

ANÁLISE DA FREQUÊNCIA E DO PADRÃO DOS VENTOS NA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA ENTRE 2006 e 2016.

Analysis of the frequency and the standard of winds in the Region of the Great Vitória between 2006 and 2016.

Marcio Malacarne
Coordenador do GOA da Universidade Federal do Espírito Santo
marcio.malacarne@gmail.com

Fabrcio Kriger Ribeiro
Mestre em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
fkro@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo apresentar o padrão de escoamento atmosférico na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), medido por oito estações meteorológicas, entre os anos de 2006 e 2016. Foi criado um aplicativo em Python 2.7 que utilizou-se para análise dos ventos, fornecendo resultados em gráficos, textos e tabelas. A partir da análise dos gráficos e dos parâmetros médios obtidos, pode-se afirmar que a direção predominante na RMGV está ao norte-nordeste. Porém com variações locais; os ventos mais fortes vêm do nordeste e mais fracos do oeste. Calculou-se uma média vetorial de todas as estações e obteve-se velocidade média de 3,1 m.s⁻¹ e direção média de 32°. Os ciclos diurnos das velocidades e direções médias mostram que vão desde 7 m.s⁻¹, ao nordeste, à tarde, indo para noroeste, de madrugada, até calmaria. No ciclo anual, entre os meses de abril e junho, o vento é predominantemente sul e fraco. Entre setembro e outubro, o vento é predominantemente norte-nordeste e forte. A velocidade média é maior próxima do litoral (entre 4 e 5 m.s⁻¹) e cai pela metade a alguns quilômetros continente adentro, estações Cariacica (1,9 m.s⁻¹) e Inmet (1,8 m.s⁻¹). Todas estão abaixo da velocidade média economicamente viável para geração de energia eólica. Um novo padrão da dispersão de aerossóis na atmosfera deve ser feito, levando em conta as variações das direções médias locais, pois podem estar subestimando a poluição no continente em detrimento com o mar.

Palavras-chave: Vento; Climatologia; Vitória.

ABSTRACT: This work aims to present the atmospheric flow pattern in the Metropolitan Region of Great Vitória (RMGV), measured by eight meteorological station, between the years of 2006 and 2016. We created an app in Python 2.7, which was used in this work to analyze the wind data, providing us graphics and average parameters. From the analysis of the graphs and the average parameters obtained, we can affirm that the predominant orientation in the RMGV is from the north-northeast, being the stronger winds coming from northeast and weaker ones from west. We calculated an vectorial average of all the data involved in the work e obtained an average speed of 3.1 m.s⁻¹ and an average direction of 32°. The diurnal cycles of the average speeds and directions show that at dawn the wind is weak (< 1 m.s⁻¹) and predominantly from northwest, and in the afternoon it reaches a peak of 7 m.s⁻¹, coming from the northeast. Between april and june the wind is predominantly south and weak. Between september and october the wind is predominantly north-northeast and strong. The average speed is greater next to the coast (between 4 and 5 m.s⁻¹) and it drops to the half of it 10 km inland, as shown by Cariacica (1.9 m / s) and Inmet (1.8 m.s⁻¹) stations. Due to the varying winds from one place to another, a new pattern of aerosol dispersion in a developing atmosphere, taking into account as local variables, may be underestimating uncontaminated pollution at the expense of the sea.

Keywords: Wind; Climatology; Vitória.

INTRODUÇÃO

A busca por energias renováveis, como eólica, exige um estudo do comportamento dos ventos, como faixa de velocidade e direção predominantes (COSTA E LYRA, 2012). Por outro lado, a modelagem da dispersão de poluentes na atmosfera também depende da direção e velocidade dos ventos (RATTO ET AL, 2010, p.1). Conhecer o padrão de escoamento atmosférico de superfície numa escala local e regional sempre foi fundamental. Além dos motivos acima, existem outros, como na construção civil, na aviação, no lazer e turismo. A ampla possibilidade de utilização desse padrão nos inspirou a realizar esse estudo.

Para determinar o regime de ventos de maneira mais precisa possível de uma dada região, somente através de medições anemométricas com um significativo período amostral e uma adequada distribuição espacial. Este trabalho tem como objetivo apresentar o padrão de escoamento atmosférico Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) partir da análise dos dados de velocidade e direção do vento medidos por oito estações meteorológicas em diferentes pontos da RMGV entre os anos de 2006 e 2016.

Nesse contexto, já existem alguns estudos, como os Relatórios Anuais do Instituto Estadual do Meio Ambiente (IEMA, 2013). Porém, neles é analisado o comportamento apenas durante um ano e de somente quatro estações isoladas. Outros, como Mattiuzzi e Marchioro (2012), analisam um período maior, entre 2000 e 2011. Contudo, apenas da estação Aeroporto.

REVISÃO TEÓRICA

O vento pode ser definido como o ar em movimento. Esse deslocamento do ar é causado por diferença de pressão entre as diversas regiões da atmosfera, que são por sua vez geradas pela distribuição diferencial da radiação solar pelo globo, e por fatores como continentalidade, altitude e latitude, que influenciam de maneira direta os processos térmicos do ar atmosférico. Os ventos também sofrem influências do movimento de rotação da Terra e da topografia da superfície terrestre (TUBELIS, 1984).

Nos níveis atmosféricos mais baixos, as aproximações utilizadas para descrever o vento de alta altitude não podem ser mais aplicadas, devido ao desbalanceamento de forças causado pelo atrito oferecido pela superfície. O relevo e a presença de obstáculos alteram o escoamento de ar nas proximidades da superfície terrestre, gerando turbulências (MARTINS, 2008). Define-se a camada limite atmosférica como a região compreendida entre a superfície e uma altura variável entre 100 e 300m, que apresenta um comportamento de escoamento suficientemente diferente do resto da atmosfera devido à interação com a superfície (STULL, 1988).

Outro aspecto importante a ser considerado em relação ao comportamento do vento próximo da superfície é o seu cisalhamento. A velocidade do vento é nula em alturas

próximas à superfície e grande na atmosfera livre. Na camada superficial, imediatamente acima da superfície, a velocidade do vento apresenta um perfil aproximadamente logarítmico (KAIMAL, 1994).

Os movimentos atmosféricos podem ser enquadrados em diferentes escalas de tempo espaço: desde a microescala (dimensões de menos de 1km e tempos de vida da ordem de segundos a minutos) até a planetária (dimensões de menos de 1000-4000km e tempos de vida da ordem de semanas a anos) (AHENS, 2009). Os fenômenos meteorológicos planetários são causados basicamente pelo aquecimento diferencial da atmosfera a partir da radiação solar incidente, e os movimentos gerados agem para realizar uma redistribuição de calor: em geral, há transporte de ar quente para os polos e ar frio para o equador (MARTINS, 2008).

Dessa forma, os movimentos observados na atmosfera terrestre são a sobreposição de todas as escalas de movimento, onde eventualmente circulações de uma determinada escala podem predominar sobre as outras, caracterizando condições de vento específicas em certas regiões. Por exemplo, a brisa terra-mar numa região costeira, dependente do gradiente de temperatura entre continente e oceano, determina em grande parte o regime diurno de ventos observados no litoral.

Posto isso, pretende-se determinar as direções e velocidades predominantes em diferentes pontos da RMGV e conjecturar o porquê dessas variações.

Para tanto, criou-se um aplicativo próprio, desenvolvido numa moderna e simples linguagem de programação, Python, cujos detalhes estão na próxima seção.

Período amostral

Escolheu-se o período entre 2006 e 2016 baseado nas Normais Provisórias (da velocidade e direção do vento), de acordo com a Nota Técnica 41, da OMM (Organização Mundial de Meteorologia) (WMO, 2011), que prevê o estudo da climatologia local num período mínimo de 10 anos.

Não é apenas a WMO que adota tal período. A previsão meteorológica de curto ou curtíssimo prazo utilizada em aeroportos segue o padrão do International Civil Aviation Organization (ICAO), realizando previsões horárias.

Desta forma, o período amostral utilizado neste trabalho é satisfatório.

METODOLOGIA

Área de Estudo e Estações Meteorológicas

A Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) representa uma região altamente industrializada em que vive quase metade da população do Espírito Santo, estado situado na região sudeste do Brasil. Para este trabalho foram utilizados dados provenientes de anemômetros de oito estações meteorológicas distintas, conforme descrição na Tabela 1.

Tabela 1 - Detalhes das Estações Meteorológicas

Nº	Nome da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período Amostral	Intervalo (min)	Perda (Dir.) (%)	Perda (Vel.) (%)
1	Terceira Ponte	-20.31940	-40.28520	70	09/08/2010 31/10/2016	2	70**	1
2	Aeroporto	-20.24967	-40.28191	4	01/01/2006 25/07/2016	60	1	1
3	GOAMet	-20.27854	-40.30770	33	20/05/2011 22/07/2016	15	13	13
4	Inmet A612	-20.27109	-40.30606	9	01/11/2006 30/09/2016	60	2	2
5	Vila Velha	-20.34861	-40.31737	9*	01/01/2006 25/07/2016	60	33	16
6	Cariacica	-20.34108	-40.40204	25*	01/01/2006 25/07/2016	60	44	9
7	Carapina	-20.22759	-40.25797	33*	01/01/2006 25/07/2016	60	30	28
8	Enseada	-20.31331	-40.29069	7*	01/01/2006 25/07/2016	60	27	21

*Para as estações do IEMA não existe altitude determinada nos relatórios de poluição do ar, nem na página do IEMA, apenas a altura é informada: 3 m. Calculou-se a altitude das estações usando o sitio www.mapcoordinates.net, com um erro de ± 2 m.

**Os dados de direção do vento na Terceira Ponte só estão disponíveis a partir de abril de 2015.

Fonte: Elaborado pelas autores.

A Figura 1 mostra a localização das estações meteorológicas.

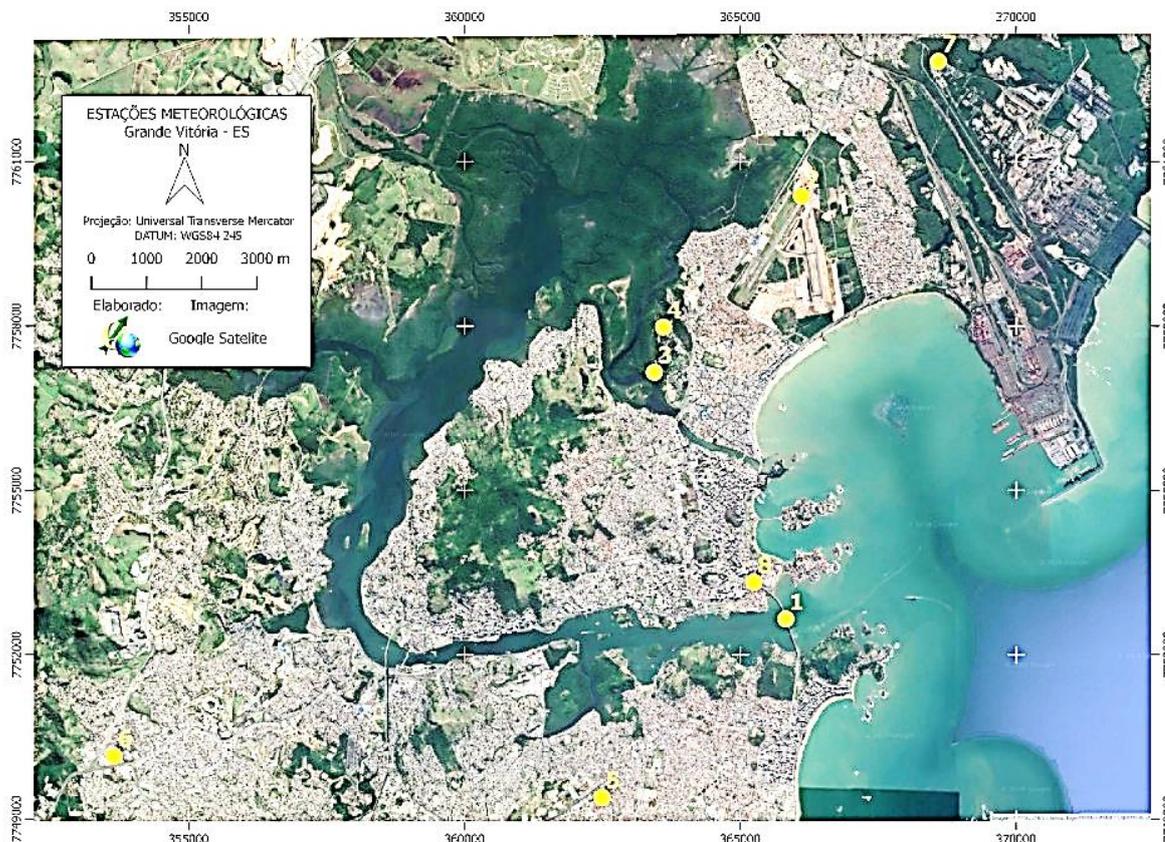


Figura 1: Mapa da RMGV mostrando a localização das estações meteorológicas: (1) Terceira Ponte, entre Vitória e Vila Velha, (2) Aeroporto, (3) GOAMet-UFES, (4) Inmet A612-UFES e (8) IEMA-Enseada, em Vitória, (5) IEMA-Ibes, Vila Velha e (6) IEMA-Ceasa, Cariacica, (7) IEMA-Carapina, Serra.

Fonte: elaborado pelos autores.

Realizou-se teste de validação dos dados, conforme Estévez (2008), principalmente relacionados à seção de limites rígidos: físicos e instrumentais. Por exemplo, campo sem registro, ou nulo, e fora dos intervalos:

$$0 \leq V < 75, \text{ e}$$

$$0 \leq \theta < 360, \text{ onde:}$$

V = velocidade do vento (m.s^{-1}) e

θ = direção azimutal do vento no sentido norte-leste ($^{\circ}$) (Figura 2).

O aplicativo Ventos.py calcula a perda de dados da velocidade e direção do vento relacionada ao período amostral. Além das validações citadas acima, considera a seguinte condição: se no par de dados (velocidade, direção do vento) a velocidade tiver valor zero, a direção é automaticamente descartada. Isso porque se a velocidade

é zero, não há movimento de ar e, portanto, não há direção do vento definida; nesse caso, o vento é classificado como "calmaria", e não há direção associada.

Todas as estações do IEMA apresentaram uma significativa perda de dados, média acima de 30% para a variável direção (Tabela 01). Na estação GOAMet, entre abril e outubro de 2014, os dados foram ignorados devido a erros no valor do parâmetros de correção da direção, verificado no console da Estação.

Medidas e aquisição dos dados

Os dados das estações são de responsabilidade de seus proprietários, assim como a manutenção e verificação visual dos instrumentos. Na estação GOAMet, são realizados mensalmente relatórios e rotinas de inspeção de todos instrumentos, assim como dos dados gravados; as estações do IEMA são de sua propriedade e de sua responsabilidade a sua manutenção; a estação 3ª Ponte é de propriedade da concessionária da ponte, a RODOSOL, que terceiriza sua manutenção, assim como a aquisição dos dados; a estação Inmet-A612 é de propriedade do Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia), que a gerencia; a estação Aeroporto é de propriedade da REDEMet, ligada à Aeronáutica, que a gerencia.

Todos dados foram fornecidos pelos proprietários das estações para este trabalho.

Aplicativo Ventos.py

Existem diversos aplicativos para análises dos diversos parâmetros meteorológicos. Porém, nem todos oferecem os diversos tipos de gráficos e períodos que se deseja e, principalmente, são proprietários e nenhum em língua portuguesa.

Criou-se um aplicativo numa linguagem de programação moderna, Python 2.7, que facilitasse esse trabalho para análise dos ventos e que pudesse ser usado e modificado livremente por outros. O aplicativo foi batizado Ventos e está disponível gratuitamente.

Para efetuar a classificação e plotagem dos diferentes gráficos utilizados para analisar o comportamento do vento, o aplicativo lê um arquivo de texto contendo os dados de velocidade e direção do vento e retorna os gráficos e resultados das operações estatísticas inseridas em seu código, sendo eles: frequência percentual da direção do vento (foi utilizada uma rosa de 16 direções); frequência percentual da velocidade do vento de acordo com as categorias da escala Beaufort (Tabela 2); velocidade média do vento por direção; rosa dos ventos (dados separados por categoria de velocidade e direção, simultaneamente); médias vetorial e escalar da velocidade e direção; e desvio padrão da velocidade.

A escala Beaufort de velocidade dos ventos é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – A escala *Beaufort* de velocidade do vento

Nº	Descrição	Faixa de Velocidade (m.s ⁻¹)
0	Calmaria	0 – 0,2
1	Aragem	0,3 – 1,5
2	Brisa Leve	1,6 – 3,3
3	Brisa Fraca	3,4 – 5,4
4	Brisa Moderada	5,5 – 7,9
5	Brisa Forte	8,0 – 10,7
6	Vento Fresco	10,8 – 13,8
7	Vento Forte	13,9 – 17,1
8	Ventania	17,2 – 20,7
9	Ventania Forte	20,8 – 24,2
10	Tempestade	24,5 – 28,4
11	Tempestade Violenta	28,5 – 32,6
12	Furacão	>32,7

Fonte: (WMO, 2011).

No aplicativo Ventos.py foi inserida também a opção de filtrar os dados para um mês específico, ou ano específico, tornando rápido e eficiente o tratamento estatístico dos dados e o processo de plotagem dos gráficos.

Cálculo da velocidade e direção média do vento

Calcular a direção média do vento não é um problema simples de aritmética. Imagine dois ângulos como na Figura 2. A média aritmética $(350^{\circ}+10^{\circ})/2=180^{\circ}$. Isso dá o ponto intermediário. Quando na verdade a direção média é 0° .

A direção do vento é uma função circular com valores entre 0° e 360° . Sendo assim, recorre-se à trigonometria.

Usou-se dois métodos de cálculo da média do vento, os mesmos usados e recomendados por NOAA (2012), WEBER (1997, p.1) e MARDIA (1972), e também nos aplicativos meteorológicos *Wview* e no *WRPlot*, da *Lakes Environmental Software*, WEBMET (2016).

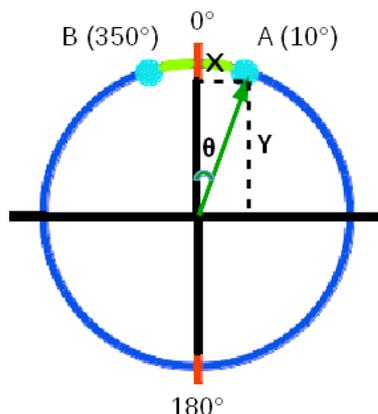


Figura 2: Círculo trigonométrico representando uma maneira de decompor o vetor vento em X e Y, para o cálculo da direção vetor médio do vento.

Fonte: Adaptado pelos autores.

O primeiro método, que denomina-se média escalar, desassocia a velocidade da direção, fazendo com que a velocidade média final seja simplesmente a média aritmética de todas as observações da velocidade do vento. Para definir a direção média do vento, um vetor unitário médio é calculado. Nessa técnica, cada observação do vento é transformada em um vetor unitário (com módulo igual a um), e a direção do vento de cada observação (θ_i) serve como orientação desse vetor. Sendo assim:

$$\bar{\theta} = \arctan\left(\frac{\overline{\text{sen}\Theta}}{\overline{\text{cos}\Theta}}\right) \quad (1), \text{ onde:}$$

θ = ângulo da direção média; e

$$\overline{\text{cos}\Theta} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{cos}\theta_i}{N} \quad (2), \text{ e}$$

$$\overline{\text{sen}\Theta} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{sen}\theta_i}{N} \quad (3), \text{ sendo:}$$

$x_i = \text{sen}\theta_i$ e $y_i = \text{cos}\theta_i$ são as componentes leste-oeste e norte-sul, respectivamente, de cada observação do vento.

Como $-180^\circ < \theta < 180^\circ$, para manter a função circular com valores entre 0° e 360° , quando $\theta < 0$, faz-se:

$$\theta = \theta + 360^\circ \quad (4)$$

A velocidade média aritmética é então calculada por:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (5), \text{ onde:}$$

V_i = velocidade do vento de cada observação.

O segundo método utilizado, que denomina-se média vetorial, utiliza a velocidade como um peso para calcular um vetor médio que caracteriza a direção e velocidade

média do vento. Cada observação do vento (velocidade, direção) é transformada num vetor. Os vetores são então decompostos em suas componentes leste-oeste e norte-sul, respectivamente, levando em conta também a magnitude do vetor, representado pela sua velocidade, isto é, $u_i = V_i \sin \theta_i$ e $v_i = V_i \cos \theta_i$.

$$\overline{\cos \Theta} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cos \theta_i}{N} \quad (6) \quad e$$

$$\overline{\sin \Theta} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \sin \theta_i}{N} \quad (7), \text{ onde}$$

A direção média resultante é calculada pela equação (1).

A magnitude da velocidade média resultante é calculada a partir do Teorema de Pitágoras usando as equações 6 e 7:

$$\bar{V} = (\overline{\sin \Theta}^2 + \overline{\cos \Theta}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Nota-se que esta técnica resultará em uma velocidade média menor do que a média aritmética.

Comparação Ventos.py com o aplicativo Wview

Fez-se a comparação de sua performance com o aplicativo livre meteorológico *Wview* (WVIEW, 2010) usando os dados da estação GOAMet. Essa escolha se deu devido a GOAMet já rodar esse o *Wview* e nos fornecer a média. Porém, não nos fornece os gráficos de um período específico e personalizado.

Conforme observa-se na Tabela 3, o cálculo da velocidade média do vento forneceu resultados bem próximos entre os dois aplicativos, sem diferenças significativas.

Para a direção do vento, por sua vez, na maioria dos meses a diferença ficou dentro do previsto. Considera-se uma variação tolerável de até 45° entre os aplicativos, uma vez que o *Wview* faz uma discretização das direções. Isto é, em vez de calcular a direção média mensal em graus (°), ele usa a notação das 16 direções da rosa dos ventos, sendo cada uma de 22,5°.

O único mês que ficou fora do previsto foi o mês de junho, provavelmente devido a essa discretização. As demais direções se mostraram bem próximas, dentro do erro previsto, assim como a velocidade média.

Para o período total, as médias da direção e velocidade do vento ficaram bem mais próximas do que mês a mês, mostrando que nosso aplicativo é adequado para esse tipo de análise meteorológica.

Tabela 3 – Comparação entre os aplicativos Ventos.py e Wview

Mês	Velocidade Média (m/s)		Direção (°)	
	Ventos.py	Wview	Ventos.py	Wview
Jan	3,32	3,32	357	342
Fev	2,95	2,94	358	346
Mar	2,87	2,86	354	342
Abr	2,43	2,40	264	236
Mai	2,57	2,63	199	190
Jun	2,54	2,50	224	355
Jul	2,62	2,59	310	308
Ago	2,50	2,64	357	345
Set	3,63	3,61	355	338
Out	3,68	3,55	358	358
Nov	3,20	3,22	9	27
Dez	3,45	3,43	6	9
Média	2,99	3,0	354	350

As direções são provenientes das médias escalares, representando onde o vento permanece por mais tempo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As diferenças entre os cálculos ficaram dentro do previsto e a velocidade de processamento e geração de gráficos foi superior no Ventos.py. Posto isso, e por ser de licença livre, foi usado este aplicativo em cada estação para análise dos padrões da direção e velocidade do vento nos ciclos diário, mensal e anual, médias aritméticas e vetoriais, desvio padrão e outras análises.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Velocidades e direções médias do vento

A Tabela 4 apresenta os resultados da velocidade e direção média do vento usando os métodos escalar e vetorial para cada estação, conforme definido na Metodologia, considerando o período amostral completo de cada uma estação.

Tabela 4 – Velocidade e direção média do vento em todo período por estação

Estação	Velocidade aritmética (m.s ⁻¹)	Direção escalar (°)	Velocidade Vetorial (m.s ⁻¹)	Direção Vetorial (°)
Terceira Ponte	5,3	30	2,24	39
Aeroporto	4,0	11	1,41	44
GOAMet	3,0	354	0,93	9
Inmet A612	1,8	352	0,73	22
Vila Velha	2,5	355	0,71	26
Cariacica	1,9	31	0,61	40
Carapina	1,5	355	0,44	31
Enseada	2,2	57	0,90	70

A direção média escalar foi calculada usando as equações (1), (4) e (5), enquanto a direção média vetorial, as Eq.(1), (6) e (7), que levam em consideração a velocidade como a magnitude do vetor. É na direção média vetorial que sopram os ventos mais velozes.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A velocidade média é maior próxima do litoral, como indicado nas estações Terceira Ponte e Aeroporto e cai pela metade a alguns quilômetros continente adentro, como mostram as estações de Cariacica (11 km do litoral) e Inmet (2,2 km do litoral) em relação à estação do Aeroporto.

Os locais com maiores velocidades médias foram Terceira Ponte (5,3 m.s⁻¹); Aeroporto (4,0 m.s⁻¹) e GOAMet (3,0 m.s⁻¹). Por meio dessas médias pode-se inferir sobre o perfil vertical e o cisalhamento nas regiões onde estão localizadas as estações. O anemômetro da Terceira Ponte está instalado numa altitude aproximada de 70 m, na parte frontal da baía de Vitória. O Aeroporto está de frente para o litoral, num local onde não há altos edifícios que possam alterar o fluxo horizontal da direção do ar. A estação GOAMet situa-se numa altitude intermediária (33 m), embora esteja ligeiramente mais afastada do litoral do que as outras duas estações, sua altitude e posição nos ajuda inferir sobre o escoamento do vento na zona norte de Vitória. Da análise da velocidade pode-se notar o cisalhamento do vento nessa região, observando a velocidade entre as estações GOAMet e Inmet, pode-se dizer que o perfil vertical sofre com a topografia e as construções mais altas, tendo grande variação com a altura, acordando com Kaimal (1994). As menores velocidades médias foram em Carapina (1,53 m.s⁻¹) (provavelmente por estar entre construções e árvores); Inmet-A612 (1,80 m.s⁻¹) e Cariacica (1,92 m.s⁻¹), a mais afastada da região litorânea. Segundo o IEMA (2013), os dados da estação de Carapina não são

confiáveis devido à sua má localização, assim como a estação Enseada, em meio a construções.

As médias escalares do vento apontaram uma direção predominante do vento como sendo norte para a maioria das estações (com exceção da estação Enseada, que apresentou média na direção leste-nordeste; Terceira Ponte com média na direção nordeste; e Cariacica com média na direção norte-nordeste). Esse resultado mostra haver uma certa simetria de oscilação do vento ao longo do ciclo diurno (Figura 4), com padrões de circulação ora vindo mais de leste (litoral), ora vindo mais de oeste (continente).

As direções médias vetoriais, por considerarem a velocidade como 'peso' para calcular a direção média final, foram todas mais inclinadas para a direção norte-nordeste e nordeste (com exceção da estação Enseada, que novamente apresentou média na direção leste-nordeste, e da estação GOAMet, que apresentou média na direção norte). Isso se justifica pelo fato de que os ventos oriundos do quadrante leste (vindos do oceano), embora não sejam necessariamente mais frequentes que os de quadrante oeste (vindos do continente), são geralmente mais velozes. Esse resultado pode também ser conferido analisando na Figura 6 e 8.

A estação do Aeroporto foi a que apresentou média vetorial mais próxima da direção nordeste. Esse local, por ser uma área plana, com poucos obstáculos, próximo da praia, sofre com a influência da baía de Camburi, uma região com águas mais rasas do que em mar aberto, portanto, mais quentes. Os ventos do sudeste, podem sofrer desvios para dentro do continente, mudando sua direção para norte-nordeste.

Já a estação Cariacica pode sofrer a influência da continentalidade e da topografia. Sua direção predominante é quase a mesma da rodovia BR 262. Essa rodovia segue por entre pequenos morros na direção nordeste. O ar mais quente, devido ao grande fluxo de veículos, e a topografia podem ser os fatores que levam essa estação a apresentar direção média nordeste.

Velocidade e direções médias para a RMGV

Usando a velocidade aritmética e direção vetorial do vento de cada estação da Tabela 4 (exceto as estações Enseada e Carapina), foram aplicadas as equações da seção Metodologia e calculado a velocidade e direção média do vento das estações estudadas (Figura 3).

Para obter uma média geral da direção e velocidade do vento na RMGV, calculou-se a média das velocidades e direções de todas estações. A média das direções foi norte-nordeste (32°), enquanto a média das velocidades foi $3,1 \text{ m.s}^{-1}$. O desvio padrão da velocidade foi de 1,22.

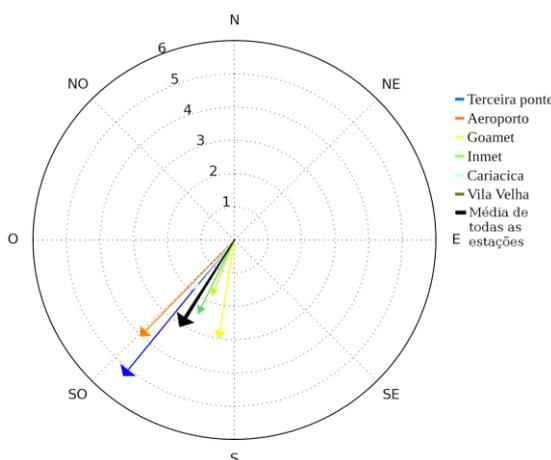


Figura 3: Direções e velocidades médias ($m.s^{-1}$) de cada estação e média de todas, em preto.

Fonte: elaborado pelos autores.

Ciclo diurno das velocidades e direções médias

O ciclo diurno da velocidade do vento mostrou que o horário médio de vento mais intenso é próximo às 14h. Já o horário de vento mais fraco é entre 5h e 6h para todas as estações, conforme pode-se notar na Figura 4.

Isso está de acordo com o ciclo diurno da temperatura, que é mais quente cerca de 1h após a passagem meridiana do Sol. Devido ao aumento da temperatura da superfície e, conseqüentemente, da camada limite atmosférica, correntes de convecção no continente são criadas, gerando um gradiente de pressão positivo terra-mar e dando origem aos ventos mais fortes vindos da direção nordeste, cerca de 1h após esse aquecimento máximo. A pequena variação no horário de pico máximo entre as estações pode ser justificada por diferenças de localização e topografia, por exemplo, ou também pela maior distância do litoral (Cariacica e Vila Velha), fazendo a terra se aquecer mais rápido nessa região.

Por outro lado, a temperatura mínima do ar ocorre cerca de 1h antes do nascer do sol. Isso cria um sistema mais equilibrado, sem ventos, ou com um gradiente de pressão levemente negativo terra-mar, dando origem aos ventos fracos de noroeste, conforme pode-se notar na Figura 4.

O ciclo diurno da direção do vento evidencia que o escoamento atmosférico na RMGV oscila em torno do norte de acordo com o aquecimento diferencial continente-oceano (Figura 4), configurando um ciclo tipicamente litorâneo. Ao longo da noite o vento tende a vir do quadrante noroeste, enquanto ao longo do dia o vento tende a vir do

quadrante nordeste, sendo que os horários de inflexão da direção coincidem com os horários de temperatura máxima e mínima no continente.

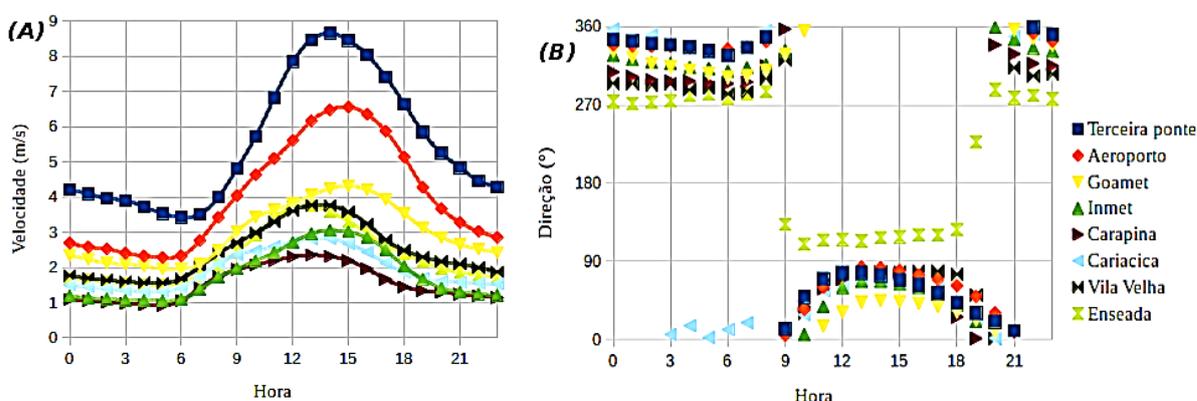


Figura 4: Ciclo diurno das velocidades (A) e direções (B) médias do vento na RMGV.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A direção do vento na estação Cariacica, por ser um local mais distante do litoral (11 km em linha reta), não apresentou o mesmo comportamento que nas demais durante a noite, permanecendo aproximadamente norte-nordeste nesse período. Supõe-se que o gradiente de pressão gerado na região litorânea não é forte o suficiente para induzir movimento de oeste em localidades mais distantes.

A única estação que apresentou comportamento anômalo em relação às demais foi a Enseada. Possivelmente sua má localização (situada entre grandes edificações) tenha desempenhado papel decisivo para gerar esse resultado.

Ciclo anual das velocidades e direções médias

Analisando as velocidades e direções médias por mês para cada estação (Figura 5), percebe-se que entre os meses de Abril a Julho o vento é em média mais lento em todas as estações, alcançando velocidade mínima em junho. Nesses meses a direção média é predominantemente sul, quando frentes frias avançam frequentemente sobre o ES, trazendo ar seco e frio de origem polar.

A partir de agosto o vento aumenta de velocidade média em todas as estações (exceto na GOAMet). Entre os meses de setembro a dezembro a velocidade média se mantém mais alta em todas as estações, sendo que entre setembro e outubro a maioria delas registra a velocidade máxima. Na estação Terceira Ponte a velocidade média máxima foi em Dezembro, seguida da média de Fevereiro (Figura 6 e Tabela 5).

De setembro a março a direção média do vento é entre norte e nordeste para todas as estações (Figura 7). Esse fluxo predominante e constante é decorrente da circulação anticiclônica causada pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), em média situada numa latitude próxima de 30° S entre a América do Sul e a África (BASTOS, FERREIRA, 2000, p. 612), e é a principal forçante no padrão de circulação

da região litorânea do Brasil. Outro fator que exerce papel importante na configuração

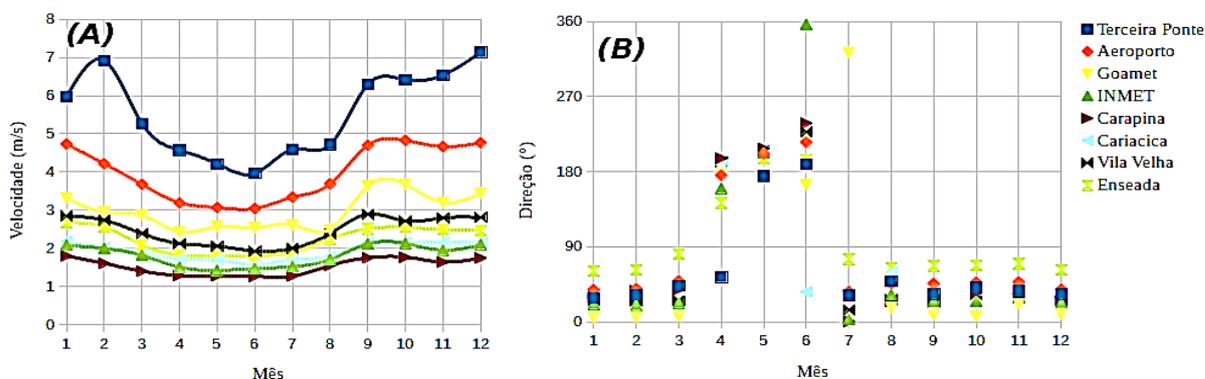


Figura 5: Ciclo anual das velocidades (A) e direções (B) médias do vento na RMGV.

Fonte: Elaborado pelos autores.

deste fluxo é a direção da linha costeira do Espírito Santo. Sobre a média vetorial mensal pesa a oscilação diária nordeste-noroeste exibida na Figura 5 e apresenta oscilação para nordeste devido às maiores velocidades provenientes desse quadrante.

Tabela 5 – Velocidade média mensal e total por estação

Estação/Mês	Terceira Ponte	Aeropor- to	GOAMet	Inmet	Vila Velha	Cariacica	Carapina	Enseada
Janeiro	6,0	4,7	3,3	2,1	2,8	2,2	1,8	2,7
Fevereiro	6,9	4,2	2,9	2,0	2,7	2,0	1,6	2,6
Março	5,3	3,7	2,9	1,8	2,4	1,9	1,4	2,1
Abril	4,6	3,2	2,4	1,5	2,1	1,7	1,3	1,8
Mai	4,2	3,1	2,6	1,4	2,1	1,7	1,3	1,8
Junho	4,0	3,0	2,5	1,5	1,9	1,6	1,3	1,9
Julho	4,6	3,3	2,6	1,5	2,0	1,7	1,3	2,2
Agosto	4,7	3,7	2,5	1,7	2,4	1,8	1,6	2,5
Setembro	6,3	4,7	3,6	2,1	2,9	2,1	1,7	2,5
Outubro	6,4	4,8	3,7	2,1	2,7	2,1	1,8	2,6
Novembro	6,5	4,7	3,2	1,9	2,8	2,1	1,6	2,5
Dezembro	7,1	4,8	3,4	2,1	2,8	2,1	1,7	2,5
Média	5,3	4,0	3,0	1,8	2,5	1,9	1,5	2,2

Frequência da direção do vento

Os dados de direção do vento de cada estação foram separados em 16 direções (22,5° cada) e então contabilizados. As frequências percentuais de cada direção para duas estações são exibidas nas Figuras 6 e 8. A direção mais frequente foi a norte: 21% na Terceira Ponte, 20% na GOAMet, 19% no Aeroporto, 17% em Vila Velha, 16% em Carapina e 14% na INMET. Nas demais estações a direção mais frequente foi: norte-nordeste em Cariacica (21%), nordeste na Enseada (18%).

Todos os locais estudados registraram um certo percentual de ventos oriundos do quadrante sul durante períodos de entrada de frentes frias (Figura 6), havendo uma certa simetria da frequência entre sul-sudeste e sul-sudoeste. Isso se deve à própria oscilação de ventos marítimos e continentais que configuram a circulação atmosférica litorânea, somada ao fenômeno da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), que trazem umidade da Amazônia, a oeste.

As direções norte-nordeste e nordeste também tiveram frequência significativa em todas as estações. Isso pode ser resultado da superposição do fluxo norte causada pela ASAS somado ao fluxo leste da brisa marítima diurna.

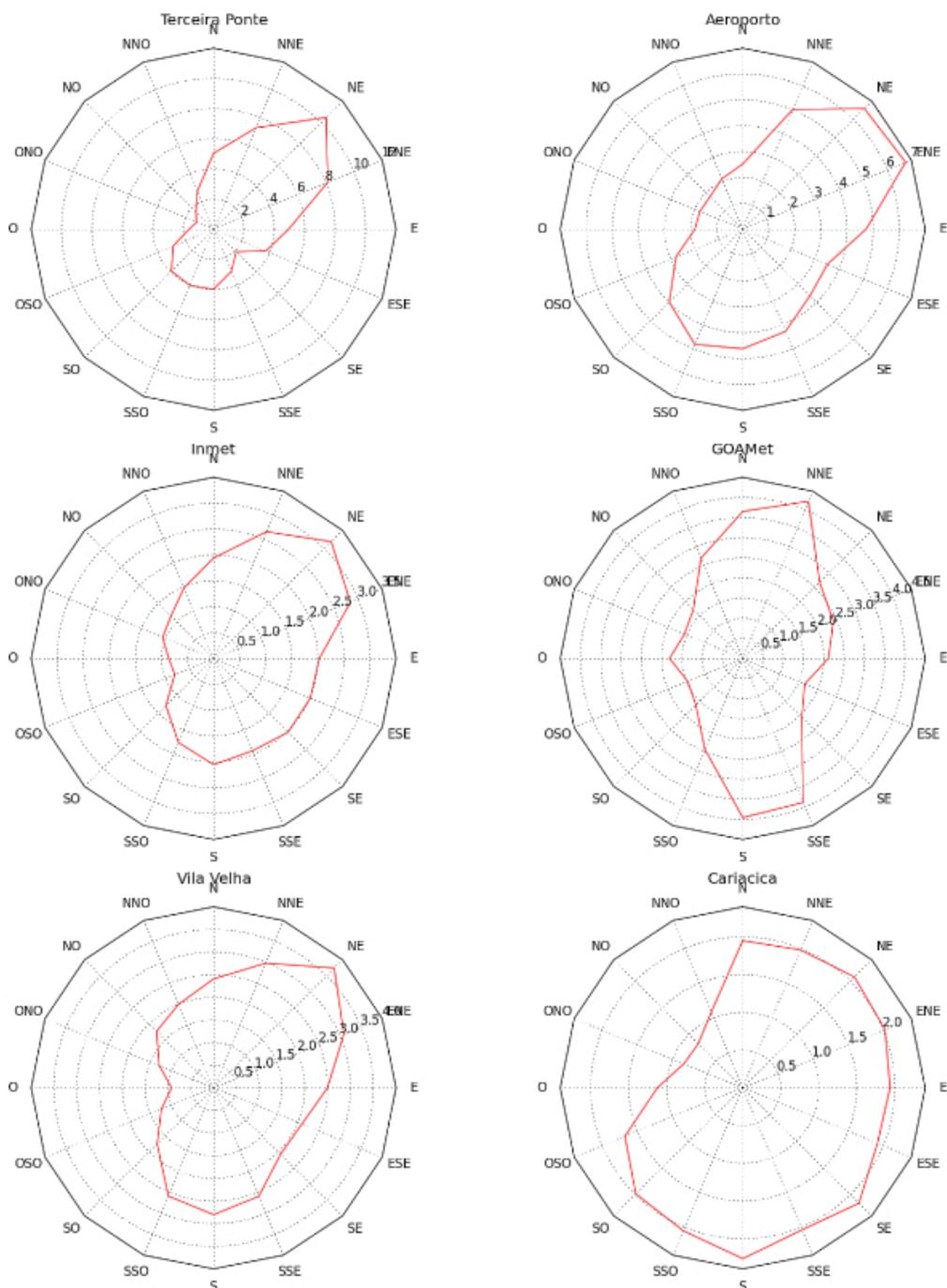


Figura 6: Frequência por direção (%)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Frequência da velocidade na Escala *Beaufort*

Os dados de velocidade do vento foram filtrados e separados de acordo com a escala *Beaufort* (Tabela 2) para cada estação.

Na estação da Terceira Ponte ocorrem as maiores velocidades, chegando até a registrar ocorrência da categoria B8 -Ventania (Figura 7).

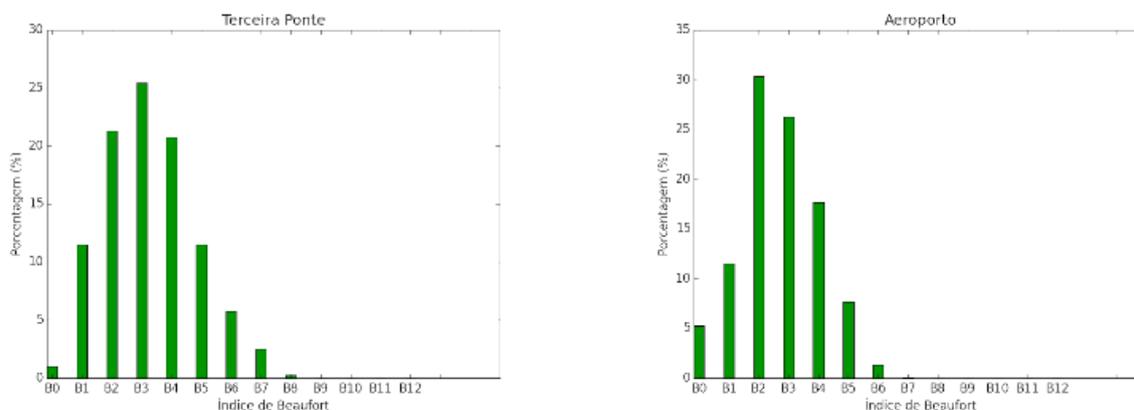


Figura 7: Frequência da velocidade na Escala *Beaufort* para as estações Terceira Ponte e Aeroporto.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Rosa dos ventos

Nestes gráficos, além de considerar a direção do vento, a velocidade do vento foi também filtrada por categorias, de acordo com a escala *Beaufort* (Tabela 2). Os gráficos de duas estações são exibidos na Figura 8, e mostram a predominância de ventos fracos ou fortes de cada direção.

A análise dessas Rosas dos Ventos de todas estações indica a predominância de ventos mais fracos (categoria B1) oriundos nas direções próxima ao oeste, e predominância de ventos mais fortes (categorias acima de B3) nas direções próximas ao leste.

Este resultado é complementado pela velocidade média do vento por direção, exibidas na Figura 6, e reforça as discussões da seção anterior.

Em geral, os resultados complementam e justificam as considerações colocadas até aqui.

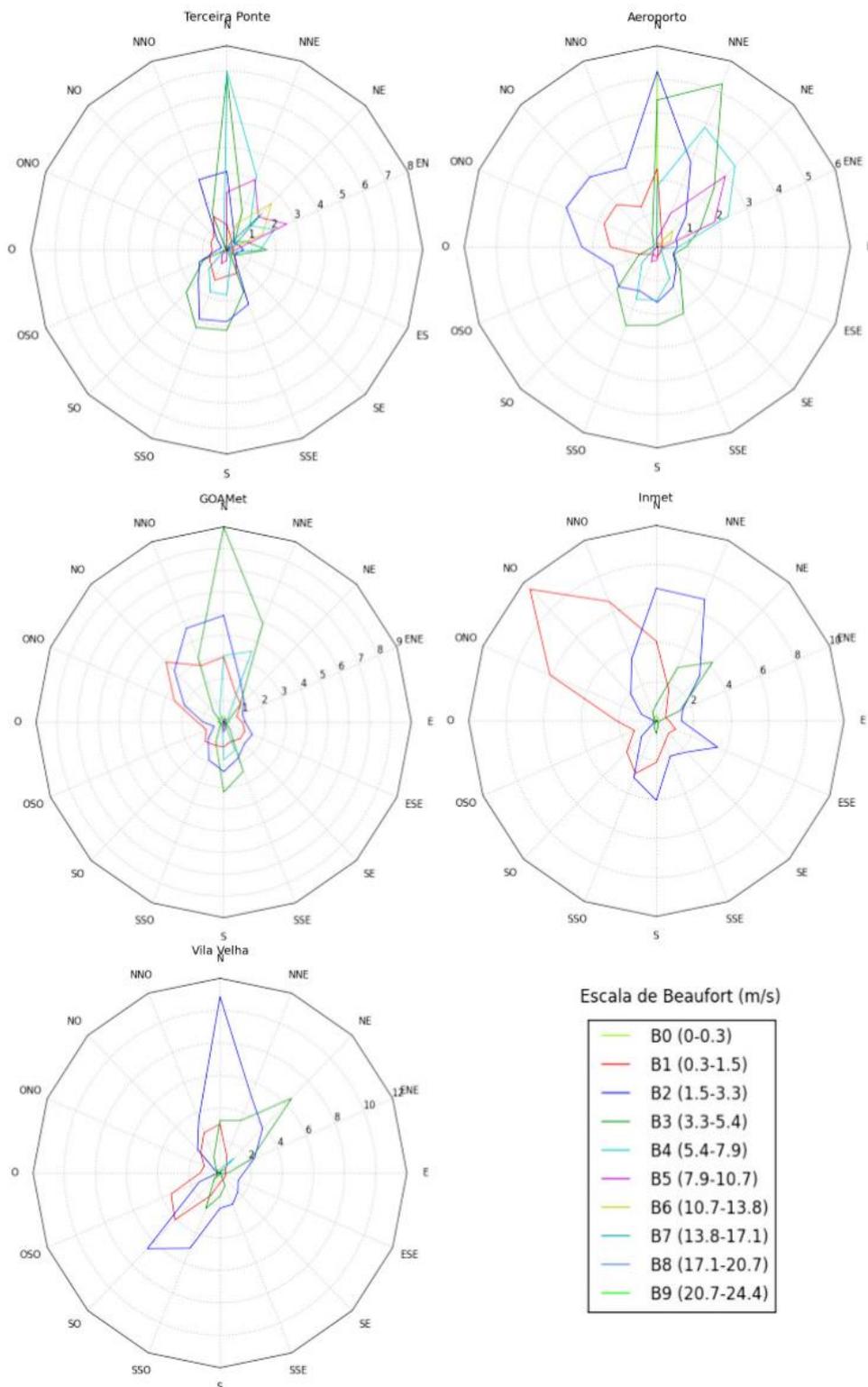


Figura 8: Rosa dos Ventos na Escala Beaufort. Valores percentuais em cada direção.

Fonte: elaborado pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que a direção predominante na RMGV, em relação à frequência de ocorrência, está mais próxima do norte, enquanto que a média, de onde vêm os ventos mais fortes, está ao norte-nordeste. As rosas dos ventos também nos mostram essa predominância, assim como os ventos mais fracos vindos do oeste.

A velocidade média é maior próxima no litoral (entre 4 e 5 m.s⁻¹) e cai pela metade a alguns quilômetros continente adentro, como mostram as estações de Cariacica (1,9 m.s⁻¹) e Inmet (1,8 m.s⁻¹).

O ciclo diurno da direção do vento evidencia que o escoamento atmosférico na RMGV oscila em torno do norte de acordo com o aquecimento diferencial continente-oceano, configurando um ciclo tipicamente litorâneo. Ao longo da noite, o vento tende a ser fraco e vir do quadrante noroeste, enquanto ao longo do dia o vento tende a se intensificar, vindo do quadrante nordeste. Sendo que os horários de inflexão da direção coincidem com os horários de temperatura máxima (à tarde) e mínima (na madrugada) no continente.

Em relação ao ciclo anual, o vento sul é predominante entre os meses de abril e junho, quando também a velocidade alcança valores mais baixos. Os ventos mais velozes sopram em setembro e outubro, quando a direção predominante é norte-nordeste e continuam no verão, um pouco menos intensos.

Calculou-se um valor de referência para caracterizar o vento médio da RMGV. Obteve-se média de todas cinco estações (exceto Carapina e Enseada) para a velocidade (3,1 m.s⁻¹) e direção norte-nordeste (média de 32°). Essa velocidade é considerada economicamente inviável para gerar energia eólica e está abaixo do que prevê para Vitória o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE, 2001).

Como os ciclos diurno e anual dos ventos variam relativamente, tanto em velocidade como em direção, fatores fundamentais na dispersão de poluentes, juntamente com a chuva, supõe-se que boa parte dos poluentes da RMGV pode estar indo para o mar. Porém, os relatórios do IEMA não mostram essa queda (IEMA, 2010), (IEMA, 2011), (IEMA, 2012) (IEMA, 2013). Isso pode ser explicado pelo aumento da produção das usinas siderúrgicas de Ponta de Tubarão, assim como aumento da frota e circulação de automóveis e intensificação da construção civil.

Um novo padrão da dispersão de aerossóis na atmosfera deve ser feito, levando em conta essas variações locais.

AGRADECIMENTOS

À Proex-UFES, aos colaboradores do GOA, ao GNU/Linux e aos desenvolvedores de aplicativos livres.

REFERÊNCIAS

ABBOUD, H.J.; SILVEIRA, A.B.; SANTOS, J.M.; PEREIRA, M.M.R.; REIS JR., N.C. *Modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos em regiões urbanas de relevo complexo baseada nas equações de conservação*. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING (ENCIT 2004), Rio de Janeiro, Nov. 29 - Dec. 03, 2004.

AHRENS, C.D. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Ninth Edition. Brooks/Cole/Cengage Learning. Boston, 2009.

AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J.; EOLICA, C. S. E. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Ministério de Minas e Energia Eletrobras. Brasília, 2001.

ASPE – AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. *Atlas Eólico do Espírito Santo 2009*. Disponível em: <<http://www.aspe.es.gov.br/web/atlaseolico/index.htm>>. Acesso em: 15 de setembro, 2015.

BASTOS, C.; FERREIRA, N. *Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul*. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Rio de Janeiro, 2000, Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000. p. 612-619.

COSTA, G.B.; LYRA, R.F.F. *Análise dos padrões de vento no estado de Alagoas*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.27, n.1, 31 - 38, 2012 .

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P. *Procedimientos de Validación de Datos de Estaciones Meteorológicas Automáticas. Aplicación a la Red de Información Agroclimática de Andalucía*. II JORNADAS DE GESTORES Y USUARIOS DE REDES AGROMETEOROLÓGICAS. Murcia. Dezembro, 2008. Disponível em: www.juntadeandalucia.es. Acesso em: 20 de outubro, 2016.

HEMA (INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). *Relatório Anual da Qualidade do Ar da Grande Vitória 2010*. Disponível em www.iema.es.gov.br. Acessado em: 20 julho, 2017.

HEMA (INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). *Relatório Anual da Qualidade do Ar da Grande Vitória 2011*. Disponível em www.iema.es.gov.br. Acessado em: 20 julho, 2017.

HEMA (INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). *Relatório Anual da Qualidade do Ar da Grande Vitória 2012*. Disponível em www.iema.es.gov.br. Acessado em: 20 julho, 2017.

HEMA (INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). *Relatório Anual da Qualidade do Ar da Grande Vitória 2013*. Disponível em www.iema.es.gov.br. Acessado em: 20 julho, 2017.

KAIMAL, J.C.; FINNIGAN, J.J. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, New York, 1994.

MARDIA, K. V.: *Statistics of Directional Data*, London, Academic Press, 1972.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, 1304. 2008.

MATTIUZZI, H. V.; MARCHIORO, E. O comportamento dos ventos em Vitória (ES): a gestão e interpretação dos dados climatológicos. *Revista Geonorte*, edição especial, v. 2, n. 4, p. 983-993, 2012.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Dept. of Commerce National Weather Service, 2012. <http://www.ndbc.noaa.gov/wndav.shtml>, Acesso em: 20 dezembro, 2016.

RATTO, G.E.; VIDELA, F.; MARONNA, R.; FLORES, A.; DÁVILA, F.P. Air Pollutant Transport Analysis Based on Hourly Winds in the City of La Plata and Surroundings, Argentina. *Water Air Soil Pollut*, V 208, p. 243 – 257. 2010

STULL, R.B. *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.

TEEL, M. Using Wview, *Linux Journal*, V. 2010, Issue 196, Article Nº 2, 2010. Disponível em: <https://www.linuxjournal.com/article/10782>. Acessado em: 20 de outubro, 2016.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.C.L. do. *Meteorologia Descritiva. Fundamentos e aplicações brasileiras*. São Paulo, Nobel, 1984, 374p.

WEBMET, *Source for all things meteorological*, 2016. Disponível em www.webmet.com, Acesso em 20 dezembro, 2016. Disponível em wmo.com. Acessado em 20 outubro, 2016.

WMO (World Meteorological Organization). *Manual on Codes. Annex to the WMO Technical Regulations. Part A – Alphanumeric Codes*. Volume I.1. 2011. Disponível em wmo.com. Acessado em 20 outubro, 2016.

WMO/TD-No.341, CALCULATION OF MONTHLY AND ANNUAL 30-YEAR STANDARD NORMALS, March 1989.

ANÁLISE DA FREQUÊNCIA E DO PADRÃO DOS VENTOS NA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA ENTRE 2006 e 2016.



WEBER, R.O. Estimators for the Standard Deviation of Horizontal Wind Direction, American Meteorological Society, V,36, 1997.

Submetido em: 16/10/2017
Aceito para publicação em: 28/03/2018