POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

ONTOLOGIE GEOGRAFICHE NEL DOMINIO SPAZIALE URBANO E DEL PATRIMONIO COSTRUITO

Original
ONTOLOGIE GEOGRAFICHE NEL DOMINIO SPAZIALE URBANO E DEL PATRIMONIO COSTRUITO / Colucci, E., Spano', A.T.. - In: BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA. - ISSN 1721-971X. - ELETTRONICO. - RIVISTA DELLA SOCIETA' DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA - BOLLETTINO SIFET:N. 2 (2020) - Numero Speciale - Artificial Intelligence in Geomatics for Cultural Heritage(2020), pp. 1-10.

Availability:
This version is available at: 11583/2859998 since: 2021-01-08T12:21:20Z

Publisher:
SIFET

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

25 November 2026

ONTOLOGIE GEOGRAFICHE NEL DOMINIO SPAZIALE URBANO E DEL PATRIMONIO COSTRUITO

A REVIEW OF SPATIAL ONTOLOGIES FOR URBAN AND ARCHITECTURAL HERITAGE DOMAIN

Elisabetta Colucci[a, *], Antonia Spanò[b]

[a] Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino (Italia), elisabetta.colucci@polito.it
[b] Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125 Torino (Italia), antonia.spano@polito.it

*corresponding author

TEMA: Artificial Intelligence in Geomatics for Cultural Heritage | **CAMPO DI RICERCA:** Ontologie

PAROLE CHIAVE: ontologie spaziali, patrimonio costruito urbano, standards, interoperabilità
KEY WORDS: spatial ontologies, urban and architectural heritage, built heritage, spatial standards, interoperability

RIASSUNTO

Il presente lavoro ha lo scopo di presentare un'articolata ricognizione della letteratura passata e attuale, inerente le ontologie informatiche, con particolare attenzione a quelle connesse al dominio spaziale urbano e del patrimonio culturale architettonico costruito. Da un punto di vista generale, il documento offre una descrizione di definizioni, classificazioni e approcci e metodi per la creazione di ontologie nel campo del Web Semantico, dalle prime nozioni emerse negli anni Novanta alla loro evoluzione negli ultimi due decenni. Nel settore del patrimonio costruito, l'interesse, il bisogno di conoscenza e l'uso di ontologie sono cresciuti per rispondere alle necessità di condivisione e scambio di dati spaziali e alla crescente adozione di infrastrutture geografiche. Queste stanno infatti riscontrando problemi di interoperabilità tecnica, geometrica e semantica nell'integrazione di database geografici e urbani multi-scala che richiedono pertanto l'adozione di standard condivisi e linguaggi comuni.

ABSTRACT

This paper aims to report a review in the past literature about computer science ontologies, with a special view on the ones connected to the spatial domain of urban data and built heritage. From a general point of view the paper offers a write up of definitions, classifications and design approaches and methods for ontologies as they have emerged since the nineties and evolved in the last two decades. In the built heritage domain, the interest, the need of knowledge and the use of ontologies have grown to face the wide exchange of digital spatial data and the extensive adoption of spatial data infrastructures, which faced problems related to the interoperability among spatial databases, and specifically the integration of geographical and urban databases involving the adoption of standards.

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro ha come obiettivo una revisione della letteratura su ontologie spaziali e geografiche e, nello specifico, nel dominio del patrimonio costruito urbano e architettonico.
Le innovazioni tecnologiche per la comunicazione che si sono sviluppate a partire dai primi anni 2000, hanno portato studiosi e ricercatori a soffermarsi in modo diverso sul contenuto delle informazioni, anche su quelle spaziali, che in particolar modo interessano la Geomatica.
Questo interesse è inoltre connesso alla rivoluzione inter e multidisciplinare riguardante l'utilizzo e le possibili applicazioni di queste informazioni: "per essere comprensibili e condivisibili, i modelli della conoscenza devono combinare precisione semantica con efficacia della trasparenza cognitiva, in quanto incorporano paradigmi di modellazione sempre più sofisticati ed eterogenei. La recente esplosione di interesse per le ontologie denota fondamentalmente questa tendenza" (Guarino & Musen 2005).
Come affermato da Guarino, all'inizio degli anni 2000, l'interesse per le ontologie, al di fuori della loro accezione filosofica, rispecchia la necessità di gestire e condividere informazioni, in diversi domini e aree di applicazioni, tra diverse discipline e attraverso l'utilizzo di un linguaggio e una semantica comune. Questo interesse è particolarmente legato alla nascita e alla diffusione del Web Semantico[1], basato sull'accesso a contenuti comuni, condivisibili e interoperabili attraverso il web.
Definizione da tempo condivisa di ontologia nel campo dell'informatica è la "descrizione esplicita formale di concetti in un dominio di interesse all'interno del quale vi sono classi, proprietà e relazioni" (Guarino, 2009). Un'ontologia è pertanto un oggetto informativo o un manufatto computazionale, è una "specificazione formale ed esplicita di una concettualizzazione condivisa" (Studer et al., 1998). Le ontologie sono considerate

[1] Un'estensione del World Wide Web attraverso standards. Questo mira a rendere i dati Internet "machine-readable" (XML and Semantic Web W3C Standards Timeline, 2012-02-04).

modelli concettuali in grado di formalizzare la conoscenza di un particolare dominio di studio, esse sono utili per definire concetti e relative informazioni a livello multidisciplinare.
Anche nel campo delle informazioni spaziali, i problemi di interazione tra informazioni diverse e complementari nella sfera del patrimonio urbano e costruito possono trovare supporto nella definizione di sistemi digitali grazie allo sviluppo di rappresentazioni formali e concettuali come le ontologie. Esse possono infatti consentire il controllo digitale e l'integrazione delle informazioni al fine di condividere una struttura comune tra i diversi attori coinvolti nei processi di trasformazione e sviluppo della città e del patrimonio urbano (cittadini, scienziati, ricercatori, politici, amministrazioni locali, urbanisti, architetti, ecc.). Per le ragioni sopracitate e per il fatto che le informazioni spaziali a diversa scala sono oggi ad un punto di svolta nel campo dei sistemi di gestione delle informazioni, è sempre più necessaria l'armonizzazione dei dati e delle informazioni in strutture condivise e con formati di dati comuni. A questo proposito, nello scenario del recente incontro tra l'ambiente GIS (Geographic Information Science), per la gestione delle informazioni geografiche e spaziali a scala territoriale e urbana, e i sistemi BIM (Building Information Modelling), a scala dell'edificio e molto recentemente delle infrastrutture e della città ("Urban BIM") vi sono ancora problemi di interoperabilità e numerosi ostacoli tecnici da superare per la creazione di database univoci in grado di rappresentare informazioni sia a livello urbano sia edilizio o architettonico.
Il presente studio si colloca nello scenario sopra descritto e mira a descrivere l'evoluzione delle ontologie e le loro diverse classificazioni, fino a giungere alla definizione di ontologie nel campo del web semantico e dell'intelligenza artificiale.
I modelli di classificazione delle ontologie e i relativi scopi sono stati presi in considerazione sintetizzando i metodi e gli approcci utilizzati per la loro costruzione.
Sono qui presentati, inoltre, alcuni esempi di ontologie geografiche e relative al dominio delle informazioni spaziali urbane e del patrimonio culturale e costruito.
Il lavoro di ricognizione mira a gettare le basi per future possibili integrazioni e armonizzazioni delle conoscenze e degli standards ad oggi esistenti. Chiarire le diverse connotazioni e tipologie di ontologie spaziali è infatti fondamentale per una possibile applicazione pratica in campo urbano a diverse scale di rappresentazione.

2. EVOLUZIONE DELLE DEFINIZIONI DI ONTOLOGIA: dalla filosofia all'intelligenza artificiale

2.1 "Ontologia" e "ontologia": filosofia e informatica

Il termine "ontologia", a seconda del contesto in cui viene applicato, assume molteplici accezioni. La differenza più grande è quella tra significato filosofico e contesto applicato all'informatica e all'ingegneria (Guarino, 1998).
In filosofia si parla di *Ontologie*, senza l'articolo e con la "o" maiuscola, mentre *un'ontologia*, con l'articolo e l'iniziale minuscola si riferisce all'area informatica e a quella dell'informazione e della conoscenza. Un chiarimento sulle possibili interpretazioni del termine "ontologia" è fornito in (Guarino & Giaretta, 1995) (Tabella 1).

Ontologia
1. Ontologia come disciplina filosofica
2. ontologia come concettualizzazione informale
3. ontologia come formalizzazione semantica
4. ontologia come specificazione di una "concettualizzazione"
5. ontologia come rappresentazione di un sistema concettuale attraverso una teoria logica: - caratterizzato da specifiche proprietà formali - caratterizzato da scopi specifici
6. ontologia come vocabolario
7. ontologia come metadati

Tabella 1. Possibili interpretazioni del termine "ontologia" (Guarino & Giaretta, 1995).

È importante distinguere la prima interpretazione di *Ontologia* (1.) dalle altre (2.-7.). La principale distinzione riguarda la loro applicazione nella filosofia. Dal punto di vista etimologico, il termine composto "Ontologia" deriva dal greco antico ὄντος, òntos che significa "essere; ciò che è" e da λόγος, lògos, "discorso logico", quindi significa letteralmente "studio dell'essere".
Ci si riferisce, invece, a *un'ontologia* nelle discipline della conoscenza e nell'informatica per identificare "una sorta di oggetto informativo o artefatto computazionale" (Guarino et al., 2009).
Le definizioni più citate di ontologia in informatica sono di seguito riportate:

1. "Specificazione esplicita di una concettualizzazione" (Gruber, 1993);
2. "Specificazione formale di una concettualizzazione condivisa" (Borst, 1997);
3. "Specificazione esplicita e formale di una concettualizzazione condivisa" (Studer, 1998).

Nonostante la definizione di Gruber del 1993 sia la più diffusa e citata, essa non tiene conto di una visione condivisa tra coloro che usano tale concettualizzazione o che sono i destinatari dei vantaggi della sua adozione; a questo proposito l'accezione di Studer del 1998 considera "un contesto piuttosto che una visione individuale" (Guarino et al., 2009).
Il presente lavoro si riferisce pertanto a questa definizione condivisa del termine, che unifica le precedenti. Da queste definizioni possiamo pertanto identificare un'ontologia come una specificazione di una *concettualizzazione* di un dominio. Una concettualizzazione è un modello astratto che rappresenta le entità di un dominio in termini di concetti, relazioni e altre primitive del modello (Paragrafo 4). Pertanto, un'ontologia comprende un vocabolario semantico rappresentativo di una realtà (o dominio) caratterizzato da un insieme di definizioni che specificano il significato dei termini e dei corrispondenti concetti che i termini identificano. Un vocabolario di un'ontologia, quindi, può essere definito attraverso diversi linguaggi (ad esempio con diagrammi che rappresentano classi, attributi e relazioni).

2.2 Semantic Web e Intelligenza Artificiale

Ad oggi, le ontologie sono sempre più riconosciute e utilizzate come componenti essenziali in molti campi della scienza dell'informazione (come l'informatica, l'intelligenza artificiale, il web semantico, l'ingegneria dei sistemi, l'ingegneria dei software, l'informatica biomedica e l'architettura dell'informazione) come una forma di rappresentazione della conoscenza del mondo o di parte di esso.
Negli ultimi anni si è assistito a un rapido aumento del numero di ontologie disponibili al pubblico. Queste ontologie non sono tutte di alta qualità e alcune hanno una portata molto limitata (Falquet et al., 2011); tuttavia, ciò dimostra come lo sviluppo di ontologie non sia più solo una risorsa di grandi progetti con finanziamenti significativi. Ciò è sicuramente dovuto a diversi fattori come la diffusione del web semantico, la disponibilità di metodologie per

le ontologie in ingegneria, la definizione di ontologie nella letteratura, la presenza di numerosi corsi e tutorials e molto altro.
Nel campo dell'*intelligenza artificiale* (AI) le ontologie furono inizialmente impiegate come mezzo per concettualizzare alcune parti del reale. Il primo obiettivo fu quello di permettere al sistema software di "ragionare" sulle entità del mondo reale. Uno dei primi esempi è rappresentato dall'ontologia CYC (Cycorp) (Lenat, 1995), il progetto mirava a unire una base ontologica con la conoscenza di base. Tra i progetti nel campo dell'AI, il progetto CYC risultò rilevante per lo sviluppo del *web semantico* (una rete di dati collegati, chiamati *linked-data*) (Smith, 2003).
Un altro esempio è l'ontologia EL, sviluppata per intelligenza artificiale e l'analisi del linguaggio naturale. Si tratta di un'ontologia che include tipi, idee, fatti ed eventi, e anche un motore di inferenza capace di deduzioni complesse in modo efficiente. Pertanto, nel campo dell'informatica, un'ontologia è una specificazione dei significati dei simboli in un sistema di informazioni e di ciò che si presume esista con una determinata semantica. Un'ontologia in AI specifica quali tipi di individui e classi verranno modellati, quali proprietà verranno utilizzate e fornisce alcuni assiomi che limitano l'uso di un determinato vocabolario. Il Web semantico consiste in un insieme di tecnologie standard per realizzare una rete di dati tramite un modello comune fornito alle macchine con il fine di descrivere e interrogare i dati con una corretta classificazione di termini e in uno specifico dominio.
Tra i diversi linguaggi standard adottati nel web semantico (come XML, "Extensible Markup Language", URI, "Uniform Resource Identifier", RDF, "Resource Descriptiom Framework" e RDFs schema) è bene ricordare che l'OWL, "Web Ontology Language", è utilizzato per descrivere concetti, attributi ed esempi; possiede inoltre meccanismi incorporati in grado di assegnare proprietà di uguaglianza, transitività e cardinalità tra individui, classi e sottoclassi all'interno di domini definiti.

2.3 Cenni alle ontologie nel dominio del patrimonio costruito e urbano

L'interesse per le ontologie da utilizzare nel dominio urbano è stato inizialmente innescato da sfide tecnologiche legate all'interoperabilità delle banche dati urbane e territoriali e dalla necessità di interconnettere i diversi database. Dal momento che attualmente molti database urbani e del territorio sono stati caratterizzati dalla diffusione della tecnologia GIS per la loro gestione e per il conseguente governo dei territori di interesse (Falquet et al., 2011), un ulteriore aggiornamento di queste basi di dati che li rendesse facilmente disponibili e collegabili ad altre fonti di dati è parso impossibile senza apportare una profonda ristrutturazione del loro contenuto. Data l'entità e la complessità del processo, l'ingegneria ontologica è stata vista come un passo necessario per gestire sia la solidità concettuale che la continuità con le versioni precedenti delle basi di dati. Proprio tale integrazione tra differenti database costituisce la motivazione per sviluppare un'ontologia urbana e del territorio, questa necessità scaturisce inoltre dalla necessità di uniformare tutte le basi di dati agli standards internazionali (come ad esempio INSPIRE[2]).
La progettazione di ontologie urbane è vista come una sfida stimolante a livello concettuale in quanto necessita un chiarimento dei mezzi di comunicazione e degli obiettivi tra i diversi attori coinvolti nelle attività di sviluppo e gestione urbana (ingegneri, urbanisti, costruttori, architetti, cittadini, ecc).
Nel Paragrafo 5.2 sono presentati alcuni esempi di ontologie nel dominio del patrimonio urbano, architettonico e culturale.

3. CLASSIFICAZIONI DELLE ONTOLOGIE

Le ontologie sono state utilizzate negli ultimi decenni per molteplici attività al fine di migliorare la comunicazione tra agenti (umani o software) e per riutilizzare e aggiornare modelli di dati o schemi di conoscenza. Queste attività sono caratterizzate da problemi di interoperabilità e possono essere applicate in domini diversi. Di conseguenza, con l'evolversi delle ontologie in diversi scenari sono stati proposti diversi tipi di ontologie.

Una recente revisione sulle classificazioni di ontologie esistenti è riportata in (Kokla & Guilbert, 2020). La ricerca spiega che tradizionalmente le ontologie sono classificate secondo due criteri: il loro livello di formalità e il loro livello di generalità. Secondo la prima, le ontologie sono considerate dall'informale al semi-formale e formale (Gruber, 2004). Secondo la generalità, e come descritto in seguito secondo "lo scopo", si distinguono quattro tipi di ontologie: ontologie di *primo livello* (*top-level, upper-level o foundation*), di *dominio* (*domain*), di *attività* (*ta*sk) e di *applicazione* (*application*) (Guarino, 1998).
Le ontologie di primo livello definiscono concetti generali e fondamentali, come entità, proprietà e relazioni. Questi concetti sono indipendenti dal dominio di interesse. Le ontologie di dominio definiscono concetti relativi ad un determinato punto di vista in una certa area di interesse, mentre le ontologie "task" definiscono concetti relativi ad una specifica attività. Le ontologie geografiche possono essere considerate ontologie di dominio. Tuttavia, anche le ontologie di primo livello sono rilevanti per la conoscenza geo-spaziale in quanto definiscono nozioni generali come spazio, tempo, confini e processi. Le ontologie applicative, d'altra parte, definiscono concetti relativi a un determinato dominio e attività; queste possono specializzare entrambe le ontologie.
In Falquet et al. (2011) sono riportate ulteriori classificazioni che considerano una suddivisione basata su tipologia del linguaggio e su obiettivo e scopo. I paragrafi 3.1 e 3.2 riportano le suddette classificazioni.

3.1 Classificazioni di ontologie in base a semantica e linguaggio

Dalle meno formali alle più formali, le ontologie possono essere suddivise in quattro tipologie (Figura 1):

1. *Ontologie di informazione:*

diagrammi e schemi utilizzati dall'uomo per trasmettere progetti e idee. Queste sono sintetiche, schematiche, facilmente editabili e focalizzate su concetti esempi e relazioni.

2. *Ontologie linguistiche/terminologiche*:

glossari, dizionari, vocabolari, tassonomie, tesauri e database del lessico. Sono focalizzate su termini, relazioni e gerarchie. Il loro scopo è definire i termini più appropriati per rappresentare un concetto evitando ambiguità. Questo tipo di ontologie possono essere espresse in linguaggio RDF, "Resource Description Framework", utilizzato per descrivere i metadati web. RDF è implementato in XML ed è composto da triple (soggetto, predicato e oggetto).

3. *Ontologie software* (o ontologie basate sull'implementazione del software):

vengono utilizzate per fornire uno schema concettuale utile per la memorizzazione o la manipolazione dei dati. Nelle attività di sviluppo software vengono applicate al fine di garantire la coerenza dei dati. Un esempio di linguaggio per questo tipo di ontologie è UML (Unified Modeling Language), un linguaggio di modellazione standardizzato costituito da una serie integrata

[2] https://inspire.ec.europa.eu/

di diagrammi, sviluppata per aiutare gli sviluppatori di sistemi e software a specificare, visualizzare, costruire e documentare gli artefatti dei sistemi software. Un esempio di ontologia software è rappresentato dallo standard IFC (Industry Foundation Classes).

4. *Ontologie formali*:

queste ontologie richiedono una semantica chiara e precise ragioni per distinguere i concetti. Nel Web semantico sono definiti con software di editor di ontologie come Protégé (un editor open source gratuito per la creazione di ontologie creato dalla Stanford University) e possono essere espresse in OWL.



Figura 1. Classificazione di ontologie in base al linguaggio utilizzato (Lassila & McGuinness, 2001).

3.2 Classificazioni di ontologie basate su obiettivo e scopo

La seconda classificazione si basa sullo scopo dell'ontologia. Come accennato precedentemente, la Figura 2 mostra come sia possibile collegare tra loro le diverse tipologie in base all'obiettivo.

1. *Ontologie locali o di applicazione:*

le ontologie locali o applicative sono specializzazioni di ontologie di dominio in cui potrebbe non esserci condivisione delle conoscenze. Questo tipo di ontologia rappresenta il modello di un dominio basato su un singolo punto di vista di un utente o di uno sviluppatore. In (Fonseca et al., 2000) le ontologie locali vengono presentate come la combinazione delle ontologie di domino e le ontologie di attività.

2. *Ontologie di dominio e di attività:*

come sopracitato, sono applicabili a un dominio con uno specifico punto di vista (definendo come un gruppo circoscritto di utenti concettualizza e visualizza uno specifico fenomeno).
L'ontologia dell'attività (task) contiene le conoscenze per realizzare un'attività, mentre l'ontologia di dominio descrive le conoscenze in cui l'attività viene applicata.

3. *Ontologie di riferimento di base (core):*

è uno standard utilizzato da diversi gruppi di utenti; è quindi connessa a un dominio, ma integra differenti punti di vista del gruppo. È il risultato dell'integrazione tra diverse ontologie (Fonseca et al., 2002). Un esempio rappresentativo di questa ontologia è CityGML (Paragrafo 5.1), uno standard per la rappresentazione, la memorizzazione e lo scambio di modelli 3D di città. CityGML definisce le classi e le relazioni per rappresentare gli oggetti del database topografico più rilevanti rispetto alle loro proprietà geometriche, topologiche, semantiche e di aspetto. Pertanto, CityGML potrebbe essere considerato un'ontologia di riferimento di base relativa al modello di città 3D, considerando i fini della visualizzazione.

4. *Ontologie generali*:

non sono riferite a un dominio particolare, ma descrivono una vasta area di conoscenza.

5. *Ontologie di primo livello:*

sono ontologie generiche adatte a diversi domini, esse definiscono nozioni di base, oggetti, relazioni, eventi e processi. Le ontologie di base possono essere paragonate ai modelli concettuali (Fonseca et al., 2003) per la progettazione e la strutturazione di database spaziali. Un esempio è il Geography Markup Language (GML), uno standard di codifica OpenGIS per la rappresentazione, la memorizzazione e lo scambio di informazioni geografiche.



Figura 2. Classificazione delle ontologie basata sul loro scopo (Schema rielaborato da Falquet et al, 2011).

4. APPROCCI E METODI PER LA DEFINIZIONE DI ONTOLOGIE

Prima di descrivere i diversi approcci e le attività per costruire un'ontologia è importante chiarire il significato di *concettualizzazione* e *specificazione* nel quadro della creazione di ontologie.
Come schematizzato nella Figura 3, il passaggio dal mondo reale al modello esterno e infine a quello logico consiste in un processo complesso e caratterizzato da molte fasi di "modellazione dei dati" (*data modelling*). Il primo processo prevede la schematizzazione e la formalizzazione partendo dall'analisi della realtà percepita all'interno di un dominio da parte di alcuni soggetti per raggiungere un formato comprensibile dalle macchine, così da poterlo poi implementare nelle applicazioni informatiche (Laurini, Thompson, 1992).



Figura 3. Le ontologie: dal mondo reale al modello esterno (Laurini & Thompson, 1992).

Nello studio presentato in Genesereth & Nilsson (1987) la *concettualizzazione* viene descritta come "una visione astratta e semplificata del mondo che desideriamo rappresentare per qualche scopo (gli oggetti, i concetti e altre entità che si presume esistano in alcune aree di interesse e le relazioni che intrattengono tra loro). Ogni conoscenza di base o sistema basato sulla conoscenza è caratterizzato da una concettualizzazione".
Dieci anni dopo (Guarino, 1998) afferma che la nozione di Genesereth e Nilsson si riferiva a normali relazioni matematiche, bisogna invece considerare relazioni intenzionali, chiamate *relazioni concettuali*. In seguito alla definizione di queste è possibile chiarire il ruolo dell'ontologia.
In Guarino et al. (2009) vengono fornite molteplici definizioni del termine, ma la più significativa è quella in cui una

concettualizzazione è una rappresentazione matematica: una tupla (D, R) dove D è un insieme chiamato universo del discorso e R è un insieme di relazioni esistenti in D; ogni elemento di R è una relazione che riflette un dominio nel mondo compresi gli oggetti di D (Figura 4).
È necessario inoltre definire un linguaggio (L); è importante sottolineare che un'ontologia dipende da esso, mentre una concettualizzazione è indipendente dal linguaggio. Il linguaggio è essenziale per definire e comunicare la descrizione del mondo reale. Può essere informale (linguaggio naturale, linguaggio grafico, icone ...) o formale (linguaggio logico, linguaggio matematico, linguaggio di programmazione ...). La Figura 5 mostra i diversi approcci con livelli di formalizzazione crescenti (Guarino et al., 2009).

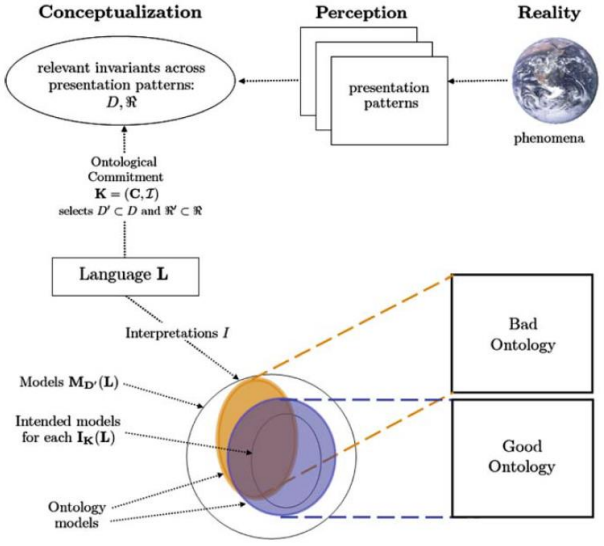


Figura 4. Le relazioni tra i fenomeni che si verificano nella realtà, la loro percezione (in tempi diversi), la loro concettualizzazione astratta, il linguaggio usato per parlare di tale concettualizzazione, i modelli previsti e un'ontologia (Guarino et al., 2009).

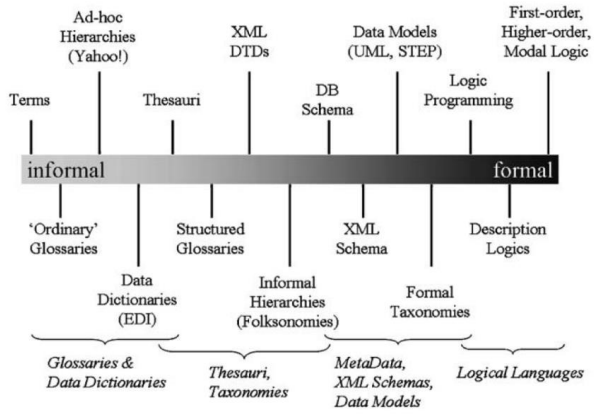


Figura 5. Approcci differenti al linguaggio. In genere, i linguaggi logici sono ammissibili per la specifica formale ed esplicita, e, quindi, per le ontologie (Guarino et al., 2009).

Negli anni sono stati proposti differenti approcci metodologici al fine di progettare un'ontologia. I più completi sono *Methontology* (Gomez-Perez et al. 2004) e *On-to-knowledge* (Sure et al. 2003). Methontology enfatizza il riutilizzo di domini esistenti e di ontologie di primo livello e propone di utilizzare, ai fini della formalizzazione, una serie di rappresentazioni intermedie che possono successivamente essere automaticamente trasformate in diversi linguaggi formali. Questo metodo si basa su molteplici passaggi: specificazione del dominio di interesse, acquisizione della conoscenza, concettualizzazione (che può comprendere la creazione del glossario), formalizzazione e integrazione, implementazione in un linguaggio formale, valutazione dell'ontologia, creazione di documentazione e linee guida e manutenzione. In Figura 6 sono sintetizzati i metodi e le diverse attività da svolgere per generare un'ontologia.
La metodologia *On-to-knowledge Methodology* (OTKM) è stata sviluppata per l'introduzione di applicazioni di gestione della conoscenza nelle imprese. In particolare, il processo comprende cinque diverse fasi: lo studio di fattibilità, il kickoff, il perfezionamento, la valutazione dell'applicazione e l'evoluzione (Gomez-Perez et al., 2004).



Figura 6. Metodologie e attività per la creazione di un'ontologia (Gandon, 2002).

La fase di concettualizzazione è composta da diversi steps, uno dei quali è la costruzione della *tassonomia* per la quale è possibile adottare diversi approcci: top-down, bottom-up e middle-out (Gandon, 2002) (Figura 6).
L'approccio top-down parte dal concetto più generico e costruisce una struttura per specializzazione; mira a utilizzare le conoscenze esistenti (standards, ontologie, modelli concettuali, dizionari, documenti, ecc.) per definire una formalizzazione semantica di concetti specifici. Un approccio top-down viene adottato, inoltre, al fine di estendere un'ontologia integrando conoscenze già strutturate" (Kokla, et al., 2018).
L'approccio Bottom-Up, al contrario, parte dai concetti più specifici e costruisce una struttura mediante generalizzazione; l'ontologia si costruisce determinando i concetti di basso livello tassonomico e generalizzandoli. Questo approccio è incline a fornire ontologie su misura e specifiche con concetti dettagliati. Il metodo riguarda quindi l'arricchimento dell'ontologia con esempi e casi studio.
L'approccio Middle-Out, infine, identifica concetti centrali in ogni dominio identificato; i concetti chiave sono definiti e in seguito generalizzati e specializzati per popolare l'ontologia (Gandon, 2002).
Parallelamente, è bene citare la più recente e completa metodologia per la costituzione di un'ontologia nel campo del web semantico, riportata in Noy et al. (2001). Dopo aver chiarito cosa sono e perché sviluppare ontologie, il sopracitato contributo chiarisce i passaggi per il loro sviluppo. Gli autori presentano un

approccio iterativo, composto da diversi steps: determinare il dominio e lo scopo dell'ontologia (definendo le domande alla quale essa deve rispondere), considerare il riuso di ontologie esistenti, enumerare i termini e i concetti fondamentali, definire le classi e le gerarchie (secondo gli approcci sopradescritti top-down, bottom-up o misto), definire proprietà e cardinalità e, infine, validare l'ontologia con esempi.
Infine, operativamente, i metodi maggiormente usati per costruire ontologie nel dominio urbano sono l'"ontology matching", che permette di trovare corrispondenze semantiche tra le entità di ontologie diverse e l'"ontology alignment", ovvero un multi-matching che identifica corrispondenze tra più ontologie. Degli esempi applicativi sono riportati in: (Fonseca et al., 2002), (McGuinness et al. 2000) e (An et al., 2005).

5. ONTOLOGIE GEOGRAFICHE E SPAZIALI

Un'ontologia geografica definisce i concetti generali degli oggetti nello spazio e le loro relazioni in un particolare dominio. Etimologicamente, geografia significa descrizione della Terra, mentre ontologia si riferisce a ciò che esiste. Quindi, ontologia geografica sta a significare 'la descrizione delle cose esistenti sulla Terra', cioè delle sue caratteristiche geografiche. Per decenni, le ontologie sono state utilizzate nel campo delle tecnologie dell'informazione - per descrivere la conoscenza in un dominio - come reti semantiche, in particolare per l'interoperabilità di database e per la descrizione della conoscenza nell'intelligenza artificiale (Laurini et al., 2016).
In passato, le ontologie geografiche descrivevano oggetti geografici con relazioni convenzionali; ciò non era però sufficiente per descrivere lo spazio, e quindi a questo proposito è stato necessario specificare il tipo di geometria, le sue caratteristiche e il linguaggio adottato. Ad oggi, le ontologie spaziali integrano rappresentazioni dello spazio e relazioni, ovvero non rappresentano solo gli oggetti nello spazio, ma anche le relazioni topologiche che intercorrono tra questi.
In questo scenario sono state sviluppate molteplici ricerche nel campo delle ontologie geografiche e spaziali.
Nel 2002 (Fonseca et al., 2002) viene proposto l'impiego di ontologie per l'integrazione di piattaforme GIS. L'obiettivo consisteva nella definizione di un GIS in grado di integrare informazioni geografiche e semantiche. A tal fine, è stato sviluppato un modello concettuale per i dati geografici e la loro rappresentazione digitale.
Come affermato da Yeung & Hall (2007) e ampiamente discusso da Fonseca et al. (2002, 2003), il processo di progettazione e documentazione dell'ontologia è simile alla pianificazione del modello concettuale durante la creazione di database. Entrambi i processi mirano a identificare e definire caratteristiche del mondo reale e relazioni tra le entità. Tuttavia, nonostante questa similitudine, i prodotti finali non sono gli stessi. Lo scopo di uno schema concettuale è quello di descrivere la struttura del database ad un alto livello di astrazione; un'ontologia rappresenta, invece, la definizione delle relazioni semantiche e del vocabolario dei termini utilizzati per rappresentare i dati. Pertanto, non esiste necessariamente una corrispondenza diretta tra la struttura di un'ontologia e la struttura del database.
Proseguendo ancora l'analisi della letteratura su questo tema, Tomai et al. (2004; 2005a; 2005b) presentano diverse metodologie per la progettazione e l'implementazione di ontologie geografiche. La ricerca del 2004 si è focalizzata sull'analisi degli elementi delle ontologie come concetti, relazioni e assiomi al fine di sviluppare un approccio sistematico per la progettazione di ontologie geografiche. Ulteriori studi, si sono poi focalizzati sull'implementazione dell'ontologia tramite strumenti web-based in linguaggio OWL. Infine, il lavoro del 2005 (b), esamina come la nozione di "contesto formalizzato" possa essere incorporata in un'ontologia geografica selezionando fonti di conoscenza e informazioni eterogenee.
Il lavoro di Kavouras et al. (2005) introduce una metodologia in grado di confrontare diverse categorie di ontologie geografiche. La ricerca mira a estrarre informazioni semantiche da definizioni e testi, descrivendo proprietà e relazioni semantiche per le entità o classi geografiche.
Un altro esempio di studio sulle ontologie nel campo delle informazioni geografiche è rappresentato dalla tesi di Lutz et al. (2006), una rassegna della letteratura sulle ricerche che mirano a trovare una risposta alla domanda: "come è possibile migliorare la creazione di dati geografici e servizi di informazione nelle infrastrutture di dati spaziali attraverso l'adozione di ontologie?".
Ancora, lo studio di Chaves et al. (2007) propone una nuova versione del Geographic Knowledge Base (GKB): un ambiente in grado di integrare dati geografici e generare ontologie evitando la duplicazione dei dati e consentendo il riutilizzo della conoscenza.
In definitiva, in numerosi studi (Chaves et al., 2007; FT Fonseca et al., 2002; Kavouras et al., 2005; Kokla et al., 2018; Lutz et al., 2006; Tomai et al., 2004; Tomai & Spanaki, 2005) vengono presentate molteplici metodologie con l'obiettivo di arricchire e popolare ontologie geo-spaziali per estrarre informazioni semantiche.
Come è possibile comprendere dai precedenti esempi della letteratura, le ontologie geografiche sono utili e adatte in molti campi di applicazione della scienza della geo-informazione per scopi differenti: per affrontare efficacemente l'interoperabilità, per connettere basi di dati esistenti ecc.
Si può dire quindi che nello scenario della letteratura disponibile sia inclusa la possibilità di considerare le ontologie come strumento per garantire lo scambio e l'uso dei dati nel campo dell'informazione geografica (GI), in grado perciò di aiutare nei processi decisionali e di gestione delle risorse in diverse aree applicative.
Dall'evoluzione del GIS al concetto più ampio di infrastruttura dei dati territoriali (SDI), l'uso delle ontologie è stato da subito considerato di fondamentale importanza e rappresenta ad oggi una sfida per la diffusione e l'interoperabilità nell'utilizzo di piattaforme e sistemi geografici (SDIs).
Secondo il Cookbook della Global Spatial Data Infrastructure Association (Nebert, 2004), "il termine Spatial Data Infrastructure viene spesso utilizzato per indicare la raccolta di tecnologie, politiche e disposizioni istituzionali che facilitano la disponibilità e l'accesso ai dati spaziali". A questo proposito, le ontologie sono necessarie per l'integrazione e l'armonizzazione dei dati cartografici, che derivano da differenti fonti (regionali, nazionali e internazionali).
Le problematiche relative all'applicazione e all'adozione di ontologie nel campo dell'informazione geografica e alla condivisione delle informazioni spaziali mediante SDI sono legate ai numerosi formati in cui i dati sono distribuiti ed alla difficoltà di costruire un'omogenea e condivisa documentazione dei metadati. Inoltre, un altro significativo e persistente ostacolo all'interoperabilità è l'eterogeneità in termini di semantica, sintassi, topologia e geometria.

5.1 Standards per l'interoperabilità geografica e la rappresentazione dei beni culturali

Gli standard esistenti per la rappresentazione delle informazioni che concorrono alla conoscenza del patrimonio architettonico, urbano e architettonico provengono da svariati settori. Il presente paragrafo presenta gli standards più utilizzati e diffusi nell'ambito

del patrimonio edilizio e i principali standards adottati oggi nel campo dell'informazione geografica.
L'ontologia di base (core) per la rappresentazione del patrimonio culturale è il modello concettuale di riferimento CIDOC (CIDOC-CRM, Conceptual Reference Model), sviluppato dal Comitato Internazionale per la DOCumentazione (CIDOC) (Doerr et al., 2002, 2007).
Durante gli anni sono state sviluppate alcune estensioni al fine di migliorare l'applicazione del CIDOC-CRM a diverse tipologie di patrimonio costruito e culturale, un esempio è il "Monument Damage Information System" (MONDIS) (Blaško et al., 2012; Cacciotti et al., 2013).
Oltre a questo, vi sono altri esempi di estensioni dell'ontologia "core" per beni culturali e sono disponibili differenti applicazioni e attività.
Il CRMgeo (Hiebel et al, 2015) integra le proprietà spazio-temporali delle entità, e a tale scopo, integra il CIDOC CRM con lo standard OGC GeoSPARQL. Quest'ultimo mira a rappresentare e interrogare i dati geospaziali nel web semantico, definendo con la sua struttura le classi geografiche *Spatial Object, Feature and Geometry*.
Il CRMba (Ronzino et al., 2016) propone di modellare la complessità e delinea i metadati per la documentazione del patrimonio costruito nella prospettiva della buildings archeology; il CRMarcheo (Doerr et al., 2020) supporta il processo di scavo archeologico e tutti i processi e le attività ad esso correlate e, infine, il CRMsci (Doerr, 2018) è un'ontologia formale destinata ad essere utilizzata come schema globale per l'integrazione di dati e metadati per aspetti inerenti l'osservazione scientifica.

Nel quadro della classificazione del patrimonio, è bene considerare inoltre anche vocabolari e classificazioni; il Getty Institute Vocabularies propone una gerarchia di termini, con annesse definizioni, relativi al dominio del patrimonio culturale, con l'obiettivo di classificare opere d'arte e d'architettura, nomi di artisti o architetti e categorie geografiche. Uno di questi vocabolari è il Thesaurus di Arte e Architettura (AAT).

Per quanto concerne lo scenario italiano, possiamo invece considerare alcuni standard e ontologie sviluppati dal "Ministero per i Beni, le Attività Culturali e il Turismo" (MIBACT). L'Istituto Centrale Italiano per il Catalogo e la Documentazione (ICCD - MIBACT) ha sviluppato una classificazione finalizzata alla documentazione e alla conservazione dei beni culturali; questa è implementata nella piattaforma SIGECweb e sono in corso alcune ricerche per uniformare la struttura all'ontologia CIDOC-CRM. Per garantire l'uso pratico di questa classificazione e la sua interoperabilità, sono state progettate alcune ontologie specifiche. Il primo esempio è ArCo[3], il Knowledge Graph per il patrimonio culturale italiano, composto da 7 vocabolari. In secondo luogo, l'ontologia Cultural-ON[4] mira a modellare i dati che caratterizzano i luoghi culturali.

Nel campo dell'informazione geografica, come noto, esistono numerosi standards riconosciuti e adottati a livello internazionale, dei quali si fornisce un breve richiamo nel seguito.

CityGML, pubblicato dall'Open Geospatial Consortium (OGC), è probabilmente il modello di dati standard più riconosciuto a livello internazionale per rappresentare informazioni 3D multi-scala per edifici e città. Sono stati inoltre sviluppate alcune estensioni per differenti domini denominate ADE (Application Domain Extensions) (Biljecki et al., 2018).

INSPIRE (Interoperable Spatial Data Infrastructure in Europe) è invece la direttiva europea (pubblicata nel 2007 e adottata obbligatoriamente in tutti i paesi europei nel 2020) nata con il fine di creare un'infrastruttura di dati territoriali interoperabile in Europa. Lo standard mira alla rappresentazione di dati transfrontalieri omogenei a supporto di analisi territoriali. Nella parte del modello di dati è inclusa l'entità "edificio" (building), e alcune proprietà sono compatibili con il modello CityGML.
Per quanto riguarda l'architettura, l'ingegneria e l'edilizia, nonché la gestione di risorse e impianti, l'Industry Foundation Classes (IFC) è lo standard progettato per il Building Information Model (BIM). Lo standard IFC, certificato dal building SMART, offre una visione basata su oggetti del modello, comprendente le geometrie 3D e 2D insieme alle relazioni intercorrenti tra gli oggetti. Esso mira alla rappresentazione di informazioni relative alla progettazione di nuovi edifici, utilizzando la modellazione parametrica. Recentemente è stata proposta la serializzazione nel formato ifcOWL che è compatibile con gli standard RDF, RDFS e OWL2 del Semantic Web.
Ad oggi, l'integrazione tra tecnologie semantiche basate sul web (approcci ontologici) e l'industria AEC (Architecture, Engineering and Construction) sembra essere sempre più perseguita (Pauwels et al. 2017).
Non mancano approcci operativi che sviluppano metodologie e algoritmi per automatizzare la conversione da Building Information Models nei modelli di edifici CityGML, catturando sia l'informazione geometrica che quella semantica disponibile nei modelli BIM originari (Stouffs et al. 2018); tali procedure devono affrontare la complessità di strategie di modellazione completamente differenti, come rappresenta efficacemente la figura 7.
Partendo dal presupposto che le tecniche di rilevamento 3D basate sulla realtà abbiano contribuito alla definizione della geometria degli oggetti che confluiscono nei modelli HBIM e che le ontologie siano utili per la gestione della conoscenza, Yang et al (2019) propongono un uso combinato di queste tecnologie. In particolare, il modello HBIM viene convertito in un modello ontologico per arricchire il contenuto semantico. Ovviamente, questi esperimenti sono interessanti per orientare sempre più la raccolta e l'analisi della CH verso una conoscenza standardizzata e quindi facilmente condivisa dai molti stakeholder che contribuiscono alla conservazione del patrimonio.

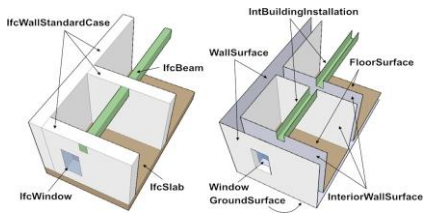


Figura 7. Differenze nel modello di un edificio tra IFC (a sinistra) e CityGML (a destra) (Nagel et al., 2009).

5.2 Esempi di ontologie nel dominio del patrimonio culturale costruito e urbano

Questa sezione riporta alcuni lavori svolti per la creazione di ontologie nel dominio urbano, presentando ricerche applicate al patrimonio architettonico e storico.
Nel dominio del patrimonio urbano e costruito sono molte le possibili applicazioni e le comunità coinvolte nei processi e nelle attività per la gestione, lo sviluppo e la valorizzazione di beni

[3] http://wit.istc.cnr.it/arco

[4] http://dati.beniculturali.it/cultural_on/

culturali, edifici e città. In questo scenario possiamo citare ad esempio il restauro, la conservazione, la documentazione, le attività di gestione del rischio, le discipline estimative ed energetiche e molte altre.
A questo proposito, alcuni gruppi di lavoro hanno sviluppato alcuni studi che propongono ontologie (spaziali e informatiche) per la rappresentazione del costruito a diverse scale e con diversi livelli di granularità (Colucci et al., 2020).
Per quanto riguarda ad esempio l'area della *conservazione*, che consiste in uno degli ambiti più studiati, diverse ricerche hanno proposto soluzioni per l'implementazione di ontologie esistenti come il CIDOC-CRM (Tait, While, 2009; Acierno et al., 2017; Acierno et al., 2019; MONDIS, descritto in Blaško et al., 2012 e Cacciotti et al., 2013). In particolare, come descritto in seguito, Acierno et al. (2019) propongono un'ontologia per la *conservazione e la gestione* dei centri storici. Altri studi riportano invece possibili ontologie applicative per la *documentazione* del patrimonio architettonico (Hois et al., 2009). Nel campo della *valutazione energetica* di nuclei abitati ed edifici storici, è stata proposta invece un'estensione di CityGML (Egusquiza et al., 2018).

Focalizzando l'attenzione nel dominio urbano e patrimonio costruito è possibile individuare diversi casi sviluppati per la formalizzazione semantica di città, beni culturali, centri e edifici storici.
Il libro di Teller, et al. (2007), *Ontologies* for urban development e lo studio di Berdier & Roussey (2007) *Urban ontologies: The towntology prototype towards case studies* descrivono due esempi concreti di ontologie nel campo di dominio urbano. Entrambi sono derivati dallo sviluppo del progetto Towntology (COST action C21: Towntology - Urban Ontologies for a Better Communication in Urban Civil Engineering Projects - UCE), avviato nel 2008 e terminato nel 2012. L'obiettivo principale era quello di aumentare la conoscenza nel campo dell'ingegneria civile urbana mediante ontologie per facilitare le comunicazioni tra sistemi di informazione, parti interessate e specialisti a livello europeo. A questo proposito lo studio di Teller, et al. (2007) riassume il programma dell'azione C21 dopo il seminario di novembre 2006 organizzato per affrontare le questioni emergenti nel settore. La ricerca di Berdier & Roussey (2007) descrive invece il lavoro svolto nell'ambito del progetto per studiare significati e classificazioni di ontologie per studi urbani e relative applicazioni.
Un altro esempio di ontologie nel dominio urbano è riportato nel libro di Falquet et al. (2011).
Nel quadro del patrimonio architettonico e costruito sono stati condotti alcuni tentativi per la progettazione di ontologie. Alcuni esempi sono: il lavoro di Messaoudi et al. (2015) mirato a rappresentare fenomeni di degrado nell'area archeologica; lo studio di Kokla et al. (2019) verso la costruzione di una formalizzazione semantica per (piccoli) centri storici considerando le ontologie e i modelli di dati esistesti per possibili estensioni, integrazioni e armonizzazioni.
Tra le opere recenti e significative che studiano le ontologie nel campo dell'architettura e dei beni culturali è possibile rilevare: *An ontology-based framework for conservation process* (Acierno, et al., 2017) e *Ontologie per i Centri Storici* (Acierno, M. 2019) in "*Il futuro dei centri storici*. *Digitalizzazione e strategia conservativa*" (Fiorani, D., 2019). La prima ricerca studia il patrimonio architettonico in un quadro ontologico per attività conservative considerando la possibilità di modellare l'edificio in ambiente BIM. In Acierno (2019) è stata invece proposta una metodologia per strutturare un'ontologia per valutare la vulnerabilità dei centri storici (considerando e implementando la Carta del Rischio italiana e l'ontologia geografica GeoSPARQL – OGC).
Inoltre, è importante rilevare che una componente rilevante del progetto INCEPTION[5] ha avuto per obiettivo lo sviluppo di una ontologia HBIM destinata alla conoscenza semantica del patrimonio costruito e ambienti connessi, utilizzando la tecnologia del *Semantic Web*. (Bonsma P. et al. 2016). La piattaforma Inception basata sull'open standard semantic web è dotata di un motore di ricerca semantico ed è studiata per costituire un archivio di modelli 3D con informazioni semantiche associate

6. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

Il lavoro riporta un'indagine sullo stato dell'arte nel campo delle ontologie spaziali per possibili applicazioni nel dominio urbano, con lo scopo di analizzare la letteratura passata ed esistente al fine di pianificare gli studi futuri.
L'obiettivo è stato quello di fornire una panoramica delle classificazioni, metodologie e possibili campi di applicazione in cui le ontologie potrebbero essere adottate per risolvere problemi di interoperabilità semantica e per lo scambio di informazioni. I problemi di interazione tra informazioni diverse e complementari nel settore del patrimonio urbano, costruito e culturale possono quindi trovare supporto nella definizione di sistemi digitali grazie allo sviluppo di rappresentazioni formali e concettuali quali le ontologie. Esse possono consentire il controllo digitale delle informazioni e sono utili per condividere informazioni tra cittadini, scienziati, ricercatori, responsabili politici e altre parti interessate. Nonostante vi siamo numerosi esempi di ontologie geografiche e spaziali applicate al territorio e al patrimonio costruito, la ricognizione qui riportata evidenzia la mancanza di una struttura comune che incorpori le diverse definizioni e rappresentazioni del patrimonio costruito a diverse scale e comprendente informazioni proprie di diverse comunità e campi applicativi.
Questo studio quindi, evidenziando alcuni punti critici o evidenti gap da colmare, getta le basi per un possibile sviluppo di ontologie di dominio o applicative per la valorizzazione, gestione, documentazione del patrimonio architettonico e urbano. L'armonizzazione e l'integrazione degli esempi e delle conoscenze esistenti, sopra presentate, possono infatti essere utilizzate come punto di partenza per una nuova concettualizzazione e formalizzazione semantica.
Inoltre, nell'attuale scenario caratterizzato da un'ampia disponibilità di dati spaziali 2D e 3D derivati e interrelati all'innovazione tecnologica, le ontologie di dominio potrebbero supportare diversi processi, come l'estrazione automatica di informazioni utili, il riconoscimento di edifici storici all'interno di nuclei urbani, la segmentazione automatica di elementi significativi, l'identificazione di parti di edifici e città e così via.
Ancora, nel campo dell'intelligenza artificiale l'utilizzo di ontologie potrebbe supportare metodologie *machine learning* o *deep learning* aiutando a definire e identificare classi di oggetti tramite l'uso di regole semantiche predefinite
Concludendo, questo contributo rappresenta una fase preliminare di una ricerca che mira a comprendere quanto già esiste nel campo delle ontologie geo-spaziali per il patrimonio edilizio e urbano, con il fine di valutare il riutilizzo delle conoscenze precedenti per ovviamente progettare e strutturare nuove formalizzazioni. Grazie alla ricognizione delle metodologie applicabili nell'area del web semantico sarà possibile scegliere

[5] https://www.inception-project.eu/en

l'approccio più adatto per l'adattamento o lo sviluppo di una struttura ontologica destinata alla definizione del dominio degli edifici e del loro contesto per lo sviluppo di diverse attività di interesse culturale e urbano.

Riferimenti

Acierno, M., Cursi, S., Simeone, D., & Fiorani, D. (2017). Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. Journal of Cultural Heritage, 24, 124–133. https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.09.010

Acierno, M. (2019). Ontologie per i Centri Storici. In Fiorani, D. (2019). Il futuro dei centri storici. Digitalizzazione e strategia conservativa.

An, Y., Borgida, A., & Mylopoulos, J. (2005). Inferring complex semantic mappings between relational tables and ontologies from simple correspondences. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 3761 LNCS, 1152–1169. https://doi.org/10.1007/11575801_15

Berdier, C., & Roussey, C. (2007). Urban ontologies: The towntology prototype towards case studies. Studies in Computational Intelligence, 61, 143–155. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71976-2_13

Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018). CityGML application domain extension (ADE): overview of developments. Open Geospatial Data, Software and Standards, 3(1), 13.

Blaško, M., Cacciotti, R., Křemen, P., Kouba, Z. (2012). Monument damage ontology. Progress in Cultural Heritage Preservation. Springer Berlin Heidelberg. pp. 221-230.

Borst, W. (1997). Construction of Engineering Ontologies. In Centre of Telematica and Information Technology, …. Retrieved from http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:CONSTRUCTION+OF+ENGINEERING+ONTOLOGIES#1

Bonsma P. et al. (2016) INCEPTION Standard for Heritage BIM Models. In: Ioannides M. et al. (eds) Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. EuroMed 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 10058. Springer, Cham

Cacciotti, R., Valach, J., Kuneš, P., Čerňansky, M., Blaško, M., řemen, P. (2013). Monument damage Information System (MONDIS), An Ontological Approach to Cultural Heritage Documentation. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(5), pp.55-60.

Chaves, M. S., Rodrigues, C., & Silva, M. (2007). Data model for geographic ontologies generation. XML: Aplicações e Tecnologias Associadas (XATA 2007), 47–58.

Colucci, E, Kokla, M., Mostafavi, M.A., Noardo, F., Spano, A., 2020. Semantically Describing Urban Historical Buildings Across Different Levels Of Granularity. IN PRESS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives.

Doerr M. (2002). The CIDOC CRM: an ontological approach to semantic interoperability of metadata. AI Magazine, Special Issue, 24(3), pp. 75-92.

Doerr, M., Ore, C.-E., & Stead, S. (2007). The CIDOC Conceptual Reference Model - A New Standard for Knowledge Sharing ER2007 Tutorial. Tutorials, Posters, Panels and Industrial Contributions at the 26th International Conference on Conceptual Modeling - Volume 83, 83(Er), 51–56. Retrieved from http://dl.acm.org.acm.han.bg.pg.edu.pl/citation.cfm?id=1386963&CFID=742484481&CFTOKEN=46790097

Doerr M., G. Hiebel, O. Eide, (2013). CRMgeo: Linking the CIDOC CRM to geoSPARQL through a Spatiotemporal Refinement. Tech. Rep. GR70013, Institute of Computer Science, 2013.

Doerr, M., Felicetti, A., Hermon, S., Hiebel, G., Kritsotaki, A., Masur, A., May, K., Ronzino, P., Schmidle, W., Theodoridou, M., Tsiafaki, D., Christaki, E., (2020). Definition of the CRMarchaeo. An Extension of CIDOC CRM to support the archaeological excavation process, version 1.5.0.

Doerr, M., Kritsotaki, A., Rousakis, Y., Hiebel, G., Theodoridou, M., (2018). Definition of the CRMsci. An Extension of CIDOCCRM to support scientific observation, version 1.2.5.

Egusquiza, A., Prieto, I., Izkara, J. L., Béjar, R. (2018). Multiscale urban data models for early-stage suitability assessment of energy conservation measures in historic urban areas. 87-98.

Falquet, G., Mètral, C., Teller, J., & Tweed, C. (2011). Ontologies in Urban Devopment Projects. In Springer. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Fiorani, D, (2019). Il futuro dei centri storici. Digitalizzazione e strategia conservativa, Percorsi. Città e architettura nel tempo, Qasar, 9788871409252.

Fonseca, F., Egenhofer, M., Davis, C., Borges, K., (2000). Ontologies and knowledge sharing in Urban GIS. Comput. Environ. Urban. Syst. 24(3), 232–251

Fonseca, F., Egenhofer, M., Davis, C., & Câmara, G. (2002). Semantic granularity in ontology-driven geographic information systems. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 36(1–2), 121–151. https://doi.org/10.1023/A:1015808104769

Fonseca, F., Davis, C., & Camara, G. (2003). Bridging Ontologies and Conceptual Schemas in Geographic Applications Development. Geoinformatica, 7(4), 355–378.

Fonseca, F., Câmara, G., Monteiro, A.M., (2006). A framework for measuring the interoperability of geo-ontologies. Spat. Cogn. Comput 6(4), 307–329

Fonseca, F., (2007). The double role of ontologies in information science research. J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol. 58(6), 786–793

Gandon, F., (2002). Distributed artificial intelligence and knowledge management: Ontologies and multiagent systems for a corporate semantic web. Scientific Philosopher Doctorate Thesis in Informatics, Defended Thursday the 7th of November 2002, INRIA and University of Nice - Sophia Antipolis, Doctoral School of Sciences and Technologies of Information and Communication

Geneşereth, M. R. & Nilsson, N. J. (1987). Logical Foundations of Artificial Intelligence. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.

Gómez-Pérez, A. (2004). Ontology evaluation. In Handbook on ontologies (pp. 251-273). Springer, Berlin, Heidelberg.

Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, pp. 199–220. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008

Gruber, T. 2004. Every Ontology Is a Treaty. Interview at http://www.sigsemis.org from Miltiadis Lytras on 2004-11-22. Available at: http://lists.w3.org/Archives/Public/www-annotation/2004JulDec/0032.html

Gruber, T. (2004). Every Ontology Is a Treaty. Interview at Http://Www.Sigsemis.Org from Miltiadis Lytras on 2004-11-22., 1(3), 1–5. Retrieved from ttp://lists.w3.org/Archives/Public/www-annotation/2004JulDec/0032.html

Guarino, N., & Giaretta, P. (1995). Ontologies and Knowledge Bases: Towards a Terminological Clarification. Towards Very Large Knowledge Bases. Knowledge Building and Knowledge Sharing, 1(9), 25–32. https://doi.org/10.1006/ijhc.1995.1066

Guarino, N., (1998). Formal ontology in information systems: Proceedings of the first international conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy. In Frontiers in Artificial Intelligence and Applications; Guarino, N., Ed.; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 1998; pp. 3–15, ISBN 978-90-5199-399-8.

Guarino, N., & Musen M.A. (2005). Applied Ontology: Focusing on Content, Applied ontology 1(1):1-5.

Guarino, N., Oberle, D., & Staab, S. (2009). What Is Ontology? Handbook on Ontologies, International Handbooks on Information Systems, 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3

C.H. Hwang and L.K. Schubert, EL: a representation that lets you say it all. In: Proceedings of the International Workshop on Formal Ontology: Conceptual Analysis and Knowledge Representation, Padova, Italy, 1993, pp. 277–290.

Hiebel, G., Doerr, M., Eide, O., & Theodoridou, M. (2015). CRMgeo: a Spatiotemporal Model. An Extension of CIDOC CRM to link the CIDOC CRM to GeoSPARQL through a Spatiotemporal Refinement. Proposal for approval by CIDOC CRM-SIG, version 1.2

Hois, J., Bhatt, M., & Kutz, O. (2009). Modular ontologies for architectural design. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 198(1), 66–77. https://doi.org/10.3233/978-1-60750-047-6-66

Kokla, M., Kavouras, M., (2002). Extracting latent semantic relations from definitions to disambiguate geographic ontologies. In: GIScience 2002 Abstracts, Second International Conference on Geographic Information Science. Boulder, CO, pp. 87–90.

Kavouras, M., Kokla, M., & Tomai, E. (2005). Comparing categories among geographic ontologies. Computers and Geosciences, 31(2), 145–154. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.07.010

Kokla, M., Mostafavi, M. A., Noardo, F., & Spanò, A. (2019). Towards building a semantic formalization of (small) historical centres. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W11(2/W11), 675–683. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-675-2019

Kokla, Margarita, & Guilbert, E. (2020). A review of geospatial semantic information modeling and elicitation approaches. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(3). https://doi.org/10.3390/ijgi9030146

Kokla, M., Papadias, V., & Tomai, E. (2018). Enrichment and population of a geospatial ontology for semantic information extraction. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(4), 379–382. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-309-2018

Lassila, O., & McGuinness, D. (2001). The role of frame-based representation on the semantic web. Linköping Electronic Articles in Computer and Information Science, 6(5), 2001.

Laurini, R., & Thompson, D. (1992). Fundamentals of spatial information systems (Vol. 37). Academic press.

Laurini, R., Servigne, S. (2011). Potentialité du géoweb. L'Espace géographique, (2), pp. 109-116.
Lutz, M., Klien, E., (2006). Ontology-based retrieval of geographic information. IJGIS 20(3), 233–260

Lenat, D. B. (1995). CYC: A large-scale investment in knowledge infrastructure. Communications of the ACM, 38(11), 33-38.

McGuinness, D. L., Fikes, R., Rice, J., & Wilder, S. (2000). The chimaera ontology environment. AAAI/IAAI, 2000, 1123-1124.

Messaoudi, T., De Luca, L., & Véron, P. (2015). Towards an ontology for annotating degradation phenomena. 2015 Digital Heritage International Congress, Digital Heritage 2015, 379–382. https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419528

Nagel, C., Stadler, A. and Kolbe, T.H. (2009), Conceptual Requirements for the Automatic Reconstruction of Building Information Models from Uninterpreted 3d Models, in T.H. Kolbe, H. Zhang and S. Zlatanova (eds.), Academic Track of Geoweb 2009: Cityscapes, ISPRS, 46-53.

Nebert, D. D. (2004). The SDI Cookbook–Developing Spatial Data Infrastructures. Global Spatial Data Infrastructure Association, 2.

Noy, N. F., & McGuinness, D. L. (2001). Ontology development 101: A guide to creating your first ontology.

Pauwels, P.; Zhang, S.; Lee, Y.-C. (2017), Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview, Automation in Construction, 73, 145-165, doi: 10.1016/j.autcon.2016.10.003.

Ronzino, P., Niccolucci, F., Felicetti, A., Doerr, M., (2016). Definition of the CRMba. An extension of CIDOC CRM to support buildings archaeology documentation, version 1.4, December 2016 Sharing, IJCAI-95, Montreal.

Smith, B. (2003). Ontology. 166, 155–166.

Studer, R., Benjamins, V. R., & Fensel, D. (1998). Knowledge Engineering: Principles and methods. Data and Knowledge Engineering, 25(1–2), 161–197. https://doi.org/10.1016/S0169-023X(97)00056-6

Stouffs R., Tauscher H., Biljecki F., (2018) Achieving Complete and Near-Lossless Conversion from IFC to CityGML, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2018, 7, 355; doi:10.3390/ijgi7090355.

Sure, Y., Akkermans, H., Broekstra, J., Davies, J., Ding, Y., Duke, A., ... & Kampman, A. (2003). On-To-Knowledge: Semantic Web-Enabled Knowledge Management. In Web intelligence (pp. 277-300). Springer, Berlin, Heidelberg.

Yeung, A. K., & Hall, G. B. (2007). Spatial database systems: Design, implementation and project management (Vol. 87). Springer Science & Business Media.

Yang X , Lu Y C, Murtiyoso A, Koehl M, Grussenmeyer P, (2019) HBIM Modeling from the Surface Mesh and Its Extended Capability of Knowledge Representation, ISPRS Int. J. Geo-Inf., 8, 301; doi:10.3390/ijgi8070301

Teller, J., Lee, J. R., & Roussey, C. (Eds.). (2007). Ontologies for urban development (Vol. 61). Springer.

Tait, M., & While, A. (2009). Ontology and the conservation of built heritage. Environment and Planning D: Society and Space, 27(4), 721-737.

Tomai, E., & Kavouras, M. (2004). From "Onto-GeoNoesis" to "Onto-Genesis": The design of geographic ontologies. GeoInformatica, 8(3), 285–302. https://doi.org/10.1023/B:GEIN.0000034822.47211.4a

Tomai, E., & Kavouras, M. (2005). Context in Geographic Knowledge Representation. How the notion of formalized context can be incorporated into a geographic ontology. Proceedings of the II International Conference & Exhibition on Geographic

Tomai, E., & Spanaki, M. (2005). From ontology design to ontology implementation: A web tool for building geographic ontologies. Proceeding of AGILE 2005. Retrieved from http://www.agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2005/papers/72_Eleni Tomai.pdf