



Estatística de ventos e análise de condições de dispersão atmosférica em São José dos Campos/SP

Lucas Miranda Barbosa
Paulo Ivo Braga de Queiroz
Wilson Cabral de Sousa Júnior

Núcleo de Estudos em Infraestrutura, Ambiente e
Sustentabilidade – NINFA

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Como citar este artigo¹:

Barbosa, L. M.; Queiroz[✉], P. I. B.; Sousa Júnior, W. C. Estatística de ventos e análise de condições de dispersão atmosférica em São José dos Campos/SP. NINFA Informe Técnico n. 03. São José dos Campos: CTA/ITA, 2021. Disponível em <http://redevale.ita.br/>.

[✉] E-mail: pi@ita.br

1. Introdução

Fenômenos naturais como vento e chuva são de difícil previsão e, portanto, exigem normalmente uma abordagem estatística, especialmente porque são elementos condicionais para diversos estudos. A análise de dispersão de poluentes na atmosfera é um exemplo para o qual o estudo estatístico dos ventos é essencial.

De acordo com Godish (1977), o vento se caracteriza pelo movimento do ar associado ao movimento horizontal da atmosfera e afeta significativamente a concentração de poluentes. Em geral, quanto maior a velocidade do vento, menor será a concentração de poluentes, e esta velocidade não só acelera a dispersão do poluente, mas também o dilui.

¹ Este Informe Técnico foi baseado em Dissertação de Mestrado de Lucas Miranda Barbosa, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, cujo documento completo está disponível na Biblioteca Digital do ITA (<http://www.bdita.bibl.ita.br>)

Outro fator importante do transporte e dispersão da poluição do ar é a direção do vento. A análise dos padrões de vento e sua sazonalidade alimenta modelos preditivos para apoio ao planejamento de localização de fontes poluentes, de maneira a minimizar impactos socioambientais associados à poluição.

A componente horizontal da dinâmica atmosférica define a direção e velocidade do vento. Já a componente vertical, conformada pelos sistemas de alta e baixa pressão, definem o grau de estabilidade atmosférica. A temperatura do ar também influencia neste processo. Quanto maior a estabilidade, menor a capacidade de dispersão de poluentes pela atmosfera, e maiores os impactos socioambientais da poluição.

A topografia é outro fator que influencia a dispersão atmosférica, podendo facilitar ou dificultar uma maior ou menor concentração de poluentes atmosféricos em determinadas localidades.

Diante da variabilidade das características que estabelecem direção e velocidade dos ventos, e da importância de uma definição mais assertiva, especialmente para orientação de políticas associadas ao controle de poluição atmosférica e qualidade do ar, este trabalho objetivou a realização de um estudo estatístico dos ventos (direção e velocidade) para a região do município de São José dos Campos, um importante polo regional do estado de São Paulo.

Pondera-se que os resultados desta análise possam ser úteis para as decisões sobre instalação de atividades fontes de poluição atmosférica, definições sobre uso e ocupação do solo em nível local/regional, bem como para alimentar modelos que demandam dados de ventos, aplicáveis a diversas outras finalidades.

2. Metodologia e área de estudo

2.1 Preâmbulo teórico

A análise realizada neste estudo foi dividida em estatística direcional sobre o círculo (direção) e estatística sobre a magnitude dos ventos (velocidade).

Para a análise de estatística direcional, foi utilizada a distribuição de von Mises. Em estatística direcional, a distribuição de von Mises, também chamada de distribuição normal no círculo, é uma distribuição de probabilidade contínua no círculo, sendo considerada a distribuição mais útil para dados direcionais em duas dimensões (MARDIA; JUUP, 1999). São dois os parâmetros dessa distribuição: a média (μ) e a medida de concentração (κ). A distribuição de probabilidade é dada pela equação:

$$f(\mu, \kappa) = \frac{e^{\kappa \cos(x-\mu)}}{2\pi I_0(\kappa)}$$

em que $I_0(\kappa)$ é a função modificada de Bessel de ordem 0 para o valor de (κ).

É importante ressaltar que a função von Mises é periódica e tem período equivalente a 360° , ou seja $f(\theta) = f(\theta + 2\pi)$. Como todos os valores de direção terão um ângulo equivalente dentro do período de 2π ($[-\pi; \pi]$, ou $[0; 2\pi]$, ou ainda $[\pi; 3\pi]$) que se deseje trabalhar, é importante que:

$$\int_{\theta}^{\theta+2\pi} f(x) = 1$$

Uma diferença relevante das distribuições circulares em relação às distribuições usuais é a maneira como se inferem os parâmetros das distribuições. A média de uma distribuição von Mises não é dada pela média das medições, mas sim por meio de funções trigonométricas, através das equações (BORRADAILE, 2003):

$$C = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos \theta_j$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sin \theta_j$$

em que,

$$\begin{aligned}\mu &= \tan^{-1}(S/C) & \text{Se } C \geq 0 \\ \mu &= \tan^{-1}(S/C) + \pi & \text{Se } C < 0.\end{aligned}$$

A medida de concentração foi estimada pela estatística:

$$R_e^2 = \frac{N}{N-1} \left(\bar{R}^2 - \frac{1}{N} \right),$$

em que:

$$\bar{R}^2 = C^2 + S^2.$$

Por fim, a correção de vieses foi realizada resolvendo a equação indicada por Mardia e Juup (1999):

$$R_e = \frac{I_1(\kappa)}{I_0(\kappa)}.$$

As velocidades dos ventos são modeladas por distribuições de números positivos, sendo as distribuições Gama e Weibull tradicionalmente utilizadas para este fim. Além destas, foram analisadas de maneira mais detalhadas duas outras distribuições, Log-Nomal e Gumbel, de maneira a observar os possíveis ganhos de precisão a partir de um espectro maior de distribuições de velocidades de ventos.

Por fim, é necessário analisar a aderência das distribuições aos dados observados. Para esta finalidade, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Trata-se de um teste de aderência consagrado para a comparação de distribuições distintas e definição sobre as que melhor descrevem os dados. Este teste se aplica a casos em que haja apenas uma variável independente, ou seja, cada medição pode ser associada a apenas um número. Os dados podem ser convertidos em um estimador não tendencioso $S_N(x)$ da função cumulativa de probabilidade da distribuição dos quais eles são retirados (PRESS et al.,

2011). No teste K-S, a função cumulativa teórica é comparada com a função cumulativa estimada, $SN(x)$, utilizando-se a maior diferença absoluta entre elas.

2.2 Área de estudo

O estudo teve como objeto geográfico a Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVP), uma das regiões da Macrometrópole Paulista. O foco das análises foi o município de São José dos Campos, o mais populoso da região, com diversas instalações industriais e no qual se encontram 3 estações de monitoramento de poluentes atmosféricos da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

2.3 Origem e características dos dados

Os dados brutos de direção e velocidade dos ventos foram obtidos da Estação Meteorológica localizada no aeroporto de São José dos Campos, que se encontra a uma altitude de 636 m, latitude aproximada de 23°13' S e longitude de 45°52' W. O período de medições vai de 01/01/2001 a 31/08/2017, último período contínuo de medições, sem lacunas na série histórica. Ao todo, são 94.954 registros de velocidade e direção de ventos.

Cada registro de dados contém as seguintes informações: data e hora; tipo da nuvem da primeira camada; direção do vento (0-360), medida discretamente de 10 em 10; e velocidade do vento medida discretamente com incrementos de 1 nó (1kt = 0,514 m/s); altura da base das nuvens na primeira camada (m); cobertura de nuvens da camada mais restrita (porcentagem); cobertura de nuvens da primeira camada (oitavos) e pressão reduzida ao nível do mar.

2.4 Passos metodológicos

As análises foram iniciadas com a modelagem das distribuições de von Mises que melhor se ajustaram aos dados de vento. Partindo de uma única von Mises, foram acrescentadas outras curvas em combinações lineares, com intuito de diminuir o valor

da estatística D_{\max} do teste de K-S. Quando o acréscimo de uma distribuição de von Mises não diminuiu o valor de D_{\max} de maneira significativa, o processo foi encerrado.

Para se encontrar as melhores distribuições de velocidade, consideram-se os diferentes perfis de velocidade para cada direção. Em outras palavras, cada direção deve ter um perfil de velocidade diferente.

3. Resultados e discussão

3.1 Direção dos ventos

Os dados brutos de número de medições para cada direção, encontrados na base de dados, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Número de medições para cada intervalo de medição (10°)

Direção ($^\circ$)	Número de medições	Direção($^\circ$)	Número de medições	Direção ($^\circ$)	Número de medições
10	1012	130	3138	250	1551
20	1441	140	3990	260	1394
30	1855	150	4321	270	1341
40	2172	160	4803	280	1313
50	2607	170	3288	290	1176
60	3270	180	3505	300	1761
70	2764	190	2621	310	800
80	3035	200	3411	320	874
90	2818	210	2035	330	744
100	2996	220	2109	340	782
110	1850	230	1908	350	858
120	2946	240	1757	360	827

Para caracterizar os dados, foram encontradas duas von Mises que descrevem bem o comportamento da amostra. Os dados destas distribuições teóricas podem ser observados na Tabela 2, e na Figura 1 é evidenciada a relação entre a amostra real e as previsões teóricas. É importante salientar que o acréscimo de uma nova distribuição à combinação linear com duas distribuições pouco altera a distribuição resultante:

enquanto o D_{max} diminui muito pouco, a última distribuição responde por apenas 3% dos dados.

Tabela 2. Dados das distribuições von Mises para São José dos Campos

Número de von Mises	Valores dos parâmetros	D_{max}
1	$\mu = 148,8^\circ; \kappa = 0,7$	0,0416
2	$p_1 = 71\%; \mu_1 = 179,3^\circ; \kappa_1 = 0,9$ $p_2 = 29\%; \mu_2 = 76,0^\circ; \kappa_2 = 1,1$	0,0352
3	$p_1 = 72\%; \mu_1 = 164,8^\circ; \kappa_1 = 0,9$ $p_2 = 25\%; \mu_2 = 75,8^\circ; \kappa_2 = 1,1$ $p_3 = 3\%; \mu_3 = 312,2^\circ; \kappa_3 = 1,13$	0,0346

Sendo assim, para caracterizar as direções de vento de São José dos Campos, foi escolhida a distribuição com duas von Mises.

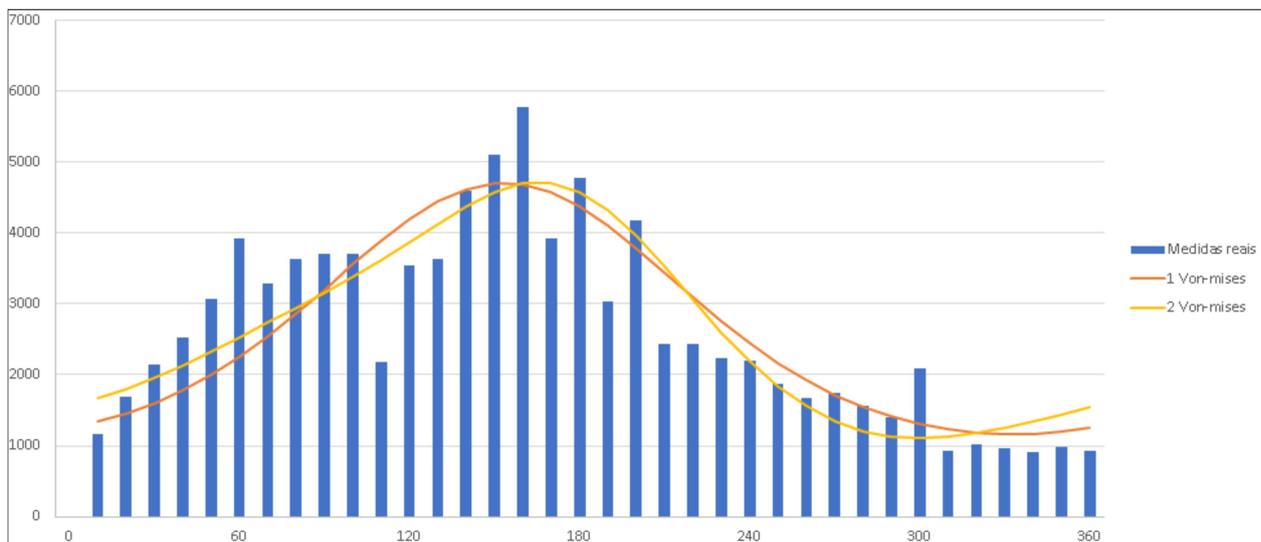


Figura 1. Distribuições von Mises e medições reais de direção de vento em SJC.

A direção predominante de ventos em São José dos Campos, conforme indicado pelo modelo, é na faixa dos 160° , em um único modal, indicando ventos do quadrante sudeste, na maior parte do tempo.

3.2 Velocidades dos ventos

As velocidades de ventos em São José dos Campos são medidas em nós, com incrementos de 1 em 1. Na Tabela 3 pode-se visualizar o conjunto de medidas de velocidade do vento analisado.

Tabela 3. Dados das medições de velocidades dos ventos para São José dos Campos

Velocidade (nós)	Número de medições	Velocidade (nós)	Número de medições	Velocidade (nós)	Número de medições
1	845	12	2216	23	23
2	10646	13	1207	24	8
3	15028	14	1091	25	14
4	15763	15	996	26	3
5	12338	16	675	27	2
6	11409	17	386	28	1
7	5333	18	375	30	1
8	6408	19	160	32	1
9	3149	20	194	66	1
10	4889	21	55	–	–
11	1696	22	41	–	–

Para modelar a velocidade dos ventos em São José dos campos, foram utilizadas as quatro distribuições estatísticas apresentadas no capítulo anterior: Gama, Weibull, Gumbel e Log-normal.

Para cada uma das distribuições avaliadas foi utilizada uma combinação linear com duas distribuições associadas a combinação linear de von Mises. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados das distribuições estatísticas analisadas

Distribuição	Parâmetros	D_{max}
Log-normal	$\mu_1 = 0,97; \sigma_1 = 0,43$ $\mu_2 = 1,12; \sigma_2 = 0,84$	0,087
Weibull	$c_1 = 4,89; k_1 = 2,07$ $c_2 = 6,61; k_2 = 0,83$	0,14
Gumbel	$\mu_1 = 5,68; \sigma_1 = 2,00$ $\mu_2 = 2,25; \sigma_2 = 1,23$	0,084
Gama	$\alpha_1 = 3,06; \beta_1 = 1,13$ $\alpha_2 = 4,18; \beta_2 = 1,51$	0,083

A distribuição mais aderente aos dados observados foi a Gama (menor D_{max}), embora as distribuições Log-normal e Gumbel também resultaram boas aderências. A distribuição com o maior erro foi a de Weibull. Constatou-se ainda que a maior imprecisão entre medida e valor teórico se encontra nos menor valor de velocidade (1 nó). Tal fato pode estar associado à imprecisão do equipamento de medida para velocidades muito baixas, com consequente falhas no registro. Os resultados podem ser visualizados na Figura 2.

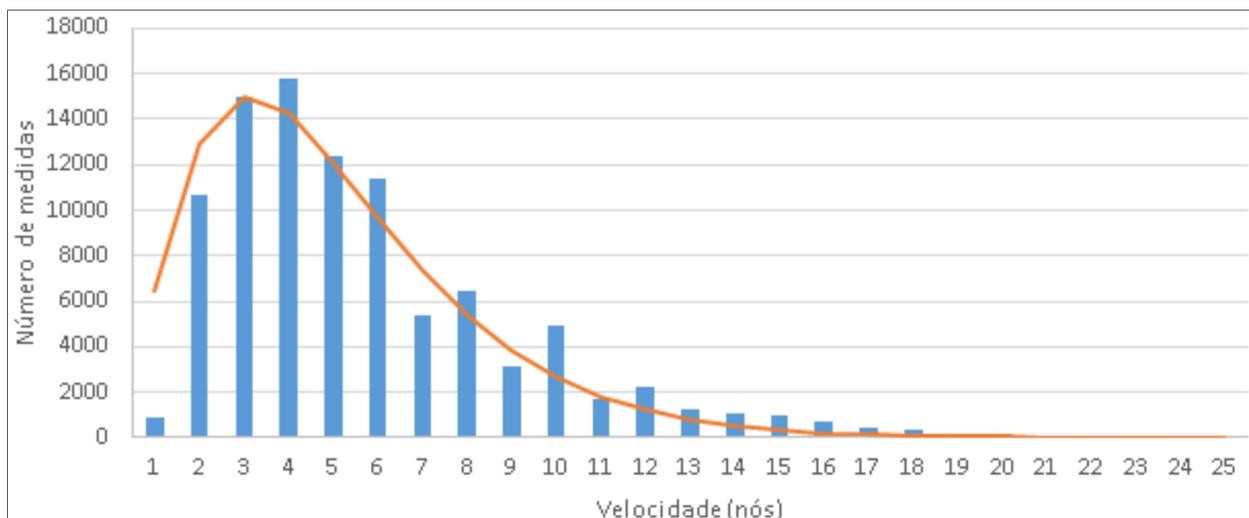


Figura 2. Velocidades dos ventos em São José dos Campos (distribuição Gama)

A velocidade predominante (modal) nos dados modelados é de 3 nós (aproximadamente 1,5 m/s), com média anual de 3,88 nós (aproximadamente 2 m/s).

3.3 Velocidade e direção dos ventos: influência na dispersão em SJC

Como comentado anteriormente, a dispersão de poluentes na atmosfera é condicionada por diversos fatores, dentre eles a direção e velocidade dos ventos, objeto deste estudo. Estas duas variáveis conformam o movimento horizontal dos poluentes e são importantes para os modelos de dispersão.

No que concerne a estas variáveis, também é relevante conhecer sua distribuição no tempo, ao longo do dia e sazonalmente.

Na Tabela 5 encontram-se tabulados os valores médios encontrados ao longo da série analisada, por hora do dia, para velocidade e direção dos ventos em São José dos Campos.

Tabela 5. Valores médios horários de velocidade e direção de ventos em SJC

Horário	V (m/s)	Direção	Horário	V (m/s)	Direção
0h	1,26	149,1	12h	2,47	86,3
1h	1,05	146,7	13h	2,71	180,6
2h	0,92	144,6	14h	3,03	206,0
3h	0,84	138,0	15h	3,39	193,1
4h	0,81	132,4	16h	3,69	178,1
5h	0,85	122,4	17h	3,86	169,6
6h	0,99	117,7	18h	3,64	165,3
7h	1,17	104,6	19h	3,18	163,9
8h	1,53	88,8	20h	2,62	162,0
9h	1,87	79,3	21h	2,14	159,1
10h	2,14	76,5	22h	1,80	156,8
11h	2,29	76,5	23h	1,54	154,6

Os valores de velocidades dos ventos, em discretização horária, indicam menores velocidades entre 1 e 7 horas e maiores velocidades entre 13 e 19 horas, numa clara

inversão noturna. De fato, de acordo com Turner (1994), de modo geral, o período noturno tem maior estabilidade na baixa atmosfera e o período diurno é mais instável, sendo estas características afetadas pela velocidade dos ventos, pelas condições de relevo e pelo gradiente vertical de temperatura.

Esta variação noturna das velocidades dos ventos em São José dos Campos está representada no gráfico da Figura 3.



Figura 3. Gráfico das velocidades médias horárias em SJC (velocidade em m/s).

A partir destes dados é possível inferir que, considerando as variáveis do movimento horizontal da baixa atmosfera, as condições de dispersão são piores no período noturno e ligeiramente melhores no período vespertino em São José dos Campos.

Em termos de variação sazonal, há uma concentração de menores velocidades dos ventos nos meses de outono e inverno e maiores velocidades na primavera e início do verão (Tabela 6).

Tabela 6. Velocidades médias e direções dos ventos ao longo dos meses em SJC

Mês	V (m/s)	Direção	Mês	V (m/s)	Direção
jan	2,00	137,4	jul	1,67	143,3
fev	2,02	138,9	ago	2,00	153,6
mar	1,94	147,4	set	2,51	153,4
abr	1,90	153,5	out	2,62	156,9
mai	1,79	159,9	nov	2,55	152,9
jun	1,55	145,1	dez	2,40	160,3

As direções predominantes se concentram no quadrante SUDESTE. Na Figura 4 pode-se visualizar uma Rosa dos Ventos com ponto central na estação meteorológica do Aeroporto de São José dos Campos. A legenda indica as faixas de velocidades dos ventos.

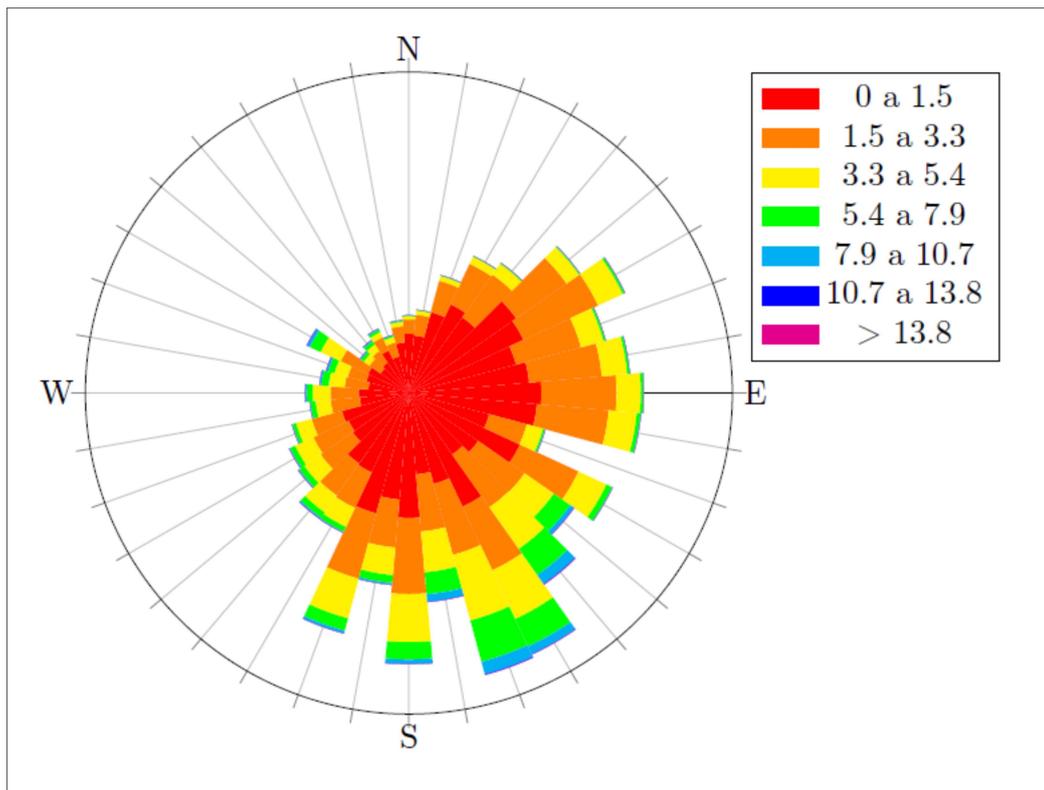


Figura 4. Rosa dos Ventos para SJC com indicação de velocidades em escala de cores.

De maneira sintética, o município de São José dos Campos tem espectro de ventos superficiais fracos, fluindo predominantemente no sentido SE-NO, com velocidades menores nos períodos noturnos e nas estações de Outono e Inverno.

Uma indicação da direção predominante dos ventos sobre o território municipal é apresentada na Figura 5.

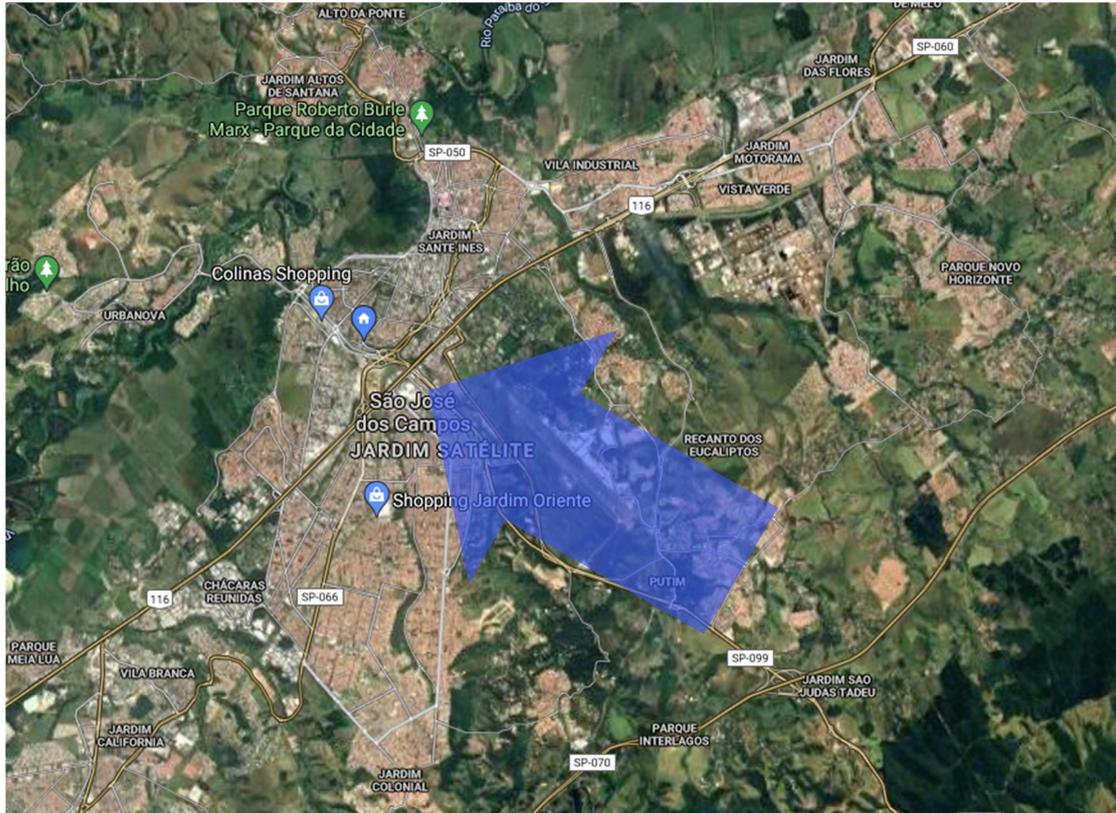


Figura 5. Projeção da direção predominante de ventos (SE-NO) em SJC sobre imagem Google Earth.

4. Considerações finais

Este estudo foi dedicado à análise de distribuições de probabilidade que melhor descrevem as direções e velocidades dos ventos, e considerações sobre dispersão atmosférica, utilizando como dados de entrada a base de medições da estação meteorológica localizada nas dependências do Aeroporto de São José dos Campos.

A rota metodológica adotada para modelar as direções dos ventos mostrou-se eficaz e a distribuição de von Mises respondeu com grande aderência aos dados de vento, especialmente quando se utilizou de uma segunda distribuição. Para as velocidades dos ventos, os modelos também encontraram resultados precisos, com melhor aderência

para a distribuição estatística Gama. Também apresentaram resultados satisfatórios as distribuições Log-normal e Gumbel. Tal fato sugere que uma investigação prévia local para descrição estatística dos dados pode gerar ganhos de precisão em comparação com estudos que já partem de uma distribuição estatística pré-estabelecida.

No caso do município de São José dos Campos, a predominância de ventos, considerando o período analisado, é de direções do quadrante Sudeste, com moda em torno de 150° . Os ventos na localidade são, em geral, fracos, com concentração unimodal em torno da velocidade de 1,5 m/s e média anual de 2,0 m/s no período analisado.

A distribuição sazonal de velocidades de ventos no município, considerando a estação meteorológica analisada, compreende ventos mais fracos no outono e inverno (média de 1,9 m/s) e ligeiramente superiores na primavera e verão (média de 2,26 m/s).

Os dados indicam uma predominância dos ventos mais fracos (velocidades abaixo de 1 m/s) no período noturno, especialmente entre 2 e 6 horas, e dos ventos mais fortes (velocidades ligeiramente superiores a 3 m/s) no período vespertino, especialmente entre 14 e 19 horas.

As condições específicas de direção e velocidade dos ventos indicam baixa capacidade de dispersão de poluentes atmosféricos (transporte horizontal) na localidade analisada, com baixo nível de arraste horizontal e movimento potencial predominante na direção Sudeste-Noroeste.

Este trabalho considerou as variáveis direção e velocidade dos ventos. Uma análise completa de condições de dispersão atmosférica deve compreender variáveis do movimento vertical (convecção), além de fatores topográficos e de relevo e cobertura da superfície. Estudos desta natureza devem ser desenvolvidos para subsídio ao ordenamento de uso e ocupação territorial e de regramento de atividades econômicas emissoras de poluentes atmosféricos em nível local/regional.



Agradecimentos

Em momentos críticos para a sociedade, as redes de pesquisa e grupos científicos são importantes fontes de dados e informações relevantes para análise. Os autores agradecem o apoio do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e do pesquisador Marcos Daysuke Oyama pelo acesso aos dados brutos da estação meteorológica do Aeroporto de São José dos Campos utilizados neste trabalho.

Referências

BORRADAILE, G. J. Statistics of earth science data: their distribution in space, time and orientation. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

GODISH, T. Air Quality. New York: Academic Press, 1997, 72 p.

MARDIA, K.; JUUP, P. A. Directional Statistics. New York: Academic Press Inc, 1999.

NEVERS, N. Air Pollution Control Engineering. New York: Mcgraw Hill, 1995, 506 p.

PRESS, W. H.; TEUKOLSY, S. A.; VETTERLING, W.; FLANNERY, B. P. Métodos Numéricos Aplicados Rotinas em C++. Porto Alegre: Bookman, 2011.

TURNER, D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates. 2nd Ed. New York: Lewis, 1994, 182 p.

* * *