

## OBTENÇÃO DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA *FUZZY* PARA A CONDIÇÃO TOPOGRÁFICA DE UMA RODOVIA

**Gabriel Andrade Lanzaro**

**Michelle Andrade**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
Universidade de Brasília

### RESUMO

Um dos parâmetros mais importantes para o projeto geométrico de rodovias é a definição da classe de relevo. Como diversas características técnicas estão associadas a este parâmetro, como por exemplo, a largura de acostamento, a seleção equivocada de um relevo pode impactar diretamente os custos de implantação. Entretanto, não existem limites claros para o emprego das classes de relevo Plano, Ondulado ou Montanhoso, tornando a escolha essencialmente subjetiva, o que sugere a aplicação da lógica *fuzzy*, que permite a conversão de variáveis qualitativas em resultados objetivos. Assim, após a elaboração de cenários rodoviários, por meio do *software* Infracworks®, especialistas foram solicitados que classificassem cada cenário quanto ao relevo a fim de serem obtidas funções de pertinência *fuzzy* para a condição topográfica. Os resultados foram satisfatórios, confirmando o alto grau de subjetividade do processo, e podem servir de ponto de partida para outros estudos, como a concepção de sistemas especialistas.

### ABSTRACT

One of the most important parameters when designing a road is the choice of a terrain class. Since many technical characteristics are associate to it, such as shoulder width, an inappropriate terrain selection can impact the costs for implementation. However, there are no clear boundaries to the usage of a Level, Rolling or Mountainous terrain, which makes the choice essentially subjective. This suggests the use of the fuzzy logic, that allows the conversion from qualitative variables into objective results. Therefore, after the conception of roadway scenarios, by means of the software Infracworks®, experts were asked to classify each scenario in terms of terrain, so that fuzzy membership functions for terrain could be obtained. The results were satisfactory, assuring how subjective the process is, and may represent the starting point for future studies, such as the conception of expert systems.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das etapas mais importantes durante a concepção de um projeto geométrico de uma rodovia é a definição da classe de relevo a ser empregada, tendo em vista que ela norteia o estabelecimento de uma série de parâmetros a serem adotados, tais como largura de acostamento, raio mínimo e taxa de superelevação máxima (DNER, 1999). Assim, a acomodação da rodovia ao terreno em dadas circunstâncias pode resultar em maior ou menor movimentação de terras, impactando diretamente os custos de implantação (Antas *et al.*, 2010).

Entretanto, usualmente não são utilizados critérios objetivos e rígidos para estabelecer um determinado terreno como plano, ondulado ou montanhoso – classificação adotada pela AASHTO (2011) e pelo DNER (1999). Esta decisão depende sumariamente do projetista, que deve se pautar na sua experiência e na percepção da geomorfologia das áreas atingidas pelo traçado (Lee, 2013).

Dessa forma, tem prevalecido uma avaliação subjetiva, uma vez que as regiões não se mostram homogêneas, dificultando o estabelecimento de limites práticos e claros (Antas *et al.*, 2010). No Brasil, por exemplo, não existem recomendações quanto até que ponto uma rodovia pertença a uma determinada classe em termos da declividade do terreno, por exemplo.

Apesar disso, a dificuldade de selecionar uma classe de relevo em um projeto geométrico – tanto para o analista quanto para o projetista – pode trazer consequências negativas para o pro-

jeto. A escolha arbitrária, sem uma precisão clara, pode não trazer os melhores resultados possíveis em termos de custos associados (Yong-Seok *et al.*, 2011), mas também em termos da velocidade praticada pelos veículos (Sang-Youp *et al.*, 2006).

Por esse motivo, pode-se destacar que o problema da definição do relevo é regido pela subjetividade dos envolvidos, que selecionam a classe que julgarem mais apropriada a partir de percepções particulares. Este contexto sugere que a lógica *fuzzy* pode ser utilizada, pois ela viabiliza a quantificação de variáveis qualitativas, como plano, ondulado e montanhoso. Neste contexto, funções de pertinência *fuzzy* podem ser utilizadas para representar, de forma mais clara e compreensível, estas três classificações recomendadas pelo DNER (1999).

Assim, o objetivo deste trabalho é obter funções de pertinência *fuzzy* para a condição topográfica de uma rodovia, tendo como base uma consulta a especialistas que trabalhem ou tenham trabalhado com engenharia rodoviária. Ressalta-se que o emprego da lógica *fuzzy*, neste caso, não significa eliminar a subjetividade, pois esta é inerente ao processo. Tais funções de pertinência poderiam ser empregadas, sobretudo, em sistemas mais complexos, viabilizando uma tomada de decisão mais automatizada.

## 2. CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DO RELEVO

A AASHTO (2011) define, quando do estabelecimento de parâmetros necessários ao projeto geométrico de rodovias, classes de relevo, tendo em vista que a topografia influencia significativamente os alinhamentos, principalmente no que se refere ao vertical. Tal classificação também é empregada pelo DNER (1999) quando das diretrizes para a elaboração de projetos rodoviários no Brasil. Há, dessa forma, três classes:

- Plano: condição em que as distâncias de visibilidade, permitidas pela geometria, podem resultar suficientemente longas sem que para isso se tenham maiores dificuldades ou custos elevados;
- Ondulado: condição em que as declividades do terreno natural passam a exigir constantes cortes e aterros para a conformação do perfil da rodovia, com ocasionais inclinações mais acentuadas que oferecem alguma restrição ao desenvolvimento do traçado;
- Montanhoso: caracterizado por mudanças abruptas de elevações entre o terreno natural e a plataforma da rodovia, longitudinal e transversalmente, demandando frequentes cortes e aterros para conformar de maneira aceitável com a geometria.

O *Highway Capacity Manual* (HCM, 2000) estabelece uma definição em termos da velocidade de veículos pesados, mas ainda assim adotando a mesma nomenclatura da AASHTO (2011):

- Plano: veículos pesados mantêm aproximadamente a mesma velocidade de veículos de passeio, sendo que as rodovias possuem greides em geral não superiores a 2%;
- Ondulado: veículos pesados reduzem a velocidade substancialmente abaixo de veículos de passeio, mas não operam nesta velocidade por muito tempo;
- Montanhoso: veículos pesados operam com velocidade baixa por tempo significativo ou em intervalos frequentes.

Nota-se que a classificação topográfica, tanto segundo a AASHTO (2011) quanto pelo HCM (2000), não possui critérios claros e objetivos. No Brasil, contudo, a antiga norma ferroviária

estabelecia uma análise em termos da inclinação transversal: plano se igual ou inferior a 8%, ondulado entre 8% e 20% e montanhoso quando acima de 20% (Antas *et al.*, 2010).

Antas *et al.* (2010) mencionam um exemplo de outro procedimento proposto no passado. Traçava-se, em uma planta na escala 1:10.000, um círculo com raio  $r$  e somavam-se os comprimentos das curvas de nível  $l$  no interior do círculo. Admitindo-se a equidistância  $e$  entre as curvas de nível, empregava-se a equação:

$$\tan \alpha = \frac{e \sum l}{\pi r^2} \times 100 \quad (1)$$

Em que, para terrenos planos,  $\tan \alpha < 11\%$ ; para terrenos ondulados  $11\% < \tan \alpha < 33\%$  e; para terrenos montanhosos,  $\tan \alpha > 33\%$ .

Apesar de esta forma de definição da condição topográfica apresentar um caráter mais quantitativo ao relevo, são poucos os estudos recentes que tentam retirar as definições imprecisas, como a fornecida pela AASHTO (2011), e buscam obter parâmetros numéricos.

Nesse sentido, cabe destacar o estudo de Sang-Youp *et al.* (2006), os quais dividiram a Coreia do Sul em nove grandes regiões, com base em cotas e declividades, e observaram a necessidade de fazer mais subdivisões de classes de relevo para que as velocidades dos veículos fossem condizentes com o tipo de via em que trafegam. Yong-Seok *et al.* (2011) corroboraram esta afirmação, mas em termos de custos que podem ser desencadeados de uma má classificação. Para isso, eles analisaram trechos de rodovias já executadas pelo país, comparando a cota do greide com o terreno natural. Ambos os trabalhos se pautaram em uma classificação essencialmente geográfica, pois utilizaram dados georreferenciados de rodovias sul-coreanas.

Algumas localidades procuram definir padrões de classificação do relevo em termos mais numéricos, sendo algumas dessas apresentadas na Tabela 1 a seguir. A nomenclatura das classes não é uniforme, podendo ser admitida ainda uma quarta classe, essencialmente íngreme, normalmente descrita como escarpada.

**Tabela 1:** Classificações de Relevo em Diferentes Localidades

País	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Afeganistão (MRRD, 2003)	0 - 10 %	10 - 25 %	25 - 60 %	> 60 %
Bangladesh (MC, 2000)	0 - 10%	11 - 25%	> 25%	-
Espanha (DGC, 2016)	0 - 5%	5 - 15 %	15 - 25%	> 25 %
Estados Unidos - North Carolina (NCDOT, 2013)	0 - 8 %	8 - 15%	> 15 %	-
Índia (IRC, 1980)	0 - 10 %	10 - 25 %	25 - 60 %	> 60 %
Nepal (MPIT, 2013)	0 - 10 %	10 - 25 %	25 - 60 %	> 60 %
Países da Ásia (UNESCAP, 2001)	0 - 10 %	10 - 25 %	25 - 60 %	> 60 %

Nota: Os países da Ásia mencionados são China, Coreia, Cazaquistão, Mongólia e Rússia.

Nota-se que apesar de alguns países já definirem um intervalo de declividades para cada tipo de terreno, o Brasil ainda utiliza critérios subjetivos, que dependem fundamentalmente da percepção do projetista. Assim, não de ser propostos métodos que permitam uma melhor tomada de decisão, visando evitar a ocorrência de soluções equivocadas, as quais podem elevar os custos de implantação de um trecho rodoviário ou, ainda, torná-lo menos seguro.

### 3. LÓGICA FUZZY

Muitos problemas da natureza humana são mais facilmente interpretados por meio de variáveis subjetivas do que objetivas. Um exemplo comum disso é a classificação de uma cor. Embora seja mais comum, definir um objeto como vermelho é bem mais vago do que defini-lo pelo comprimento de onda, que apresenta uma medição mais clara e precisa. De fato, os seres humanos transmitem mais informações imprecisas (como as expressas por meio de variáveis linguísticas) que por meio de valores numéricos absolutos (Zadeh, 1973).

Essa constatação difere significativamente da lógica booleana, em que somente são permitidos dois resultados: falso e verdadeiro, geralmente definidos como 0 e 1. Uma cor pode ter graus de vermelho que dependem consideravelmente da percepção do indivíduo que analisa esta situação. Para contornar este problema, Zadeh (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos *fuzzy*, que permite a obtenção de valores intermediários entre os limites 0 e 1.

Pode-se definir um conjunto *fuzzy* segundo os preceitos originalmente propostos por Zadeh (1965). Seja  $X$  um espaço de pontos, com um elemento genérico de  $X$  denotado por  $x$ . Um conjunto *fuzzy*  $A$  em  $X$  é caracterizado por uma função de pertinência  $f_A(x)$  que associa cada ponto em  $X$  a um número real no intervalo  $[0,1]$ , isto é:

$$f_A(x): X \Rightarrow [0,1] \quad (2)$$

Se  $f_A(x) = 1$ , há um indicativo que  $x$  é completamente compatível com  $A$ , ao passo que, caso  $f_A(x) = 0$ , há uma total incompatibilidade.

A definição desta função de pertinência é subjetiva, pois uma função especificada para uma abordagem particular pode apresentar resultados diferentes caso definida por outras pessoas (Vaz, 2006). A Tabela 2 a seguir apresenta alguns tipos de funções de pertinência clássicas, estas disponibilizadas pelo *software* MATLAB® em seu módulo de inteligência artificial.

**Tabela 2:** Tipos de funções de pertinência

Função	Descrição	Representação Gráfica
Triangular	$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$	
Trapezoidal	$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$	

Fonte: Mathworks, 2018.

Funções de pertinência do tipo triangular são largamente utilizadas tendo em vista a simplicidade da forma da função, mas também uma satisfatória disponibilidade de informação quanto aos termos linguísticos (Pedrycz, 1994). Para englobar os extremos dos conjuntos *fuzzy* limitados à esquerda e à direita, podem ser utilizadas adaptações das funções triangulares para que estas se tornem trapezoidais.

Assim, neste trabalho, foram adotadas funções triangulares e trapezoidais pois, além de serem bastante simples, geralmente apresentam bons resultados, conforme verificado por Barua *et al.* (2014).

#### **4. PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA**

Fez-se necessário fazer uma consulta a especialistas que tivessem experiência rodoviária e, a partir da quantificação das variáveis qualitativas, foi possível empregar o método indutivo de aprendizado a fim de atingir o objetivo deste trabalho, isto é, obter as funções de pertinência. Esta seção descreve o procedimento adotado.

##### **4.1. Consulta a Especialistas**

Para utilizar a lógica *fuzzy* quando da definição de intervalos para as variáveis que caracterizam a condição topográfica de um segmento rodoviário, optou-se por um procedimento de consulta a especialistas, sendo selecionadas pessoas que tivessem experiência com operação e/ou projeto rodoviário. Neste grupo, incluem-se agentes de órgãos federais e estaduais, superintendentes regionais do DNIT e público acadêmico que já tenha trabalhado nesta linha.

Foi elaborado um questionário *online*, desenvolvido através da plataforma *Google Forms*, de forma que fosse possibilitada a divulgação deste nas mais diversas regiões do país. Neste questionário, os especialistas foram expostos a 20 cenários de trechos rodoviários e solicitados que classificassem de modo subjetivo alguns aspectos do segmento, dentre os quais, o relevo, o qual foi categorizado em Plano, Ondulado ou Montanhoso, seguindo a nomenclatura empregada pelo DNER (1999).

Além do relevo, os especialistas também avaliaram o uso do solo, a intensidade de ocupação das áreas lindeiras, a condição geométrica do traçado (alinhamento horizontal e vertical) e a presença de elementos nas margens das vias. Para cada uma destas categorias, foram feitas classificações em termos de três variáveis linguísticas. No entanto, este trabalho aborda especificamente os aspectos relacionados ao relevo.

Para a construção dos cenários rodoviários, foi utilizado o *software* Infracore<sup>®</sup>, que possibilita a visualização de projetos de infraestrutura – como rodovias, pontes e estruturas de drenagem – em três dimensões. Tal *software* permite a geração de cenários com movimentos similares às interfaces de visualização de microssimuladores, como Vissim ou Aimsun, onde é possível visualizar o trecho como se o estivesse percorrendo em um veículo. Trata-se, portanto, de um formato mais relacionado à concepção espacial de projetos pelo caráter visual que o *software* possui. A Figura 1 a seguir apresenta um exemplo do resultado final de um cenário utilizado no questionário.



**Figura 1:** Exemplo de Visualização do *Software* Infracore® para um Cenário Rodoviário Utilizado no Questionário

Com esta ferramenta, foram elaborados vídeos de duração entre 20 e 30 segundos para a representação de 20 cenários. A extensão dos trechos variou entre 580 metros e 1 quilômetro, aproximadamente, mas sendo sempre mantida uma velocidade uniforme e igual em todos os casos, evitando uma percepção tendenciosa por parte do especialista.

Foram obtidas respostas de 11 especialistas, distribuídos entre as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

#### 4.2. Quantificação das Variáveis

Apesar de a lógica *fuzzy* permitir a utilização de variáveis linguísticas essencialmente qualitativas, é necessário que estas sejam mensuradas numericamente a fim de serem obtidos os intervalos de validade das funções de pertinência, bem como os seus parâmetros.

Os especialistas julgaram cada cenário após a análise visual, ou seja, sem acesso a valores numéricos utilizados na composição dos relevos representados. Entretanto, cada cenário foi controlado de forma que, para cada variável linguística empregada para caracterização, existisse um valor quantitativo capaz de expressar a opinião dos especialistas. Este processo serviu como subsídio à construção das funções de pertinência.

Para a obtenção da declividade dos cenários propostos, foram obtidas as cotas do terreno natural entre duas estacas consecutivas, isto é, espaçadas a cada 20 metros, sendo calculada a declividade entre elas. Ao final, foi realizada uma média aritmética dos módulos das declividades, obtendo-se, portanto, uma declividade média para cada cenário, em %.

Para realizar este cálculo, os cenários simulados no Infracore® foram importados para o *software* AutoCAD Civil 3D®, no qual foi possível a exportação das cotas correspondentes com um nível maior de detalhamento e precisão.

#### 4.3. Método Indutivo de Aprendizado

A definição das funções de pertinência é uma das etapas mais difíceis quando da concepção de sistemas *fuzzy* (Santos, 2003). Pela natureza das variáveis linguísticas ser essencialmente subjetiva, encontrar um formato de uma função que seja capaz de expressar a base de conhecimento requerida para um problema específico é uma tarefa árdua. Em função disso, uma alternativa para otimizar essa busca, é o emprego de algoritmos genéticos ou redes neurais.

Para a obtenção de funções de pertinência para a condição topográfica de trechos rodoviários, foi adotado o método indutivo de aprendizado, proposto por Sebag e Schoenauer (1994). Tal metodologia pode ser empregada tanto para funções de pertinência quanto para base de regras.

Seja  $T$  um conjunto de premissas que generaliza um exemplo  $Ex$ . Em se tratando de conclusões qualitativas, a conclusão associada às premissas  $T$  é meramente uma conclusão do exemplo  $Ex$ , isto é, a conclusão da maioria dos exemplos cobertos pelas premissas  $T$ . Assim, tem-se a notação de que  $Ex < \bullet T$  para que um exemplo  $Ex$  é coberto por um conjunto de premissas  $T$ .

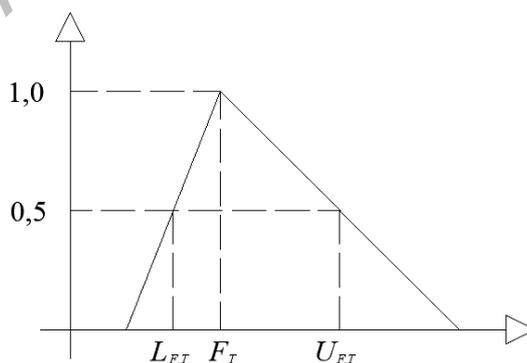
Tal constatação pode ser entendida por meio de um caso hipotético. Existe uma *premissa* que o relevo de uma rodovia é montanhoso, mas existem diversos *exemplos* de declividades médias que podem indicar uma topografia montanhosa. No questionário aplicado, o conjunto *fuzzy* referente à variável linguística “Relevo Montanhoso” foi {7,00 ; 12,98 ; 15,18 ; 15,55 ; 23,78}, isto é, especialistas classificaram estes valores de declividades como montanhosos. Dessa forma, pode-se afirmar, para este caso, que 15,55% é um *exemplo* da *premissa* que o relevo em uma região é montanhoso.

Seja uma função de pertinência  $F$ , utilizada a fim de que as *premissas* sejam quantificadas em termos de *exemplos* de forma mais clara. Tais funções são primeiramente aproximadas por triângulos, por uma questão de simplicidade.

O topo do triângulo corresponde à média dos *exemplos* das *premissas*,  $F_T$ , com grau de pertinência igual a 1. Portanto, as médias superior e inferior da função de pertinência  $F$  com respeito à  $T$ , denotadas por  $U_{F,T}$  e  $L_{F,T}$ , são:

$$U_{F,T} = \text{Média} \{F(Ex), Ex < \bullet T, F(Ex) > F_T\}$$
$$L_{F,T} = \text{Média} \{F(Ex), Ex < \bullet T, F(Ex) < F_T\}$$

Assume-se que a altura média do triângulo, isto é, grau de pertinência igual a 0,5 seja correspondente aos valores de  $U_{F,T}$  e  $L_{F,T}$ . Graficamente, a Figura 2 ilustra a função resultante.

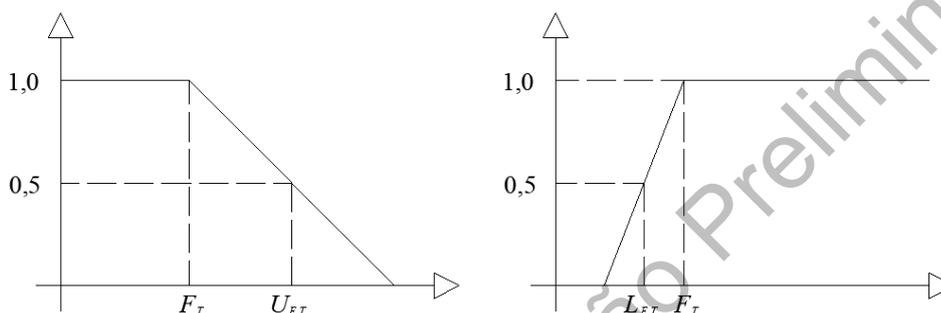


**Figura 2:** Construção de Função de Pertinência Triangular a partir do Método Indutivo de Aprendizado

Embora Sebag e Schoenauer (1994) não tenham definido qual média utilizar para o cálculo de  $U_{F,T}$  e  $L_{F,T}$ , foi adotada a média aritmética simples, assim como Santos (2003) quando da proposição de funções de pertinência *fuzzy* para o emprego em controladores semafóricos.

Existem casos, entretanto, que o valor máximo do grau de pertinência pode ser atingido para  $F_T$  e se estender até a borda do domínio dos valores que constituem os *exemplos*. Como se pode observar na *premissa* “Relevo Plano”, espera-se que o fato de não haver nenhuma declividade no terreno também se enquadre nesta categoria, embora não tenha sido apresentado aos especialistas este caso, ou seja, não haver um *exemplo* com declividade 0,00% no conjunto *fuzzy* correspondente.

Esse procedimento pode ocorrer tanto em termos de uma borda inferior quando de uma borda superior. Assim, resultaria na formação apresentada na Figura 3 a seguir, representando, portanto, funções de pertinência trapezoidais.



**Figura 3:** Construção de Funções de Pertinência Trapezoidais a partir do Método Indutivo de Aprendizado

Pode-se notar, a partir da Figura 3, que as funções anteriormente triangulares se tornam trapezoidais à medida que os valores de  $F_T$  são prolongados horizontalmente para a direita ou para a esquerda, dependendo do caso a ser adotado.

Neste trabalho, foi adotada uma função de pertinência triangular para a variável linguística intermediária, Relevo Ondulado, e funções trapezoidais para as variáveis situadas nos bordos, isto é, Relevo Plano e Relevo Montanhoso. Esta escolha se deu de forma a incluir, quando a topografia fosse plana, valores de declividades inferiores ao menor caso apresentado aos especialistas, como a declividade nula, conforme citado anteriormente. Por outro lado, declividades da ordem de 30% ou mais certamente seriam dadas como montanhosas, motivo pelo qual a referida função de pertinência foi prolongada horizontalmente.

Para a obtenção dos parâmetros das funções de pertinência (três para as triangulares e quatro para as trapezoidais, conforme Tabela 2), foram calculados os coeficientes relativos a duas equações de reta: (1) entre  $(0,5 ; L_{F,T})$  e  $(1,0 ; F_T)$  e (2) entre  $(1,0 ; F_T)$  e  $(0,5 ; U_{F,T})$ . Uma equação de reta assume a forma  $y_r = a_r \cdot x_r + b_r$ , em que, neste caso,  $y_r$  se refere ao grau de pertinência e  $x_r$  à variável numérica para as retas  $r$  correspondentes, isto é, as declividades.

Como se deseja o ponto que a reta cruza o eixo das variáveis, deve ser utilizada a seguinte sequência de equações:

$$a_r = \frac{0,5}{F_T - \{L_{F,T} \text{ ou } U_{F,T}\}} \quad (3)$$

$$b_r = 1,0 - a_r \cdot F_T \quad (4)$$

$$x_0 = -\frac{b_r}{a_r} \quad (5)$$

Com os valores de  $x_0$ , tem-se os valores das abscissas quando a ordenada é nula e estes são justamente os parâmetros  $a$  e  $c$ , por exemplo, de funções de pertinência triangulares.

## 5. RESULTADOS

A aplicação do questionário resultou nas classificações da Tabela 3, em que são apresentadas as diferentes percepções dos 11 especialistas quanto aos 20 cenários. Nota-se que, em alguns, houve um padrão de resposta bastante uniforme, como no segundo cenário. Em outros, por outro lado, houve uma variabilidade significativa, sendo o décimo quinto um exemplo desta assertiva.

**Tabela 3:** Respostas das Classificações dos Especialistas quanto ao Relevo

Cenário	Relevo (%)	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>8</sub>	E <sub>9</sub>	E <sub>10</sub>	E <sub>11</sub>
1	3,30	P	O	P	P	O	P	P	P	P	P	P
2	3,03	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
3	2,92	P	P	P	P	P	P	P	P	O	P	P
4	2,39	P	P	P	P	P	P	P	P	M	P	O
5	1,90	P	P	P	O	P	P	P	P	M	P	P
6	23,78	O	M	O	O	M	P	P	O	M	M	O
7	15,55	O	M	M	M	M	M	O	M	M	M	M
8	16,62	O	O	P	O	O	O	P	P	O	P	P
9	9,32	P	O	P	O	P	O	P	O	M	O	O
10	6,53	P	O	O	O	P	O	P	O	O	O	O
11	4,98	P	P	P	O	P	P	P	O	M	P	P
12	5,62	P	P	O	O	P	O	O	O	M	O	O
13	12,98	O	M	O	M	O	O	O	M	M	M	O
14	3,38	P	P	P	P	P	O	P	P	M	P	P
15	7,00	O	P	O	M	O	O	O	O	M	O	P
16	15,18	O	M	O	M	M	O	O	O	O	O	O
17	5,25	P	O	O	O	P	P	O	P	P	P	P
18	3,35	P	O	O	O	O	P	P	P	M	O	O
19	1,98	P	P	P	P	P	P	P	P	O	P	P
20	1,90	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Nota: Na tabela, tem-se que E = Especialista, P = Plano, O = Ondulado, M = Montanhoso.

Para a construção dos conjuntos *fuzzy*, optou-se por excluir da variável linguística o cenário que apresentasse um único respondente. Por exemplo, quando da elaboração do conjunto *fuzzy* da variável Relevo Ondulado, não foi considerada a declividade de 1,98% do décimo nono cenário, tendo em vista que somente um especialista classificou esse trecho como ondulado. Tal solução foi adotada numa tentativa de fornecer uma maior uniformidade às funções de pertinência.

Assim, os conjuntos *fuzzy* das três variáveis linguísticas podem ser observados na Tabela 4 a seguir.

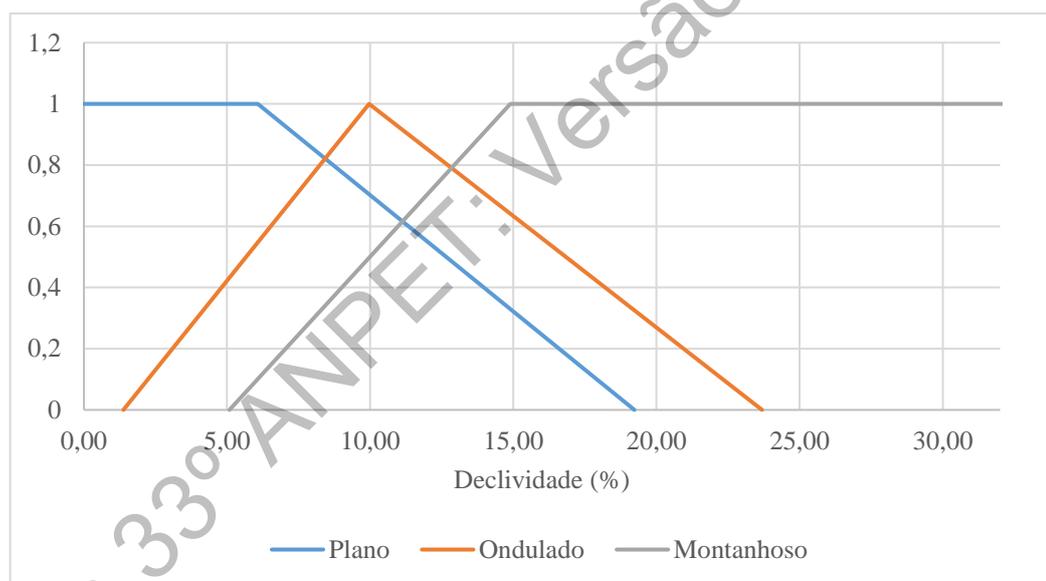
**Tabela 4:** Conjuntos *Fuzzy* das Variáveis Linguísticas

Variável Linguística	Conjunto <i>Fuzzy</i>
Plano	{1,90 ; 1,98 ; 2,39 ; 2,92 ; 3,03 ; 3,30 ; 3,35 ; 3,38 ; 4,98 ; 5,25 ; 5,62 ; 6,53 ; 7,00 ; 9,32 ; 16,62 ; 23,78}
Ondulado	{3,30 ; 3,35 ; 4,98 ; 5,25 ; 5,62 ; 6,53 ; 7,00 ; 9,32 ; 12,98 ; 15,18 ; 15,55 ; 16,62 ; 23,78}
Montanhoso	{7,00 ; 12,98 ; 15,18 ; 15,55 ; 23,78}

Esses conjuntos foram utilizados para a obtenção das funções de pertinência *fuzzy*, procedimento este que pode ser verificado na Tabela 5. Graficamente, elas podem ser ilustradas conforme Figura 4 a seguir.

**Tabela 5:** Procedimento para Obtenção de Funções de Pertinência *Fuzzy*

Variável Linguística	Tipo	Mínimo	Máximo	$F_T$	$L_{F,T}$	$U_{F,T}$	Parâmetros <i>Fuzzy</i>
Plano	Trapezoidal	1,90	23,78	6,07	3,33	12,65	[0,00 ; 0,00 ; 6,07 ; 19,23]
Ondulado	Triangular	3,30	23,78	9,96	5,67	9,99	[1,38 ; 9,96 ; 23,69]
Montanhoso	Trapezoidal	7,00	23,78	14,90	9,99	18,17	[5,08 ; 14,98 ; 35,00 ; 35,00]



**Figura 4:** Funções de Pertinência *Fuzzy* para as Variáveis Linguísticas de Relevância

Nota-se, sobretudo, uma progressão entre as variáveis linguísticas empregadas, demonstrando que o emprego do método de quantificação e do procedimento para obtenção das funções de pertinência foi satisfatório. Os conjuntos foram graficamente coerentes com o esperado, pois os respondentes empregaram mais os termos dos bordos, Relevos Plano e Montanhoso, embora o termo intermediário, Relevo Ondulado, ainda tenha mostrado significância.

A sobreposição dos conjuntos, como naturalmente ocorre na lógica *fuzzy*, era esperada e confirma o grau de subjetividade do problema. Uma mesma declividade do terreno, como o valor de 10%, pode ser classificada em termos das três classes, pois elas possuem distintos graus de pertinência para este caso.

## 6. CONCLUSÕES

Apesar de muitas localidades proporem intervalos delimitados para a definição de uma classe topográfica, como visto na Tabela 1, nota-se que no Brasil, a definição de um relevo como Plano, Ondulado ou Montanhoso depende essencialmente da percepção do engenheiro rodoviário, podendo este ser projetista ou analista de projeto. De forma a contornar esse problema, a lógica *fuzzy* pode ser empregada para estudar o problema.

As funções de pertinência obtidas neste estudo confirmaram que os especialistas podem apresentar opiniões distintas quanto à classificação do relevo e, por esse motivo, a Figura 3 convergiu a resultados esperados. Foi possível observar ainda que é mais fácil para um projetista classificar um relevo como Plano ou Montanhoso, mas não se sabe ao certo até que ponto este relevo poderia ser classificado como Ondulado. Assim, o intervalo em que a variável linguística intermediária (relevo Ondulado) possui maior pertinência é consideravelmente menor que as variáveis dos bordos.

Este trabalho constitui, sobretudo, o primeiro passo para a proposição de sistemas especialistas – expressos em termos de controladores *fuzzy* com regras da ordem SE-ENTÃO. A variável “Relevo” está associada à uma série de características rodoviárias, como velocidades limites e operacionais, bem como à definição dos parâmetros norteadores dos projetos.

Uma alternativa é utilizar a lógica *fuzzy*, sendo as funções de pertinência como *inputs* de um controlador, para calibrar as características técnicas recomendadas pelo DNER (1999), como largura de acostamento. Dessa forma, haveria um refinamento destas características, tendo em vista que elas foram definidas e baseadas prioritariamente nas versões anteriores dos manuais da AASHTO (2011), e não na realidade brasileira.

Além disso, as definições imprecisas do HCM (2000) associam o relevo à velocidade de veículos pesados e, a partir destas velocidades, poderiam ser obtidas correlações com as velocidades de projeto para, enfim, caracterizar rodovias com uma maior precisão.

Cabe destacar, portanto, que estudos futuros com a utilização da lógica *fuzzy*, neste tema, podem propiciar a redução da subjetividade, pelo fato de a técnica empregada neste trabalho ser capaz de transformar variáveis qualitativas em resultados numéricos.

Assim, a proposição de sistemas que tenham a lógica *fuzzy* como ferramenta principal pode facilitar a tomada de decisão por parte do especialista por permitir a redução da decisão humana quando da classificação do terreno. Tal procedimento poderia, por exemplo, ser implementado em *softwares* de projeto rodoviário para dar mais embasamento ao projetista nas etapas iniciais de concepção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2011) American Association of State Highway and Transportation Officials. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.
- Antas, P. M.; Vieira, A.; Gonçalo, E. A.; Lopes, L. A. S. (2010) *Estradas: projeto geométrico e de terraplenagem*. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 282p.
- Barua, A.; Muduniri, L. S.; Kosheleva, O. (2014) Why Trapezoidal and Triangular Membership Functions Work So Well: Towards a Theoretical Explanation. *Journal of Uncertain Systems*, v. 8(3), p. 164-168.
- DGC (2016) Dirección General de Carreteras. Gobierno de España. Ministerio de Fomento. *Trazado – Instrucción de Carreteras*. Norma 3.1-IC.

- DNER (1999) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Publicação 706, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Ministério dos Transportes, Brasília, 195p.
- HCM (2000) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Washington, DC.
- IRC (1980) Indian Roads Congress. *Geometric Design Standards for Rural (Non-Urban) Highways*. IRC:73-1980.
- Lee, S. H. (2013) *Introdução ao Projeto Geométrico de Rodovias*. Editora UFSC. 4ª edição revista e ampliada. Florianópolis, Brasil.
- MATHWORKS (2018) Plataforma *online* de suporte ao software MATLAB®. Disponível em: [https://www.mathworks.com/?s\\_tid=gn\\_logo](https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo). Acesso em: 30/11/2018.
- MC (2000) Ministry of Communications. Government of the People's Republic of Bangladesh. Roads and Railways Division. *Geometric Design Standards for Roads & Highways Department*. Version 4.
- MPIT (2013) Ministry of Physical Infrastructure & Transport. Government of Nepal. Department of Roads. Planning and Traffic Unit. *Nepal Road Standard 2070*.
- MRRD (2013) Ministry of Rural Rehabilitation and Development. Islamic Republic of Afghanistan. *Rural Roads Manual*. Version 2.
- NCDOT (2013) North Carolina Department of Transportation. *Road Design Manual*. No. 8.
- Pedrycz, W. (1994) Why triangular membership functions? *Fuzzy Sets and Systems*, v. 64, p. 21-30.
- Sang-Youp, K.; Jain-Sung, C.; Seung-Yong, L.; Hyung-Gwan, H. (2006) Development of a New Terrain Type Classification to be used in Highway Design. *International Journal of Highway Engineering*, v. 8(4), p. 49-62.
- Santos, D. B. L. M. (2003) *Procedimento para a Construção dos Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação TU.DM – 006 A/03. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 106p.
- Sebag, M.; Schoenauer, M. (1994) *Inductive Learning of Membership Functions and Fuzzy Rules*. Uncertainty Modeling: Theory and Applications, serie Machine Intelligence and Pattern Recognition. North Holland.
- UNESCAP (2001) United Nations Economic and Social Commission for Asia. *Asian Highway*. ST/ESCAP/2173.
- Vaz, A. M. (2006) *Estudo das Funções de Pertinência para Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos Fuzzy*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T. DM – 005 A/2006. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 158p.
- Yong-Seok, K.; Won-Bum, C.; Jin-Kug, K. (2011) Terrain Classification for Road Design. *International Journal of Highway Engineering*, v. 13(4), p. 221-229.
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, v.8, p. 338-353.
- Zadeh, L. A. (1973) Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, v. SMC-3, nº 1.

---

Gabriel Andrade Lanzaro (gabriellanzaro@gmail.com)

Michelle Andrade (michelleandrade@unb.br)

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro - Brasília, DF, Brasil