

# Uma ontologia de aplicação para descrição de indicadores de poluição do meio ambiente

Ricardo M. Taques<sup>1</sup>, Cesar A. Tacla<sup>1,2</sup>, Mateus G. Belizario<sup>2</sup>, Rita C. Berardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)

<sup>2</sup>Departamento de Informática (DAINF)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

CEP 80.230-901 – Curitiba – PR – Brazil

{rtaques, mateusbelizario}@alunos.utfpr.edu.br, {tacla, ritaberardi}@utfpr.edu.br

**Abstract.** *Several projects have been developed with the aim to represent indicators for the environmental pollution following definitions of ISO 37120. The objective of these standards is to allow the comparison of indicators in different domains regarding the Smart Cities concepts. This paper proposes new constructs that extend ontologies derived from ISO 37120 to allow the description of indicators and indexes in a more refined way and under particular perspectives dictated by the needs of the end user. Indicators and indexes therefore, define visions about measurements of pollutants collected by sensing stations.*

**Resumo.** *Diversos projetos têm sido desenvolvidos com o intuito de representar indicadores de poluição ambiental seguindo definições da norma ISO 37120. O objetivo desta norma é permitir a comparação de indicadores em diferentes domínios relacionados ao conceito de Cidades Inteligentes. Este artigo propõe novos construtos que estendem ontologias derivadas da ISO 37120 para permitir a descrição de indicadores e índices de modo mais refinado e de perspectivas particulares ditadas pelas necessidades do usuário final. Indicadores e índices definem, portanto, visões sobre medições de agentes poluentes coletadas por estações de sensoriamento.*

## 1. Introdução

Com a consolidação de ontologias que permitem a representação de grande parte dos conceitos e propriedades envolvidos no contexto do monitoramento do meio ambiente, diversas ontologias têm surgido tais como: Semantic Sensor Network (SSN)<sup>1</sup>; Environment, Pollution, GCI-Foundation<sup>2</sup> entre outras. O nível de abstração destas ontologias é variável. A SSN representa informações em um nível menos abstrato, abrangendo os conceitos de sensores, observadores e medições. As demais possuem nível de abstração mais alto, abrangendo termos e relações sobre o meio ambiente que seguem as normas e padrões da [ISO37120 2018]<sup>3</sup> que trata de índices e indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida.

<sup>1</sup>Desenvolvida pela World Wide Web Consortium (W3C)

<sup>2</sup>GCI - Global City Indicators

<sup>3</sup>International Standards for City Indicators

Índices e indicadores são dois conceitos centrais das ontologias de maior nível de abstração. Conceitualmente, um indicador é um dado qualitativo, quantitativo ou uma medição descritiva. Os indicadores agregam medições por meio de operações sobre as medições de poluentes, salvaguardando informações de proveniência (qual estação/sensor fez a medição, quem fez sua publicação) e temporais (data/hora de referência do indicador). Um índice pode ser considerado equivalente a um indicador, contudo, de acordo com [Siche et al. 2007], um índice é um valor agregado final de todo um procedimento de cálculo onde se utilizam inclusive, os indicadores. Além disso, um índice pode se tornar um instrumento para tomada de decisão ou para a previsão de um evento. Por conseguinte, pode-se concluir que um indicador antecede um índice porque este último é formado por um ou mais indicadores.

Embora as ontologias de maior nível de abstração citadas permitam a representação de índices/indicadores, observou-se que não são adequadas para representar informações tais como o pior índice de poluição dentre os indicadores de poluentes em um determinado intervalo de tempo ou, genericamente, para representar a derivação de um índice a partir de um conjunto de indicadores. As representações destas derivações são feitas normalmente na forma textual em comentários.

Foi a partir desta constatação que se propôs estender as ontologias utilizadas no domínio da poluição do ar para que índices e indicadores sejam descritos de forma mais refinada. O intuito é facilitar a construção de aplicações que necessitam criar ou utilizar índices/indicadores distintos daqueles pré-definidos na ISO 37120. Esta extensão se baseia em construtos que permitem representar um índice a partir de fórmulas que agregam medições por meio de operadores que atuam sobre indicadores, tais como, média, mínimo e máximo, além de categorizações de índices em classes definidas por partições de valores (ex. ruim, regular, bom), o que é uma prática comum na definição de índices ambientais.

O conteúdo deste artigo segue com a seção de trabalhos correlatos apresentando como seus autores descrevem seus indicadores. Na seção 3, é apresentada a modelagem para criação de índices e indicadores para uma ontologia de domínio que estende os trabalhos existentes com base no índice da agência ambiental dos EUA. Na seção 4 apresenta-se um estudo de caso onde se aplicam os construtos propostos para a geração do índice IMECA<sup>4</sup> utilizado no México. Por fim, as conclusões sobre os resultados alcançados e as possibilidades para trabalhos futuros são comentados na seção 5.

## 2. Trabalhos Correlatos

Esta seção apresenta trabalhos que relatam necessidades similares de se trabalhar com índices/indicadores, e proposições de como devem ser formados. Em seu projeto para desenvolvimento de indicadores de performance com uso de um *data warehouse* descrito por [Niedritis et al. 2011], os autores propõem que um indicador para análise de desempenho de organizações seja avaliado pelos seguintes aspectos: definição, análise, medição, reação e aprimoramento. Dentre estes grupos, as propriedades pertinentes ao objetivo do presente trabalho trazem informações sobre: tempo (quando aconteceu), frequência, proveniência (quem é responsável) e como representar um indicador.

Considerando o uso de ontologias, no estudo sobre um sistema de representação

---

<sup>4</sup>Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

para indicadores de qualidade sobre medições de serviços médicos, [Takaki et al. 2013] pontuam que um indicador de qualidade deve ser gerado por uma fórmula que utilize dados atrelados aos fatos envolvidos em sua formação. Também fazendo uso de ontologias, [Fox 2015] em seu trabalho, reforça a importância das medições para a formação de indicadores. Segundo ele, medições são conceitos sob os quais se agregam os valores que representam as quantidades e as unidades de medida que as qualificam.

Em seu projeto são propostos padrões para definição de indicadores que tem como referência as especificações descritas pela [ISO37120 2018], na qual estão contidos mais de 100 indicadores urbanos para que as cidades possam medir e comparar seus desempenhos em temas importantes como: educação, saúde, segurança, meio ambiente, etc.

Para Fox, os aspectos que devem ser representados quando se trabalha com indicadores, são: localização, quantidade e unidade de medida adotada, o provedor dos dados gerados, quando o valor gerado pelo indicador é válido, o grau de confiança do indicador e da entidade ou indivíduo responsável por sua produção. Em sua modelagem, encontram-se conceitos derivados de outras ontologias que permitem descrever observações e medições (om-1.6.owl<sup>5</sup>), tempo ao qual se referem (time.owl)<sup>6</sup>, e a proveniência e a confiabilidade das mesmas (prov.owl<sup>7</sup> e kp.owl<sup>8</sup>).

Da sua abordagem, originou-se a ontologia GCI (*Global City Indicators*) e a sua interação com as demais ontologias da ISO 37120 são mostradas na figura 1. As camadas desta representação têm o seguinte significado: posicionados na camada superior há os IRIs<sup>9</sup> de cada indicador da ISO 37120, na camada logo abaixo estão ontologias que sustentam cada um dos domínios correspondentes aos indicadores desta ISO e, por fim, as duas camadas inferiores representam os conceitos das ontologias fundacionais que foram incorporados na ontologia GCI para lhe prover as definições sobre tempo, medições, proveniência, confiabilidade, validade e geolocalização.

Na modelagem proposta em [Freitas et al. 2016], são listadas quais informações se deve conhecer sobre um indicador para facilitar sua compreensão e comparação. Para os autores, deve ser informada qual entidade está interessada no indicador, com quais variáveis ele se relaciona, além da sua descrição e valor. E mais, devem ser listados quais tipos de critérios podem avaliá-lo, que fórmula permite calcular seu valor, que atributos o compõem, a que momento se refere e finalmente, quais relações com outros indicadores devem ser conhecidas. Na tabela 1, pode-se ver um comparativo dos aspectos e propriedades principais propostos nos trabalhos citados para a criação de indicadores.

Como poderá ser visto neste artigo, boa parte destas recomendações são adotadas, entretanto, tanto nos conceitos descritos, que se baseiam na referida ISO, ou em conceitos relacionados aos critérios, ainda existem lacunas para explorar outras abordagens. É o caso da ausência do uso de propriedades com operadores como média, mínimo e máximo que não são utilizados nos trabalhos correlatos.

---

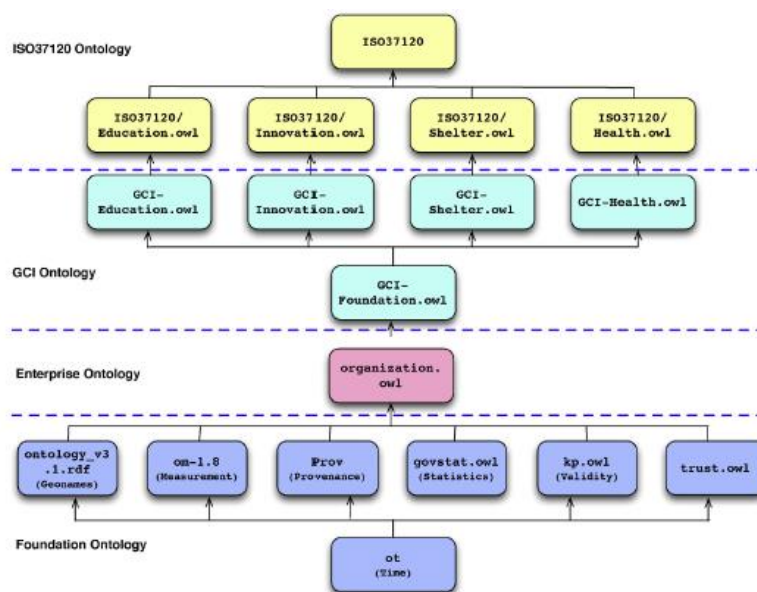
<sup>5</sup><https://www.wurvoc.org/vocabularies/om-1.6/> (não está mais disponível)

<sup>6</sup><https://www.w3.org/TR/owl-time/>

<sup>7</sup><https://www.w3.org/TR/prov-o/>

<sup>8</sup><http://ontology.eil.utoronto.ca/>

<sup>9</sup>Internationalized Resource Identifier



**Figura 1. ISO 37120 Ontology Modules**

Fonte: *The role of ontologies in publishing and analyzing city indicators.* [Fox 2015]

### 3. Ontologia Proposta: AirQualityOnto (AQ)

Dada a existência de ontologias fundacionais sobre o meio ambiente e, considerando que seus conceitos e relações estão fortemente baseados na ISO 37120, propõe-se uma abordagem que traz construtos com maior refinamento. Deste modo, a ontologia AirQualityOnto (AQ) estende estas ontologias que a sustentam com foco na poluição do ar que trata dos agentes mais frequentes (ex. CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>)<sup>10</sup>. A extensão inclui construtos que permitem definir indicadores, enquadrá-los em suas faixas de concentração e, identificar seu índice de qualidade mapeando o resultado derivado dos indicadores nas faixas de classificação. A seguir, apresentam-se as etapas de desenvolvimento da ontologia bem como os construtos propostos por meio de padrões de modelagem.

#### 3.1. Escopo e Questões de Competência

A ontologia destina-se a descrever medições, indicadores e índices para que suas definições sejam interpretáveis por uma aplicação, isto é, para guiar a aplicação a obter as medições, calcular os indicadores e índices, sejam eles fornecidos previamente ao usuário final ou por ele construídos. Não faz parte do escopo, a definição de construtos para representar as instâncias resultantes dos cálculos de índices e indicadores. Por exemplo, a ontologia não é destinada a representar o valor do indicador de O<sub>3</sub> obtido pela média de medições coletadas entre 0h e 8h de um dia qualquer de uma dada estação ambiental. Tampouco o valor do índice resultante de vários indicadores medidos na mesma janela temporal. Portanto, as definições de índices e indicadores permitem construir visões sobre coleções de medições ficando o cálculo e armazenamento dos mesmos, se desejado for, a cargo da aplicação.

Após uma análise sobre índices de qualidade do ar, observou-se que as definições

<sup>10</sup>Pela ordem: Monóxido de Carbono, Dióxido de Nitrogênio, Dióxido de Enxofre, Ozônio, Partículas Suspensas menores que 10 micrômetros e menores que 2.5 micrômetros

**Tabela 1. Comparativo das informações utilizadas na descrição de um indicador.**

Fonte	Aspecto	Propriedade	Descrição
Niedritis et al. 2011	Definição	Orientação temporal	Quando aconteceu
	Medição	Frequência	Taxa de ocorrência por unidade temporal
	Análise	Responsável	Proveniência e Confiabilidade
Representação		Como é formulado	
Takaki et al. 2013	Medição	Orientação temporal	Desde quando ocorre um fenômeno
		Valor	Intensidade em relação à uma escala
	Proveniência	Responsável	Proveniência da informação
Fox 2015	Geolocalização	Localização	Onde aconteceu
	Confiabilidade	Responsável	Proveniência e Confiabilidade
	Medição	Unidade de medida	Unidade de medida
		Quantidade/Valor	Intensidade em relação à uma escala
Tempo	Orientação temporal	Quando aconteceu	
Freitas et al. 2016	Destinação	Entidade	A quem se destina
	Definição	Orientação temporal	Quando aconteceu
		Representação	Como é formulado
		Valor	Intensidade em relação à uma escala
Composição	Como é composto		

dos índices<sup>11</sup> estudados: AQI [Mintz 2016], IMECA - México [MexicoCity 2006], DAQI (UK) e Instituto Ambiental do Paraná (IAP) são baseadas em fórmulas que envolvem categorias com faixas de valores e indicadores. Por sua vez, os indicadores são obtidos geralmente a partir de operações de média, valor mínimo ou máximo aplicadas sobre as medições coletadas em uma janela temporal. Além disto, observou-se que alguns indicadores, não todos, são categorizados por faixas de valores assim como os índices.

Por exemplo, na figura 2, o índice de qualidade do ar definido pela agência dos EUA, é calculado a partir de uma fórmula que normaliza o valor de um indicador C em uma faixa de categorização. Um índice possui uma faixa de valores para cada categoria (ex. *good* :[0,50], *moderate* :[51,100]). O indicador C, cujo valor deriva de medições de um poluente obtidas em uma janela temporal, também possui faixas de categorização definidas por intervalos [C<sub>low</sub>, C<sub>high</sub>]. Para o indicador do poluente O<sub>3</sub>, a categoria *good* é aplicada em concentrações na faixa [0,54]ppb<sup>12</sup> e a *moderate*, [55,70]ppb. Supondo que, no período de 8h, a média de concentração de O<sub>3</sub> foi 60ppb (moderada). Neste caso, I é calculado por (100-51)/(70-55)\*(60-55)+51=67,333. Se há vários indicadores C para uma localidade, o índice final de qualidade do ar é dado pelo pior I dentre os calculados.

$$I = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} (C - C_{low}) + I_{low}$$

**Figura 2. Fórmula do índice AQI**

Fonte: *Technical Assistance Doct for Reporting of Daily AQI. U.S. EPA, 2016.*

A partir da análise dos índices AQI, IMECA, DAQI e também do IAP, foram

<sup>11</sup> AQI - Air Quality Index (EPA); DAQI - Daily Air Quality Index (UK)

<sup>12</sup>ppb - partículas por bilhão

estabelecidas as seguintes questões de competência:

- Como um indicador é derivado a partir de um conjunto de medições?
- Como categorizar o indicador de um poluente?
- Como representar uma fórmula de cálculo de um índice/indicador?
- Como categorizar um índice derivado do cálculo de uma fórmula?

### 3.2. Reúso

Foram adotadas algumas ontologias consideradas *top – level* porque seus modelos trazem conceitos e propriedades bem fundamentados para uso por outras ontologias. As ontologias incorporadas pela AQ são: time.owl (OT), ssn.owl (SE) e prov-o.owl (PR) desenvolvidas pela W3C, além de conteúdo das versões da om.owl (OM) criadas pela wurvoc.org<sup>13</sup>, da environment.owl (EV) e da pollution.owl (PL) desenvolvidas no âmbito do projeto da GCI. As siglas são utilizadas como prefixos para identificação da ontologia de origem nas extensões propostas neste artigo.

### 3.3. Construtos Propostos

A classe medição (AQ\_Measurement) é a responsável por descrever os dados provenientes da captura de dados, sejam eles oriundos de uma rede de sensores geograficamente distribuídos ou tenham sido eles tratados por uma camada de ETL<sup>14</sup>. Na figura 3, ilustra-se a classe AQ\_Measurement através da sintaxe Manchester<sup>15</sup> [Horridge et al. 2006]. Intuitivamente, uma medição representa o quê (poluente), quando e como uma medição foi gerada. Para isso, as propriedades associadas à esta classe, são:

- aq:hasMeasurementOf: conecta a medição ao poluente representado pela classe PL:Air\_pollutant;
- om:value: relaciona a medição à quantidade e à unidade de medida da medição. Esta propriedade é derivada das ontologias prov.owl e om.owl;
- aq:takesPlaceAt: relaciona a medição ao dispositivo onde a mesma foi coletada, representado pela classe AQ:Station;
- aq:wasAttributedTo: relaciona a medição à classe PR:Agent para identificar a proveniência da medição, isto é, quem é responsável pelas estações de coleta deste dado;
- aq:hasHappenedOn: é o momento da geração da medição descrito por um tipo de dados integrado da linguagem OWL-DL<sup>16</sup>, i.e., dateTime.

```
Class: aq:AQ_Measurement
SubClassOf:
    aq:hasMeasurementOf exactly 1 pl:Air_pollutant,
    om:value exactly 1 om:Measure,
    aq:takesPlaceAt exactly 1 aq:Station,
    pr:wasAttributedTo exactly 1 pr:Agent,
    aq:hasHappenedOn exactly 1 xsd:dateTime
```

Figura 3. Classe AQ\_Measurement e suas propriedades.

A classe AQ\_UserIndicator (Figura 4) descreve o valor de concentração de um poluente a partir de várias medições por meio da forma de derivação e da periodicidade.

<sup>13</sup>A URL wurvoc.org não está mais disponível

<sup>14</sup>ETL - Extract, Transform and Load

<sup>15</sup>The Manchester OWL Syntax é uma derivação da linguagem OWL, mais fácil de ser lida e escrita.

<sup>16</sup>OWL-DL - Web Ontology Language - Description Logics.

Além disso, relaciona o indicador às suas categorias. Para cada novo indicador, uma instância deve ser criada:

- aq:isIndicatorFor: conecta um determinado indicador ao poluente desejado;
- aq:hasPeriodicity: identifica a periodicidade na qual a concentração foi calculada;
- aq:isDerivedBy: identifica a forma de derivação do indicador a ser aplicada sobre instâncias de AQ\_Measurement. As instâncias da classe aq:DerivationForms são operações (ex. média, mínimo, máximo, pior, melhor). A interpretação final destas operações é dada pelo programa que as implementa;
- aq:isCategorizedBy: relaciona o indicador a uma ou mais categorias de emissão que são subclasses de AQ\_Categorizations.

```

Class: aq:AQ_UserIndicator
SubClassOf:
  aq:isIndicatorFor exactly 1 aq:Pollutant,
  aq:hasPeriodicity exactly 1 aq:DurationDescription,
  aq:isDerivedBy exactly 1 aq:DerivationForms,
  aq:isCategorizedBy some aq:AQ_Categorizations
  
```

**Figura 4. Classe AQ\_UserIndicator e suas propriedades.**

Para definir a categorização de um indicador, deve-se criar <categorização> como subclasse de AQ\_Categorizations conforme padrão ilustrado na figura 5. Uma <categorização> é definida pela união de suas subclasses que, por sua vez, são disjuntas entre si. Cada <categoria>i é uma subclasse de <categorização> e possui uma faixa de valores dada pelos limites inferior e superior. Para exemplificar, retoma-se o indicador do poluente O3 em um extrato de suas faixas: good [0,54]  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>17</sup> e moderate [55,70]  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Neste caso <categorização> = O3\_categorization com <categoria>1 = good e <categoria>2 = moderate. Uma instância de cada categoria deve ser criada para se definir concretamente os limites inferior e superior por meio das propriedades aq:hasLowerLimit e aq:hasUpperLimit herdadas de AQ\_Categorizations.

```

Class: AQ_Categorizations
SubclassOf:
  aq:hasLowerLimit exactly 1 xsd:decimal
  aq:hasUpperLimit exactly 1 xsd:decimal
DisjointUnionOf:
  aq:IndexCategorization, aq:IndicatorCategorization

Class: <categorização>
SubClassOf:
  aq:IndicatorCategorization
DisjointUnionOf:
  <categoria>1 or .. or <categoria>n

Class: <categoria>i
SubClassOf:
  <categorização>
  
```

**Figura 5. Padrão para definir categorizações de indicadores.**

A classe AQ\_Index descreve um índice. Recorda-se que um índice possui uma categorização e possui várias fórmulas - normalmente, para cada categoria do índice, há *n* fórmulas, sendo *n* igual ao número de indicadores. Uma categorização de um índice é definida de forma idêntica ao padrão de categorização de um indicador, exceto que é

<sup>17</sup>  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - microgramas por metro cúbico (unidade de densidade de massa)

definida como subclasse de `aq:IndexCategorization`. A figura 6 mostra a classe `AQ_Index`, e o padrão para categorização de índices.

A classe `aq:IndicatorToIndexFormula` relaciona uma categoria de um indicador com uma categoria do índice por meio de uma fórmula. Logo, índices e indicadores se relacionam por meio de instâncias desta classe. Observar que uma fórmula é definida de forma indicativa pelo uso de um *String* como apresenta a figura 7 e, deve ser definida de acordo com uma gramática e a semântica é dada pela implementação da aplicação.

```

Class: aq:AQ_Index
SubClassOf:
  aq:isDerivedBy exactly 1 aq:DerivationForms,
  aq:isCategorizedBy some aq:IndexCategorization

Class: <categoriação_indice>
Equivalent to:
  <categoria>1 or ... or <categoria>n
SubclassOf:
  aq:IndexCategorization

Class: <categoria>
SubClassOf:
  <categoriação_indice>

```

**Figura 6. Classe `AQ_Index` e o padrão para definir categorizações de índices.**

```

Class: aq:IndicatorToIndexFormula
SubClassOf:
  AQ_makesRefTo exactly 1 IndexCategorization,
  AQ_makesRefTo exactly 1 IndicatorCategorization,
  AQ_hasFormula exactly 1 xsd:string

```

**Figura 7. Classe `aq:IndicatorToIndexFormula` e suas propriedades.**

#### 4. Estudo de Caso

Para avaliar o uso da modelagem adotada na ontologia AQ, foi escolhido o índice IMECA de qualidade do ar, utilizado pelo governo da Cidade do México para realizar o controle da poluição ambiental em várias regiões do país. Neste estudo de caso, foram instanciadas medições obtidas do IAP diretamente na ontologia. O índice e indicadores aqui apresentados fornecem uma visão na perspectiva do índice IMECA que é derivado de um indicador medido para um poluente específico.

Seu valor deve ser categorizado nas faixas possíveis de emissão para selecionar a fórmula adequada. Por fim, o valor resultante do índice calculado deve ser enquadrado em uma das cinco categorias relativas ao índice propriamente dito.

Antes da descrição das fases desta prova de conceito, é importante destacar que a ontologia foi construída com a ferramenta Protégé<sup>18</sup>, e o *reasoner* utilizado para fazer as inferências foi o *HermiT*1.3.8.413. Uma aplicação em linguagem Java com *ApacheJenaframework* possibilitou a execução das funcionalidades de consultas e instanciação guiadas pela ontologia.

Primeiramente, criou-se o indicador UI-4-IMECA instanciando-se a classe `AQ_UserIndicator` conforme definida na ontologia AQ (ver Tabela 2) para incorporar o valor máximo das medições (`isDerivedBy`) em intervalos de uma hora (`hasPeriodicity`) para

<sup>18</sup>Supported by grant GM10331601 from the National Inst. of Gen. Medical Sciences



o poluente PM10 (isIndicatorFor). Suas categorias foram assim definidas: *good*(limites [0,60]), *regular*(limites [61,120]), *poor*(limites [121,220]), *bad*(limites [221,320]) e *critical*(limites [321,1000]).

**Tabela 2. Propriedades carregadas na instância da classe AQ-UserIndicator.**

AQ_UserIndicator				
indicator	hasPeriodicity	isIndicatorFor	isDerivedBy	isCategorizedBy
UI-4-IMECA	1	PM10	Maximum	-

A partir da instância UI-4-IMECA, a aplicação constrói a query em SPARQL<sup>19</sup> ilustrada na figura 8. Observa-se que algumas informações são fornecidas em tempo de execução pelo usuário, como o período em que se quer coletar medições (para a data e hora de '04/06/2018-08h00'). Outras provêm do indicador, como o poluente e a forma de derivação (MAX). As demais variáveis são deixadas livres e são atribuídas pela execução da *query*. Nos resultados demonstrados na tabela 3, pode-se ver que as medições foram realizadas pelo agente IAP e o valor máximo derivado foi 52,0 do poluente PM10, pelo sensor da estação de código 'BOQ'.

```

SELECT ?poluente (MAX(?valor) AS ?medicao ) ?station ?agent
WHERE {
  ?m aq:hasHappenedOn ?datahora .
  ?m aq:hasMeasurementOf ?poluente .
  ?m aq:wasCollectedBy ?station .
  ?m prov:wasAttributedTo ?agent .
  ?m om-1:value ?measure .
  ?measure om-11:numerical_value ?valor .
  FILTER ( ?datahora = '2018-06-04T08:00:00'^^^xsd:dateTime &&
    ?valor = aq:PM10 ) }
GROUP BY ?poluente ?station ?agent

```

**Figura 8. Propriedades do indicador derivadas da classe AQ-Measurement.**

**Tabela 3. Instâncias da classe AQ-Measurement.**

AQ_Measurement			
Poluente	Medição	Station	Agent
PM10	52,0*	BOQ	IAP-InstAmbParana
PM10	41,6	BOQ	IAP-InstAmbParana

Para consultar as categorias deste indicador que está associado ao poluente PM10, a aplicação utiliza as propriedades da classe *aq:IndicatorCategorization* herdadas de *AQ\_Categorizations*. Assim, ao se executar a consulta da figura 9, enquadra-se o valor na faixa que o contém, i.e., na categoria *good*([0,60]) como mostrado na tabela 4.

Para representar a fórmula de cálculo deste índice, a aplicação deve utilizar a propriedade *aq:hasFormula* da classe *aq:IndicatorToIndexFormula* que liga *AQ\_Index* ao *AQ\_UserIndicator*. Contudo, antes desta representação, as categorias do índice devem ser instanciadas com seus limites usando as propriedades de *AQ\_Categorization*:

<sup>19</sup>SPARQL Protocol And RDF Query Language

```

SELECT ?categ ?low ?high ?pol
WHERE { ?categ rdf:type aq:IndicatorCategorization .
        ?categ aq:hasLowerLimit ?low .
        ?categ aq:hasUpperLimit ?high .
        ?categ aq:isIndicatorFor ?pol .
FILTER ( ?low <= '52'^^^xsd:decimal && ?high >= '52'^^^xsd:decimal &&
        ?pol = aq:PM10 ) }

```

**Figura 9. Identificação da categoria de indicador.**

**Tabela 4. Limites da categoria *good* declarada na classe *IndicatorCategorization*.**

AQ_IndicatorCategorization			
Categoria	Poluente	Mínimo	Máximo
PM10-IMECA-good	PM10	0	60

aq:hasLowerLimit e aq:hasUpperLimit. Logo, suas categorias ficaram assim definidas: IMECA-good (limites [0,50]), IMECA-regular (limites [51,100]), IMECA-poor (limites [101,150]), etc. Após a definição concreta das categorias, pode-se completar as propriedades da classe de ligação, pelo uso da consulta da figura 10. Assim, se saberá qual categoria do índice que vai conter o valor do indicador em seus limites (ver Tabela 5).

```

SELECT ?categ ?low ?high
WHERE { ?categ rdf:type aq:IndexCategorization .
        ?categ aq:hasLowerLimit ?low .
        ?categ aq:hasUpperLimit ?high .
FILTER ( ?low <= '52'^^^xsd:decimal && ?high >= '52'^^^xsd:decimal ) }

```

**Figura 10. Identificação da categoria de índice.**

Após a definição das duas categorias na classe *IndicatorToIndexFormula*, deve-se declarar a fórmula equivalente. Na consulta da figura 11, pode-se ver como se recuperam as categorias definidas e a fórmula que deverá ser utilizada pela aplicação e na tabela 6 como a classe foi preenchida.

De posse dos valores das variáveis da fórmula, a aplicação pode calcular o valor do índice IMECA-Mexico. Como a fórmula é descrita por  $IMECA(PM10) = C(PM10) * 5/6$ , temos que:  $I = 52 * 5/6$ ;  $I = 43,33$ .

Ainda é preciso responder a última questão de competência proposta. Encontrar a categoria para o índice calculado na fórmula. A solução também advém de uma consulta em SPARQL (ver Figura 12). E na tabela 7 o enquadramento do valor obtido na categoria IMECA-*good* deste índice. Então, a cada novo índice criado por este método, é possível saber o nível de qualidade que o representa enquadrando seu valor em uma das categorias de *IndexCategorization*.

## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Além deste estudo de caso, foram realizados outros testes como, por exemplo, versões do índice IMECA do México com indicador do poluente O3 e com o índice AQI dos EUA. A ontologia AQ pôde expressá-los assim como visto com o índice IMECA do poluente PM10, configurando assim que esta modelagem atende o seu propósito básico.

**Tabela 5. Limites da categoria *regular* declarada na classe *IndexCategorization*.**

IndexCategorization		
Categoria	low	high
IMECA-regular	51	100

```

SELECT ?ind2IndexForm ?categ ?form
WHERE {
  ?ind2IndexForm rdf:type aq:AQ_IndicatorToIndexFormula .
  ?ind2IndexForm aq:AQ_hasFormula ?form .
  ?ind2IndexForm aq:AQ_makesRefToCategory ?categ .
FILTER ( ?ind2IndexForm = aq:UI_4_IMECA_to_IMECA_Mexico ) }

```

**Figura 11. Categorias e fórmula na classe de ligação *IndicatorToIndexFormula*.**

Pode-se concluir que a ontologia desenvolvida com construtos descritos na modelagem, permitiu a uma aplicação em Java trabalhar com suas classes principais, i.e., *AQ\_UserIndicator* e *AQ\_Index* que representam os termos alvo da pesquisa realizada: indicadores e índices para o meio ambiente.

A ontologia AQ se mostrou capaz de representar instâncias de medições e definições de indicadores de um usuário hipotético. Além disso, um índice de qualidade do ar pôde ser gerado e com o uso da propriedade *aq:makesRefTo* da classe de ligação *IndicatorToIndexFormula* foi possível fazer o enquadramento dos valores do indicador e do índice nas categorias definidas nas subclasses de *AQ\_Categorizations*.

O cálculo utilizou-se de uma fórmula descrita na classe *IndicatorToIndexFormula*. Seu resultado está de acordo com o esperado. Por fim, ao se instanciar o valor resultante do índice, o *reasoner* utilizado fez o enquadramento na categoria correta, fazendo uso da classe *IndexCategorizations*.

Apresentou-se neste trabalho uma proposta de modelagem semântica com aplicação de padrões de definição que estendem os conceitos e propriedades das ontologias fundacionais e de domínio na área do monitoramento da poluição do ar. A ontologia (AQ), além de fazer o reuso de classes e propriedades existentes, acrescentou padrões de representação e de consultas utilizando a linguagem SPARQL que foram corretamente interpretadas pelas classes de interface Jena presentes na API<sup>20</sup>, possibilitando novas formas de exploração neste campo de interesse.

Como trabalhos futuros, destacam-se: a definição de uma gramática para representar fórmulas que podem ser construídas na ontologia e a criação de um padrão para modelar uma classe que traga versatilidade na construção de indicadores que não necessitem ser categorizados previamente, assim como é utilizado pelo índice de qualidade do ar do Canadá (AQHI). Em outro âmbito, há possibilidade de acrescentar conceitos sobre agentes que poluem a água, explorando mais um aspecto relativo ao meio ambiente, que é sem dúvida uma preocupação recorrente das entidades governamentais.

<sup>20</sup>Application Programming Interface

**Tabela 6. Declarações presentes na classe IndicatorToIndexFormula.**

IndicatorToIndexFormula			
IndicToIndex	IndicatorCategory	IndexCategory	Formula
UI-4-IMECA-to-IMECA-Mexico	PM10-IMECA-good	IMECA-regular	$I = C(PM10) * (5/6)$ <i>xsd: string</i>

**Tabela 7. Categoria de IndexCategorization inferida para o índice calculado.**

IndexCategories	
Index	Category
IMECA-Mexico	IMECA-good

```

SELECT ?index ?categ
WHERE {
  ?index rdf:type aq:AQ_Index .
  ?index aq:isCategorizedBy ?categ .
  ?categ rdf:type aq:IndexCategorization .
  ?categ aq:hasLowerLimit ?low .
  ?categ aq:hasUpperLimit ?high .
FILTER ( ?low <= '43.33'^^xsd:decimal && ?high >= '43.33'^^xsd:decimal ) }

```

**Figura 12. Identificação do nível de qualidade do ar pelo valor do índice.**

## Referências

- Fox, M. S. (2015). The role of ontologies in publishing and analyzing city indicators. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54:266–279.
- Freitas, V., Uren, V., Brewster, C., and Gonçalves, A. L. (2016). Ontology for performance measurement indicators' comparison. *Digital Information and Wireless Communications (IJDWC)*, 6(2):87.
- Horridge, M., Drummond, N., Goodwin, J., Rector, A. L., Stevens, R., and Wang, H. (2006). The manchester owl syntax. In *OWLED*.
- ISO37120 (2018). *Sustainable cities and communities - Indicators for city services and quality of life*, volume 2nd Edition. International Organization for Standardization.
- MexicoCity (2006). El monitoreo de calidad del aire. *Ciudad de México*.
- Mintz, D. (2016). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality: The Air Quality Index (AQI)*. U.S. Environmental Protection Agency (US EPA).
- Niedritis, A., Niedrite, L., and Kozmina, N. (2011). Performance measurement framework with formal indicator definitions. *Springer*, 90. Perspectives in Business Informatics Research.
- Siche, R., A., F., O., E., and R., A. (2007). Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. *Ambiente & Sociedade*, X:137–148.
- Takaki, O., T., I., T., K., I., N., M., K., I., M., and H., K. (2013). Graphical representation of quality indicators based on medical service ontology. *SpringerPlus*, 2:274.