definição do domínio e escopo: Mapeamento dos principais conceitos e relações relevantes para o domínio de bacias hidrográficas, focando no que seria relevante para um sistema de gestão.
- Identificação de classes e relações: Estruturação hierárquica dos conceitos, detalhando o domínio. Conceitos como parâmetros, dados cartográficos, tipos espaciais e medições foram representados em classes e relacionados entre si.
- Desenvolvimento da ontologia: Modelagem em linguagem formal (Ontology Web Language - OWL) (W3C OWL Working Group, 2012), com auxílio de uma ferramenta para criar e editar instâncias das classes principais. Uma ontologia de unidades de medidas (QUDT.org, 2022) foi reutilizada para representar e converter valores para unidades padrão.
- Validação: Testes de consistência e integração com bases de dados reais, alimentadas com dados de instituições públicas brasileiras como ANA, INPE, Ibama e IBGE (“Dados Abertos - IBAMA”, 2024; “Dados Abertos - INPE”, 2024; “Infraestrutura Nacional de Dados

Espaciais (INDE)”, 2024; “Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Dados Abertos”, 2024; “MapBiomas Brasil”, 2024; “Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos”, 2024).

Uma metaontologia própria foi utilizada para padronizar relações e criar uma estrutura coesa, garantindo a interoperabilidade entre diferentes fontes de dados. Relações espaçotemporais, bem como "similaridade", "é parte de" e "pertence a", foram modeladas nesta metaontologia. Além disso, a lógica *fuzzy* (Zadeh, 2009, 1965) foi incorporada à ontologia e metaontologia para modelar variáveis com incerteza, permitindo que relações como proximidade espaçotemporal e similaridade fossem representadas de maneira gradual (Yaguinuma et al., 2011).

Para armazenar os dados das diferentes fontes, foi implementado um banco de dados relacional baseado nos conceitos e relações mapeados na ontologia, utilizando PostgreSQL (Group, 2024) com a extensão espacial PostGIS (Committee, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A implementação da ontologia colaborativa formalizou uma estrutura semântica que permitiu a conversão de dados ambientais brutos, oriundos de fontes heterogêneas, em um modelo relacional semanticamente enriquecido. A ontologia modelou conceitos como parâmetros físico-químicos e biológicos, atributos geoespaciais e temporais, possibilitando a criação de instâncias representativas de entidades como rios, bacias hidrográficas e medições hidrológicas.

A aplicação da metaontologia e da lógica *fuzzy* viabilizou a representação de relações com pertinência gradual, como “proximidade espacial”, “proximidade temporal” e “similaridade”. A Figura 1 apresenta uma parte da ontologia, com classes, instâncias e suas relações, incluindo os pesos difusos entre elas.

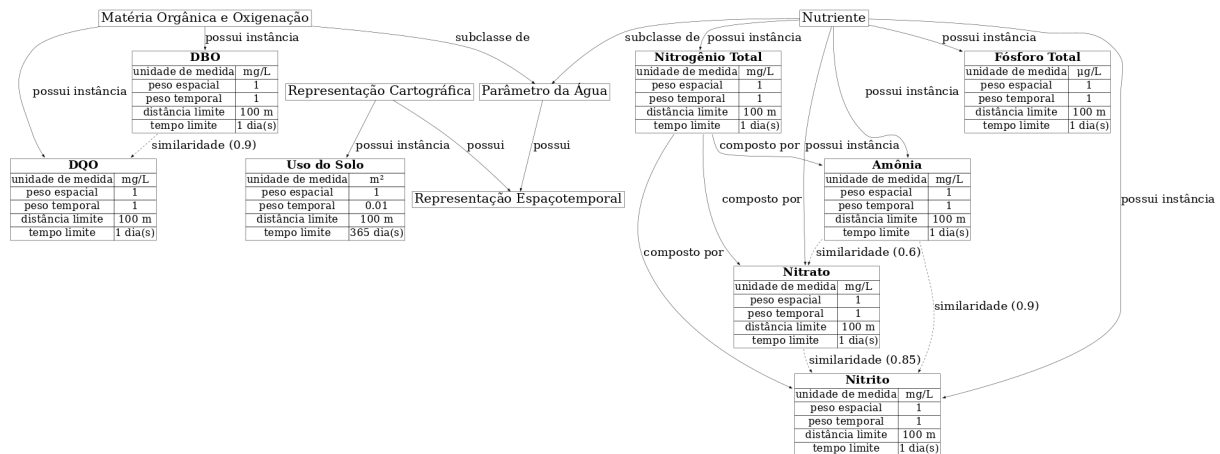


Figura 1. Parte da ontologia.

Na Figura 1, observa-se que as classes “Parâmetro Água” e “Representação Cartográfica” possuem “Representação Espaçotemporal”, o que confere a suas instâncias atributos difusos de peso temporal e peso espacial, além de limites temporais e espaciais. Esses atributos são utilizados para inferir a relação entre instâncias distintas em termos de localização espacial e/ou temporal. Outras relações, como “similaridade” (com peso difuso) e “composto por”, enriquecem a semântica do domínio, permitindo a expansão de consultas e o enriquecimento dos dados.

Este modelo foi operacionalizado em uma base de dados relacional que permitiu consultas com expressividade semântica ampliada. Por exemplo, foi possível consultar diferentes pontos de medição de parâmetros de qualidade da água em uma bacia específica, correlacionando-os a áreas com múltiplas características ambientais.

Embora o foco do estudo tenha sido a modelagem semântica para estruturação de dados, e não sua análise, foi realizado um teste de desempenho entre consultas com e sem o uso da metaontologia e da lógica *fuzzy*. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados de consultas na base de dados materializada

Descrição da consulta	Tempo com metaontologia e lógica <i>fuzzy</i> [ms]	Tempo sem metaontologia e lógica <i>fuzzy</i> [ms]	Quantidade de registros
Pontos de medição de DBO ou Fósforo na Bacia do Rio Tietê no Estado de São Paulo	324	487	1292
Uso do Solo no Estado do Rio de Janeiro	129	298	173
Índice de Qualidade da Água nos Municípios da Bacia do Rio Amazonas	623	311655	104

Observou-se um desempenho superior com a utilização das relações descritas na metaontologia e com a lógica *fuzzy*, especialmente na última consulta da Tabela 1. Sem as relações previamente armazenadas, os cálculos para as relações geoespaciais são executados no momento da consulta, o que aumenta o tempo de processamento. Além disso, as consultas sem as relações da metaontologia tornam-se mais complexas, pois precisam incluir filtros de pertinência espaçotemporal, que já estão implicitamente inseridos nas consultas baseadas nas relações da metaontologia. É importante notar que as consultas, com ou sem as relações da metaontologia, foram realizadas na mesma base de dados materializada em um banco de dados relacional.

Os resultados demonstram que a modelagem ontológica, aliada à lógica *fuzzy*, pode ser um recurso poderoso para a representação e análise de sistemas ambientais complexos. A ontologia atuou como uma camada de mediação entre os dados heterogêneos e a estrutura do banco de dados relacional, promovendo interoperabilidade e coerência conceitual. Em termos práticos, a estrutura desenvolvida pode ser aplicada em sistemas de informação semanticamente enriquecidos para integrar e consultar dados interoperáveis, que por sua vez são utilizados por gestores públicos e pesquisadores para apoiar políticas públicas e melhorar a gestão de dados ambientais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a utilização de uma ontologia colaborativa, aliada a uma metaontologia e ao emprego de lógica *fuzzy*, constitui uma abordagem robusta e eficaz para a estruturação e representação de dados ambientais complexos no contexto de bacias hidrográficas. A principal contribuição reside na capacidade do modelo desenvolvido em integrar dados heterogêneos – provenientes de múltiplas fontes e com diferentes estruturas semânticas – promovendo uma representação mais coerente, interoperável e semanticamente enriquecida desses dados.

Os resultados obtidos indicam que a aplicação da metaontologia potencializou a expressividade semântica das consultas e reduziu significativamente o tempo de execução, principalmente em cenários com relações espaçotemporais, quando comparada a abordagens convencionais. A incorporação da lógica *fuzzy* possibilitou a modelagem de relações graduais entre entidades ambientais, como similaridade e proximidade espaçotemporal, oferecendo uma interpretação mais realista das incertezas inerentes aos dados ambientais. Esses achados

corroboram com abordagens precedentes que já reconheciam as ontologias como ferramentas centrais para a integração de dados ambientais, mas avançam ao introduzir mecanismos de tratamento de incerteza em nível ontológico.

No entanto, algumas limitações devem ser reconhecidas. A definição manual das funções de pertinência *fuzzy* e o escopo ainda limitado da ontologia podem restringir sua aplicação em domínios mais amplos ou em situações que demandem generalização automatizada. Ademais, a ausência de uma interface gráfica para usuários não técnicos pode representar um obstáculo à adoção mais ampla da solução proposta por gestores e tomadores de decisão.

As implicações práticas desta pesquisa são relevantes: o modelo pode ser empregado em sistemas de apoio à decisão na gestão de recursos hídricos, especialmente em conformidade com a Política Nacional de Recursos Hídricos brasileira (“Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997”, 1997), que adota a bacia hidrográfica como unidade de planejamento. A estrutura desenvolvida pode ainda ser adaptada para outros domínios ambientais que enfrentem desafios semelhantes de integração e análise de dados complexos e incertos.

AGRADECIMENTOS

Este estudo contou com o apoio do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) e do uso de bases de dados públicas disponibilizadas por instituições nacionais como ANA, INPE, IBGE e MapBiomas. Agradecemos ainda aos colegas da equipe multidisciplinar do laboratório V-013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMMITTEE, PostGIS Project Steering. **PostGIS – Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL**. Disponível em: <<https://postgis.net/>>.

COUTO, Edvando *et al.* Integrating Environmental, Geographical and Social Data to Assess Sustainability in Hydrographic Basins: The ESI Approach. **Sustainability**, v. 12, p. 16, 10 abr. 2020.

Dados Abertos - IBAMA. Disponível em: <<https://dadosabertos.ibama.gov.br/>>.

Dados Abertos - INPE. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpe/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos>>.

GROUP, PostgreSQL Global Development. **PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database**. Disponível em: <<https://www.postgresql.org/>>.

GRUBER, T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. **Knowledge Acquisition**, v. 5, n. 2, p. 199–220, 1993.

Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Disponível em: <<https://inde.gov.br/>>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Dados Abertos. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dados/organizacoes/visualizar/instituto-brasileiro-de-geografia-e-estatistica-ibge>>.

Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. BrasíliaPresidência da República do Brasil, , 1997. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>

MapBiomas Brasil. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/>>.

NOY, Natalya F.; MCGUINNESS, Deborah L. **Ontology development 101: A guide to creating your first ontology**. Stanford knowledge systems laboratory technical report KSL-01-05 and ..., , 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/243772462_Ontology_Development_101_A_Guide_to_Creating_Your_First_Ontology>. Acesso em: 19 mar. 2025

PARAJULI, Prem B.; OUYANG, Ying. Watershed-scale hydrological modeling methods and applications. **Current perspectives in contaminant hydrology and water resources sustainability**, p. 57–80, 2013.

PUTRAMA, I. Made; MARTINEK, Péter. Heterogeneous data integration: Challenges and opportunities. **Data in Brief**, p. 110853, 2024.

QUDT.ORG. **QUDT – Quantities, Units, Dimensions and Data Types Ontologies**. Disponível em: <<https://www.qudt.org/>>.

RANATUNGA, Sajith *et al.* Use of Semantic Web Technologies to Enhance the Integration and Interoperability of Environmental Geospatial Data: A Framework Based on Ontology-Based Data Access. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 14, n. 2, p. 52, 2025.

SAMAL, Nihar R. *et al.* A coupled terrestrial and aquatic biogeophysical model of the Upper Merrimack River watershed, New Hampshire, to inform ecosystem services evaluation and management under climate and land-cover change. **Ecology and Society**, v. 22, n. 4, 2017.

Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/sistema-de-informacoes-sobre-recursos-hidricos>>.



STUDER, R.; BENJAMINS, V. R.; FENSEL, D. Knowledge Engineering: Principles and Methods. **Data & Knowledge Engineering**, v. 25, n. 1-2, p. 161-197, 1998.

TUNDISI, José Galizia. Water resources in the future: problems and solutions. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 7-16, 1 dez. 2008.

W3C OWL WORKING GROUP. **OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition)**. [S.l.]: W3C, 11 dez. 2012. Disponível em:
<<https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>>.

YAGUINUMA, Cristiane A. *et al.* A fuzzy ontology-based semantic data integration system. **Journal of Information & Knowledge Management**, v. 10, n. 03, p. 285-299, 2011.

ZADEH, Lotfi A. Fuzzy Logic. *In*: LIN, Tsau-Young; LIAU, Churn-Jung; KACPRZYK, Janusz (Orgs.). **Granular, Fuzzy, and Soft Computing**. Encyclopedia of Complexity and Systems Science Series. New York, NY: Springer US, 2009. p. 19-49.

ZADEH, Lotfi Asker. Fuzzy sets. **Information and control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.