

Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) para estimativas da rugosidade superficial a partir de mapas digitais de elevação

Arcilan Trevenzoli Assireu¹
Rafael dos Reis Pereira¹
Vanessa Cristina Oliveira de Souza¹
Arley Ferreira de Souza²
Sérgio Henrique Franchito²

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI/IRN
Av. BPS, 1303 – B. Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil
E-mail: {assireu, fael.reis89, vanessa.vcos}@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE - Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos .
arley@dpi.inpe.br, sergio.franchito@cptec.inpe.br

Abstract. Roughness length (z_0) of land surfaces is an essential variable for the wind power assessment. Numerous formulations to derive the roughness length can be found in many studies, but as mentioned by many authors, our ability to assign accurate values of z_0 remains problematic. In this paper is proposed the application of the Asymmetrical Fragmentation Operator (FA) to characterize the roughness over complex surface land cover. The FA operator was applied to digital elevation model relative to 10 different regions where anemometric towers were installed. The FA values were compared to roughness length estimated for local sites from anemometric (micrometeorological) methods and morphometric (or geometric) methods. Results show that the FA is able to detect geomorphologic features related to local wind behavior, which are not detected by roughness length estimated from anemometric (micrometeorological) methods and morphometric (or geometric) methods.

Palavras-chave: roughness length, Asymmetrical Fragmentation Operator, anemometric methods, morphometric methods, comprimento de rugosidade, Operador de Fragmentação Assimétrica, método anemométrico, método morfométrico.

1. Introdução

O conhecimento das características aerodinâmicas locais é fundamental para descrever, modelar e prever o comportamento dos ventos e da turbulência em diferentes escalas. Na camada limite atmosférica – a camada que está em contato ou sofre influência da superfície terrestre-, o escoamento das massas de ar tem comportamento distinto ao longo de sua extensão vertical, variando desde o regime turbulento, nos níveis inferiores, ao não turbulento, no topo desta camada. Considerando esta variação vertical do vento, o relevo, em termos aerodinâmicos, é descrito pelos parâmetros de rugosidade, relacionados com a forma, altura, densidade de distribuição dos elementos na superfície, dentre outras variáveis que determinam a eficiência de uma área da superfície para transformar a energia do vento médio em movimento turbulento nas baixas camadas (Wieringa et al., 2001). Um dos atributos aerodinâmicos utilizados para parametrizar a rugosidade do terreno é o comprimento característico da rugosidade (Z_0) que, formalmente corresponde à altura a partir do solo onde a velocidade do vento é igual a zero, considerando um perfil vertical cuja variação apresente comportamento logarítmico com a altitude. Porém, a mensuração desta variável é ainda considerada difícil e desprovida de consenso metodológico (Garvine and Kempton, 2008). Grimmond & Oke (1999) propõem um esquema simplificado para a estimativa dos parâmetros de rugosidade em áreas urbanas, aplicado a fotografias aéreas e características de densidade e forma urbana (Figura 1).

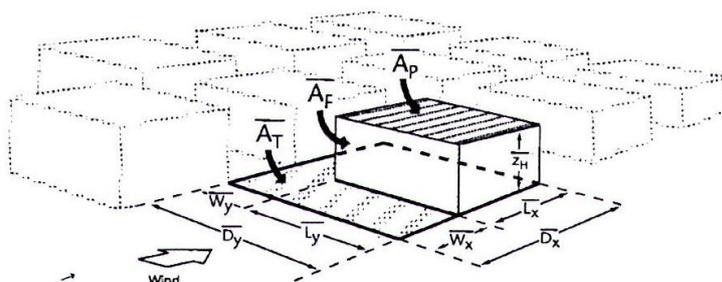


Figura 1. Definição das dimensões de superfície usadas em análises morfométricas e suas relações: razão de área plana ($\lambda_p = A_p/A_T$) e razão de área frontal ($\lambda_F = A_F/A_T$). FONTE: Grimmond e Oke (1999).

Algumas áreas onde o vento é medido pode apresentar grande complexidade morfométrica, o que faz com que a rugosidade superficial destas áreas tenha elevado valores de índices como deslocamento do plano zero (z_d) ou comprimento de rugosidade (z_0), comparáveis aos valores típicos de cidades (ex., Wieringa 1993, Tab. VIII). Isto tem importantes implicações para o arrasto em superfície, condutância aerodinâmica associada ao transporte de momentum, as escalas e intensidades da turbulência, convergência e divergência de mesoescala, espessura da camada de Ekman, intensidade do vento e forma do perfil do vento, e o tipo de escoamento local resultante da interação entre vento de mesoescala e condições locais. Assim, um conhecimento o mais acurado possível das características aerodinâmicas do terreno é fundamental para a descrição, modelagem e previsão do comportamento do vento. Porém, as estimativas de z_d e z_0 , em ambientes com elevada complexidade morfométrica, ainda está associado a grandes incertezas. Dois métodos são os mais usuais:

- Métodos morfométricos (ou geométricos) baseados em algoritmos que relacionam parâmetros aerodinâmicos com parâmetros associados a morfometria superficial;
- Micrometeorológicos (ou anemométricos) que usam observações de vento ou turbulência para determinar parâmetros aerodinâmicos onde se inclui relações teóricas derivadas de perfis logarítmicos de vento.

Os métodos morfométricos têm como vantagem a possibilidade de obtenção de estimativas sem a necessidade de torres e instrumentações instaladas no campo. Porém, apresentam como principal limitação o fato de seu respaldo teórico ser baseado em relações empíricas construídas sob condições idealizadas em túnel de vento. Assim, a validação dos métodos morfométricos, é etapa importante para a melhor compreensão da relação funcional dos atributos de terreno para os regimes de ventos locais. O presente trabalho busca fazer uma primeira comparação entre métodos morfométricos e micrometeorológicos, aplicados sobre 10 regiões ao longo do estado de São Paulo onde haviam dados de vento medidos a 10m de altura.

2. Metodologia de Trabalho

A obtenção de propriedades de rugosidade e propriedades aerodinâmicas a partir do modelo conceitual de Grimmond e Oke (1999), embora bastante utilizado para aplicações em áreas urbanas, é de difícil aplicação em regiões de topografia complexas ou com estruturas menos uniformes como as típicas das cidades.

Para feições com tamanha complexidade como são os relevos no entorno dos reservatórios, Assireu et al. (2004) e Assireu et al. (2009) utilizaram uma técnica baseada no operador de fragmentação assimétrica (FA) (maiores detalhes vide Assireu et al., 2002; Rosa et al., 1998). Esta técnica mostrou-se eficiente para quantificar o nível de complexidade do entorno dos

reservatórios e será utilizada aqui para as etapas de quantificação da rugosidade do relevo adjacente aos pontos de medida de vento, tendo em vista permitir a comparação entre as estimativas de rugosidade por este método e as obtidas pelo método micrometeorológico. O método consiste em analisar os dados em janelas de 3 x 3 pixels e aplicar o operador conforme esquema abaixo (Figura 2). Ao final é computado um valor médio ao longo da área (o equivalente a razão de área plana na Figura 1) e um valor médio ao longo do perfil que configura o “túnel de vento” (o equivalente a razão de área frontal na Figura 1). A análise é processada em matrizes 3x3 deve-se a possibilidade das análises serem feitas na melhor janela de resolução e sem comprometimentos da robustez do método. Assim, para os dados do SRTM (resolução de 90m) tem-se um valor a cada 810m (para o índice equivalente a razão de área frontal) e uma área de 72900 m² (para o índice equivalente a razão de área plana).

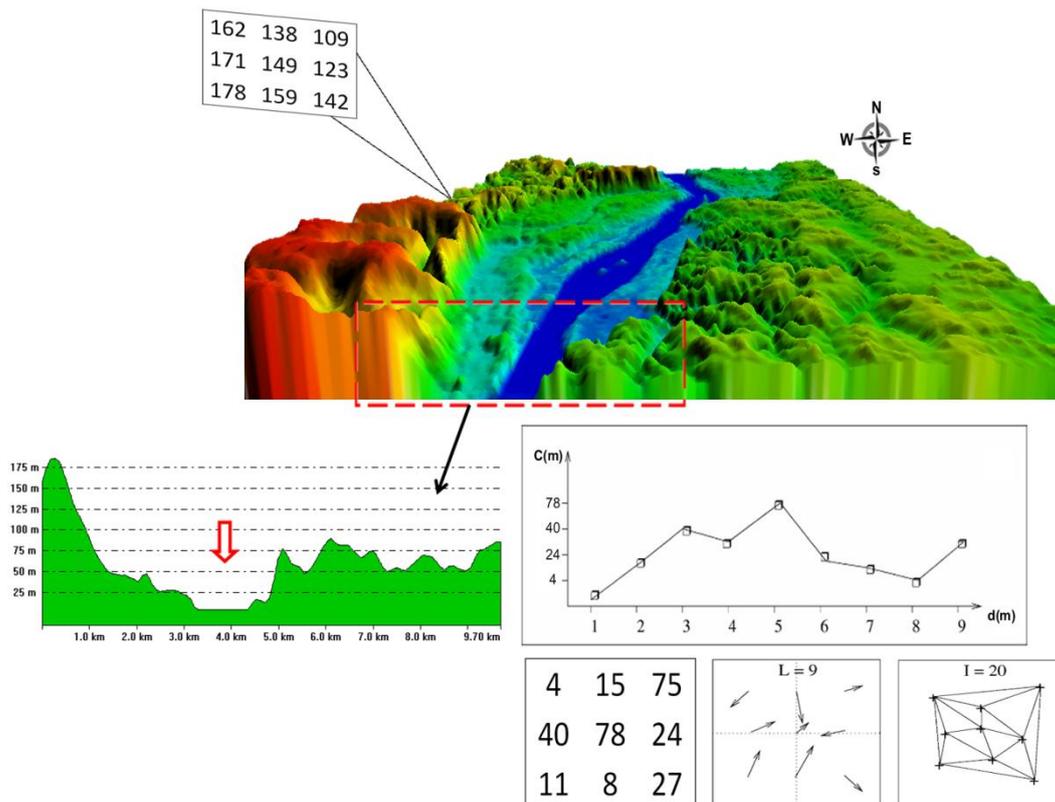


Figura 2. Quantificação da complexidade morfométrica através do método dos padrões de gradientes. Fonte: Adaptado de Assireu et al. 2002.

O perfil de velocidade do vento sob a condição de estratificação neutra da atmosfera é comumente aproximada por uma expressão logarítmica do tipo (Colin & Faivre, 2010):

$$U(z) = U(zr) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{zr}{z_0}\right)} \quad (1)$$

O comprimento de rugosidade Z_0 foi estimado por isolar este termo na equação (1):

$$z_0 = \frac{z-zr}{e^{\frac{U(z)}{U(zr)}}} \quad (2)$$

Onde: $U(z)$, a velocidade a 50 m foi obtida a partir do Atlas Eólico Brasileiro (http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php), para a latitude correspondente a posição

de cada torre anemométrica, $U(z_r)$ foi o valor da velocidade média a 10m medida por cada estação, e z_0 o comprimento de rugosidade superficial e z_r a altura de referência (10m). Os valores avaliados pelo método anemométrico acima (Equação 2) foi comparado com os respectivos valores levantados a partir da inspeção de imagens de alta resolução dos sítios onde estavam cada torre e correspondente classificação da rugosidade na Tabela proposta por Manwell (2002).

Tabela 1. Comprimento de rugosidade. FONTE: Adaptado de Manwell (2002).

Descrição do terreno	Z_0 (mm)
Terreno muito liso, gelo, lama	0,01
Mar aberto em condição de calmaria	0,20
Mar agitado	0,50
Neve	3,00
Gramado	8,00
Pasto rugoso	10,00
Campo de pousio	30,00
Plantações	50,00
Poucas árvores	100,00
Muitas árvores, poucas construções	250,00
Florestas	500,00
Subúrbios	1500,00
Centros de cidade com construções altas	3000,00

3. Resultados e Discussão

Os dados de vento de cada uma das 10 estações foram analisados tendo em vista levantar tanto as condições médias (intensidade e direção) quanto os parâmetros estatísticos relacionados com as respectivas distribuições de probabilidade Weibull. Em todos os casos a Distribuição Weibull (Figura 3a) apresentou um bom ajuste com os dados. As rosas dos ventos (Figura 3b) mostram que cada sítio apresenta uma direção preferencial para o vento, porém existe uma elevada heterogeneidade espacial. Os valores de velocidade média variaram desde 1,9 m/s até 5,8 m/s (Tabela 2) e com aumento durante o inverno e primavera.

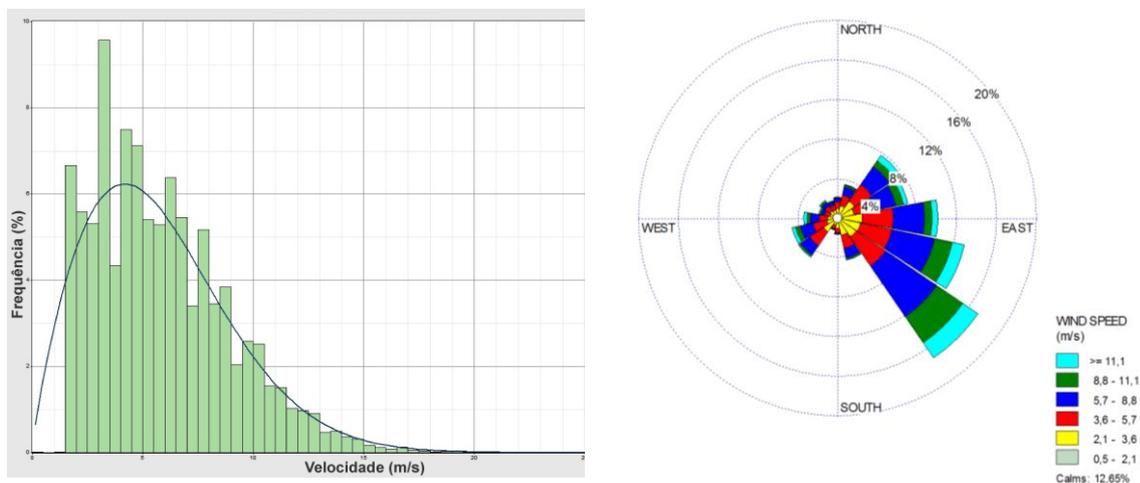


Figura 3. Distribuição Weibull e rosa dos ventos para Andradina.

As imagens de alta resolução (Figura 4b) utilizadas para as estimativas do comprimento de rugosidade de superfície indicam a grande variabilidade de terreno em que as estações foram colocadas. Os ambientes variam desde cidade, regiões com agricultura, regiões com matas densas, regiões com importantes extensões de corpos d'água e regiões em que todas estas classes se misturam. Isto faz com que as estimativas de rugosidade não sejam algo trivial.

Os valores de rugosidade estimados visualmente a partir das imagens em alta resolução (Tabela 2) tendo em vista a classificação proposta por Manwell (2002) (Tabela 1) indicaram valores entre 50 (plantações) até 1500 (regiões de cidades horizontalizadas – sem grandes edifícios). As estimativas de rugosidade a partir do método anemométrico (Equação 2) mostrou valores tipicamente 20 vezes maiores (tendo chegado até a 100 vezes) do que os estimados visualmente. Nenhuma correlação entre os dados normalizados dos valores de rugosidade pelos dois métodos foi observada. Alguns autores (Grimmond & Oke, 1998; Holmes, 2001; Manwell, 2002) já chamaram a atenção para o fato de que embora a lei logarítmica (Equação 1) tenha uma base teórica rigorosa, construída sobre condições de escoamento plenamente desenvolvido e sobre terrenos homogêneos, estas condições ideais raramente são encontradas na natureza.

Tendo em vista que nenhuma relação entre as duas formas de estimativa de comprimento de rugosidade foram observadas e nem destes com os parâmetros estatísticos do vento, o MDE relativo a cada estação foi levantado. A partir destes MDE buscou-se analisar a posição altimétrica das estações anemométricas em relação a vizinhança, exemplificado pela Figura 4a. A partir destas análises pôde-se classificar cada estação como acima, no nível ou abaixo do relevo circundante (* e ** na Tabela 2). Neste caso percebe-se uma clara relação: os sítios com ventos mais intensos são enquadrados na condição acima e nível (Tabela 2).

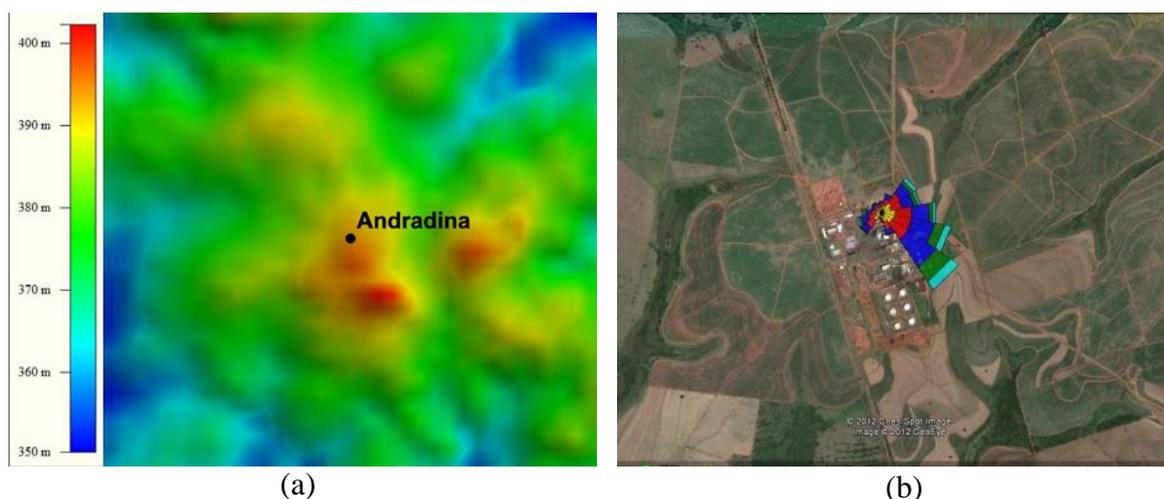


Figura 4. MDE a partir de dados SRTM (a) e imagem na faixa do visível em alta resolução (b).

O operador de fragmentação assimétrica (FA) foi aplicado sobre cada MDE relativo à área de 3 x 3 km em cujo centro coincide a posição das torres anemométricas (Figura 5). A escolha da área 3 x 3 km seguiu a resolução do Atlas Eólico, a partir do qual foram utilizadas as velocidade de vento a 50m, no cálculo de z_0 a partir da Equação 2.

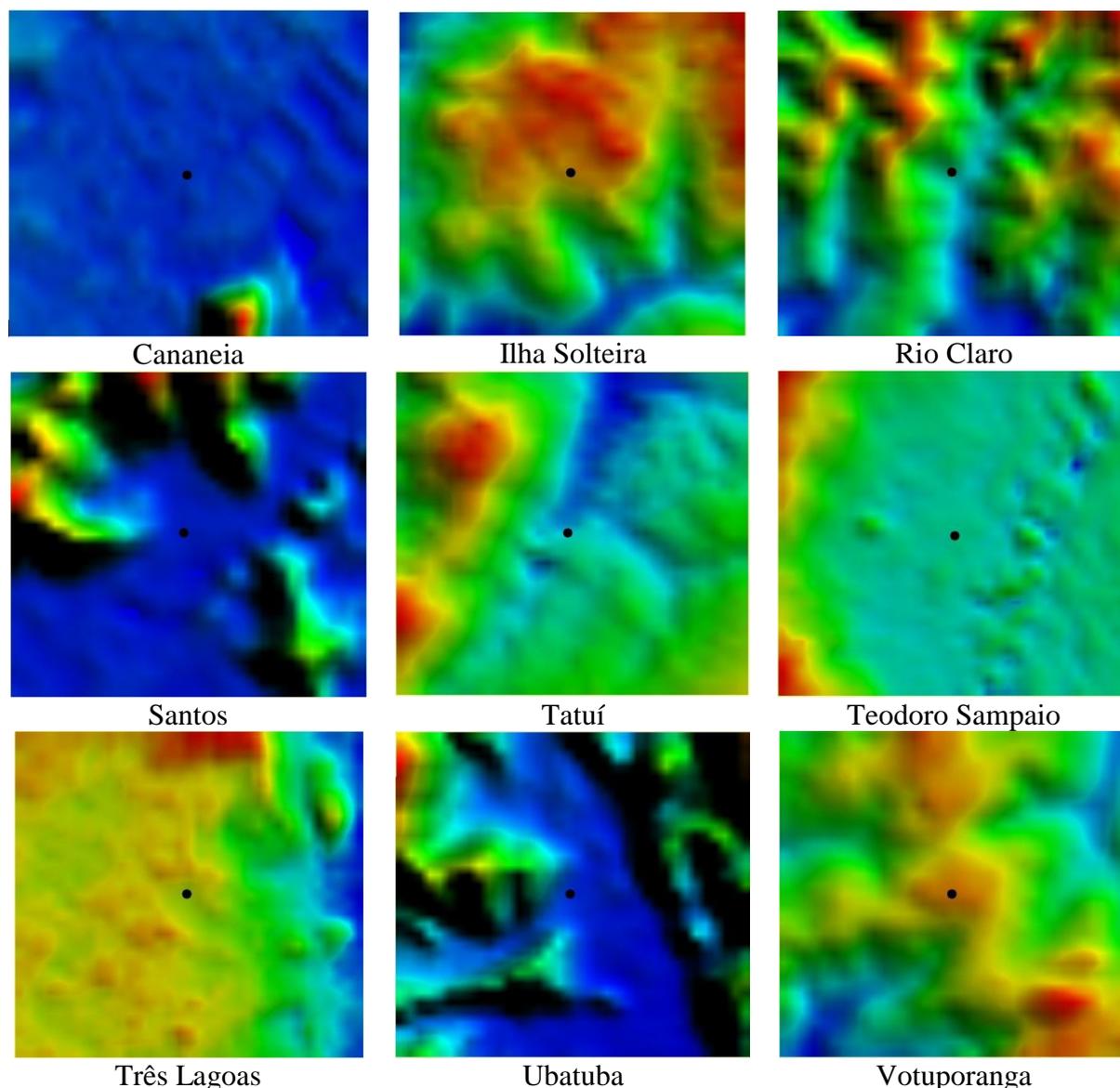


Figura 5. MDE para cada estação anemométrica. O círculo central indica a posição das estações.

Os resultados do FA, aplicados a cada sítio amostral, estão indicados na Tabela 2. A partir da classificação das estações em acima ou mesmo nível que o relevo adjacente (escala 3 x 3 km), * e ** na Tabela 2 (os demais sítios são classificados em abaixo), fica claro que os sítios acima e no mesmo nível apresentaram os mais elevados valores de velocidade do vento (Tabela 2). Isto se deve ao fato de que o vento medido a 10m nestes sítios apresentam menor influência do terreno, pois estão acima da altura média destes. Assim, é esperado que as maiores influências da rugosidade do terreno se façam sentir sobre as demais estações. Os valores de FA para estas estações foram cotejados com os respectivos valores de velocidade média (Figura 6).

Ao contrário do comprimento de rugosidade estimado tanto pelo método anemométrico quanto pelo morfométrico, o FA apresenta uma boa relação com as velocidades observadas.

Tabela 2. Valores médios do vento para cada localidade e respectivos comprimentos de rugosidade e valor do fator de assimetria (FA). * e ** indicam a cota relativa das estações em relação ao terreno circunvizinho, acima e ao mesmo nível, respectivamente.

Estação	Média do vento (m/s)	Z ₀ (mm) (Manwell, 2002)	FA
Andradina *	5,77	250	1,00
Cananeia **	4,46	1500	0,60
Ilha Solteira *	4,63	1500	1,10
Rio Claro	2,6	500	1,10
Santos	3,04	500	1,00
Tatuí	3,25	50	0,85
Teodoro Sampaio	4,51	100	0,80
Três Lagoas	3,14	1500	0,90
Ubatuba	1,89	250	1,20
Votuporanga *	4,05	1500	1,00

O FA, como um termo de reconhecimento de padrão, e cujos valores são tão mais altos quanto mais altos forem a complexidade da matriz analisada, no presente caso, a rugosidade do terreno, indicou tendência coerente com o esperado. Ou seja, maiores valores de vento em terrenos menos rugosos ou mais lisos (Figura 6). Isto abre a possibilidade da utilização deste índice para o diagnóstico de regiões adequadas a instalação de parques eólicos a partir de MDEs.

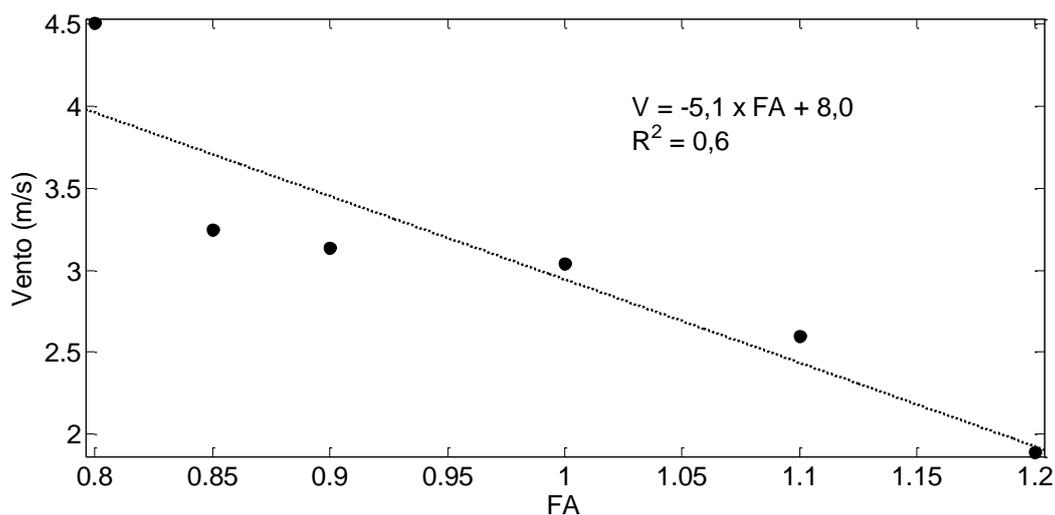


Figura 6. Relação entre o índice FA e o vento.

4. Conclusões

Neste trabalho foram comparadas estimativas de rugosidade obtidas a partir de inspeção visual em imagens de alta resolução dos locais onde as torres meteorológicas estavam instaladas (Método Morfométrico) e obtidas a partir de análises anemométricas (Método Micrometeorológico). A estimativa de rugosidade a partir do método anemométrico mostrou valores tipicamente 20 vezes maiores (tendo chegado até a 100 vezes) do que os estimados

visualmente. Nenhuma correlação entre os dados foi observada. Estes resultados de certa forma corroboram os resultados de alguns autores que chamaram a atenção para o fato de que embora a lei logarítmica tenha uma base teórica rigorosa, construída sobre condições de escoamento plenamente desenvolvido e sobre terrenos homogêneos, estas condições ideais raramente são encontradas na natureza. Tendo em vista as limitações dos métodos acima, foi investigada neste trabalho a aplicabilidade do operador de fragmentação assimétrica (FA) na caracterização da rugosidade do terreno onde foram instaladas as torres anemométricas. Os resultados indicam que o FA tem a capacidade de detectar, em alta resolução, estruturas geomorfológicas de interesse de atividades da prospecção eólica. As análises preliminares apresentadas neste trabalho indicam uma clara relação entre a rugosidade estimada pelo FA e os valores médios de vento medidos nos diferentes locais.

Agradecimentos

À FAPEMIG pelo financiamento ao Projeto Aproveitamento Eólico em Reservatórios Hidrelétricos no Estado de Minas Gerais: Impactos das Mudanças Climáticas para o Cenário Atual (Mudanças Climáticas APQ 00288/11).

Referências Bibliográficas

- Wieringa, J. **Updating the Davenport roughness classification**. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 41, 357-368, 1992.
- Garvine R. and Kempton W. Assessing the wind field over the continental shelf as a resource for electric power. **Journal of Marine Research**, 66 (6), 751-773, 2008.
- Grimmond, C.S.B.; Oke, T.R. Aerodynamic properties of Urban Areas Derived from Analysis of surface form. J. **Appl. Meteorol.**, 38, 1262-1292, 1998.
- Assireu, A. T.; J. A. Lorenzetti; E. M. L. M. Novo; J. L. Stech; C. Z. F. Braga; I. B. T. Lima. Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. **Revista Brasileira de Geociências**, 32(4):501-508, 2004.
- Assireu, A. T. , Freitas, R. M. , Novo, E. M. L. M., Roland, F. , Pacheco ; Stech, J. L. **Índice de criticidade da qualidade da água em lagos e reservatórios: Uma proposta de metodologia baseada em variáveis estáticas e dinâmicas**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. XIV SBSR, 2009.
- Assireu, A. T., Rosa, R. R.; Lorenzetti, J. A; Vijaykumar, N. L.; Rempel, E. L.; Ramos, F. M.; Sá, L. D. Abreu; Bolzan, M. J. A.; Zanandrea, A. "Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters". **Physica D**, 168-169: 397-403, 2002.
- Colin J. and Fraive R. Aerodynamic roughness length estimation from very high-resolution imaging LIDAR observations over the Heihe basin in China. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2010.
- Manwell, J. F.; McGowan J. G. and Rogers, A. L. **Wind energy explained**, John Willey & Sons, West Sussex, England, 590 pp., 2002.
- Grimmond, C.S.B., King T.S., Roth M. and Oke T.R. Aerodynamic Roughness of Urban Areas Derived from Wind Observations. **Boundary-Layer Meteorology** 89: 1-24, 1998.
- Rosa R.R., Sharma A.S., Valdivia J. A. 1998. Characterization of localized turbulence in plasma extend system. **Physica A**, 257:509-514.