

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DO POTENCIAL EÓLICO EM MINAS  
GERAIS A PARTIR DO *GLOBAL FORECAST SYSTEM (GFS)***

**RAFAEL ARCANJO DE OLIVEIRA FILHO**

**Itajubá – Minas Gerais**

**2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**RAFAEL ARCANJO DE OLIVEIRA FILHO**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DO POTENCIAL EÓLICO EM MINAS  
GERAIS A PARTIR DO *GLOBAL FORECAST SYSTEM (GFS)***

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá.

**Área de Concentração:** Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Linha de Pesquisa:** Clima e Sustentabilidade.

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Vanessa Silveira Barreto Carvalho

**Coorientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Michelle Simões Reboita

**Itajubá – Minas Gerais**

**2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**RAFAEL ARCANJO DE OLIVEIRA FILHO**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DO POTENCIAL EÓLICO EM MINAS  
GERAIS A PARTIR DO *GLOBAL FORECAST SYSTEM (GFS)***

Dissertação aprovada pela banca examinadora em  
05 de março de 2020, conferindo ao autor o título  
de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e  
Recursos Hídricos.

**Banca Examinadora:**

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Silveira Barreto Carvalho (Orientadora)  
Universidade Federal de Itajubá

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Michelle Simões Reboita (Coorientadora)  
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu  
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Luiz Cláudio Gomes Pimentel  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Itajubá – Minas Gerais**

**2020**

*“Dizem que quando é para dar certo,  
até os ventos sopram a favor.”*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, essencialmente, a Deus e São Rafael Arcanjo pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos ao longo da minha vida. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer. Obrigado por colocarem a minha frente sempre o melhor caminho a seguir.

Agradeço a minha família e amigos que conquistei ao longo de vinte e cinco anos. Sou grato pelas orações, preocupações e momentos compartilhados a cada retorno meu ao Norte de Minas. Agradeço, em especial, meus colegas e amigos de apartamento, Rafael Nobre e Wender Portugal, por me receberem tão bem em Itajubá, e terem sido parceiros durante todo este tempo.

Agradeço a minha orientadora Prof<sup>a</sup> Vanessa Silveira e minha coorientadora, Prof<sup>a</sup> Michelle Reboita. Obrigado pela orientação, competência, profissionalismo e dedicação tão importantes. Não foi fácil, para um Engenheiro Civil, mergulhar numa área tão difícil e diferente de tudo que já tinha visto, mas graças a paciência e disponibilidade de vocês, acredito que consegui assimilar o que foi proposto.

Agradeço a Tatiana Amaro, Bruna Andreлина, Robson Passos, Vitor Hugo Marrafon, Michel Yasuyuki, Wilson Silveira, e todos os alunos e egressos do curso de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá, que minimizaram bastante as minhas dúvidas diárias e me ajudaram muito nos processos relacionados à computação. O agradecimento é extensivo aos meus amigos Murilo Ruy, Ana Flávia Martins, Rafael Reis, Camila Welerson, Gabriel Machado e todos os meus colegas de mestrado. Vocês fizeram o processo ser mais leve e fácil.

Agradeço aos professores que ministraram as disciplinas que cursei. Todos foram fundamentais para meu crescimento e maturidade dentro do mestrado. Em especial, agradeço ao Prof<sup>o</sup> Arcilan Trevenzoli por todo apoio nas minhas dúvidas sobre o conteúdo e principalmente pela liberação do Laboratório de Instrumentação Meteorológica, onde parte das análises foi realizada. Agradeço aos membros do Colegiado do MEMARH: aprendi muito com todos vocês! Agradeço aos membros da VI Comissão Organizadora do VI Seminário de Recursos Naturais pela diversão, pela oportunidade de aprender tanto em tão pouco tempo de convivência, pelo respeito e pelo carinho que sempre tiveram comigo.

Obrigado à Universidade Federal de Itajubá e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Diversas regiões do Brasil têm enfrentado períodos de secas intensas nas últimas décadas. Dado que a atual matriz energética do país é predominantemente composta por usinas hidrelétricas, uma redução na precipitação pode diminuir o nível dos reservatórios comprometendo sua produção. Portanto, o governo brasileiro busca a diversificação da produção de energia com outras fontes. A introdução de novas fontes renováveis, como a energia eólica e solar, requer um estudo detalhado sobre as condições meteorológicas locais, geralmente por meio de análise de dados históricos. No entanto, várias áreas no Brasil não são cobertas por estações meteorológicas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a capacidade do *Global Forecast System* (GFS) de representar o vento, no Estado de Minas Gerais (MG), que possui 79,5% da produção de energia associada aos recursos hídricos. Para a maioria das áreas, os valores da velocidade do vento a 10 metros da análise GFS foram próximos aos registrados pelas estações meteorológicas. Os resultados da análise do vento a 10 e 100 metros revelam intensidades maiores no norte do Estado, região onde também são registradas as maiores densidades de potência (aproximadamente  $150 \text{ Wm}^{-2}$  no inverno e na primavera). Sabendo que o norte do Estado é caracterizado por baixas taxas de precipitação, principalmente, durante o inverno e primavera, estações quando os ventos, por sua vez, são mais intensos nesta área, os resultados do modelo indicam que a região pode ser classificada na Classe 1, levando em consideração a intensidade e a densidade de potência do vento. Desta forma, possui condições baixas para a geração de energia eólica, entretanto pode ser utilizada como fonte complementar à geração de hidroeletricidade.

**Palavras-chave:** Energia renovável. Densidade de Potência. Ventos.

## ABSTRACT

Several regions of Brazil have been experiencing periods of intense drought in the last decades. Given the current energy matrix of the country is predominantly produced by hydropower plants, a reduction in the reservoir flow can compromise its production. Therefore, the Brazilian government has seeking the diversification of energy production with other renewable sources. The introduction of new renewable sources such as wind and solar power requires a detailed study about local weather conditions usually through historical data analysis. However, several areas in Brazil are not covered by weather station. In this context, this studies aims to assess the ability of the Global Forecast System (GFS) to represent wind , on the state of Minas Gerais (MG), which has 79.5% of energy production associated with water resources. For most areas, 10 meters wind speed values of the GFS analysis registered by the weather stations were very close to that registered by the weather stations GFS analysis. Considering the 10 and 100 meters, the winds are more intense in the north of the state, a region where the highest power densities are also recorded (approximately  $150 \text{ Wm}^{-2}$  in winter and spring). Knowing that the north of the state is characterized by low precipitation rates, mainly during winter and spring, seasons when the winds, in turn, are more intense in this area, the results of the model indicate that the region can be classified in Class 1, taking into account the intensity and power density of the wind. Thus, it has low conditions for the generation of wind energy; however it can be used as a complementary source to the generation of hydroelectricity.

**Keywords:** Renewable energy. Wind power density. Winds.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Matriz Energética de Minas Gerais (Ano Base: 2018). .....	18
<b>Figura 2</b> - Evolução na demanda externa de energia (Minas Gerais). .....	19
<b>Figura 3</b> – Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais .....	20
<b>Figura 4</b> - Precipitação (mm) média sazonal e anual em Minas Gerais no período de 1998 a 2012: a) verão, b) outono, c) inverno, d) primavera e e) média do acumulado anual. ....	22
<b>Figura 5</b> - Taxas de variação significativa das temperaturas mínima e máxima para o período de 1961 a 2009.....	24
<b>Figura 6</b> - Climatologia sazonal do vento a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP8.5 onde (a) verão: futuro próximo – presente (b) outono: futuro próximo – presente (c) inverno: futuro próximo – presente (d) primavera: futuro próximo – presente. As cores indicam a magnitude do vento.....	25
<b>Figura 7</b> - Densidade de potência (a) Verão: futuro próximo – presente (b) Outono: futuro próximo – presente (c) Inverno: futuro próximo – presente (d) Primavera: futuro próximo – presente. ....	26
<b>Figura 8</b> - Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento da rugosidade ( $z_0$ ) é a altura onde a velocidade é nula. ....	27
<b>Figura 9</b> – Perfil do vento à montante e no topo de colinas. ....	27
<b>Figura 10</b> - Curva de potência de uma turbina eólica do tipo Vestas V90/2000. ....	29
<b>Figura 11</b> - Frequência de ocorrência de vento baseada na Distribuição de Weibull, .....	30
<b>Figura 12</b> – Esquema simplificado do escoamento de ar em uma turbina eólica. ....	30
<b>Figura 13</b> - Distribuição de $C_p$ em função de $v_3/v_1$ .....	31
<b>Figura 14</b> - Localização da área de estudo .....	35
<b>Figura 15</b> - Localização do Estado de MG em relação ao Brasil, distribuição espacial de estações meteorológicas e topografia (metros) de MG. ....	37
<b>Figura 16</b> - Anomalias de precipitação (mm) no mês de janeiro para o período de 1979 a 2019 na região Sudeste. ....	40
<b>Figura 17</b> - Temperatura média sazonal ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 metros. ....	45
<b>Figura 18</b> - Umidade relativa média do ar sazonal (%) a 2 metros. ....	46
<b>Figura 19</b> - Intensidade média sazonal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 10 metros. ....	48
<b>Figura 20</b> - Intensidade média sazonal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 100 metros. ....	49
<b>Figura 21</b> – Diferenças entre as intensidades do vento, período seco (2014/2015) – período úmido (2016) a 10 e 100 metros. ....	50



<b>Figura 22</b> - Rosas dos ventos, de 2013 a 2017, para (A) Belo Horizonte, (B) Curvelo e (C) Formiga. Considerando (1) dados observados, (2) dados GFS (10 metros) e (3) dados GFS (100 metros). A legenda está em $\text{ms}^{-1}$ .	52
<b>Figura 23</b> – Perfil médio mensal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ).	54
<b>Figura 24</b> - Perfil médio diurno do vento.	55
<b>Figura 25</b> - Distribuição de Weibull para a velocidade do vento (dados observados e GFS) para todo o período considerado (2013 a 2017).	58
<b>Figura 26</b> – Densidade de potência ( $\text{Wm}^{-2}$ ) a 100 m, de 2013 a 2017. Coluna esquerda: dp sem considerar cp. Coluna direita: dp considerando o valor máximo de cp (59,3% pelo limite de Betz (MANWELL et al., 2009)).	61
<b>Figura 27</b> - Rosas do vento - Belo Horizonte (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	75
<b>Figura 28</b> - Rosas dos ventos - Curvelo (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	76
<b>Figura 29</b> - Rosas dos ventos - Diamantina (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	77
<b>Figura 30</b> - Rosas dos ventos - Formiga (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	78
<b>Figura 31</b> – Rosas dos ventos – Juiz de Fora (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	79
<b>Figura 32</b> - Rosas dos ventos - João Pinheiro (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	80
<b>Figura 33</b> - Rosas dos ventos - Montes Claros (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	81
<b>Figura 34</b> – Rosas dos ventos – São João Del Rei (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	82
<b>Figura 35</b> - Rosas dos ventos - Timóteo (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	83
<b>Figura 36</b> – Rosas dos ventos – Teófilo Otoni (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	84
<b>Figura 37</b> – Rosas dos ventos – Uberlândia (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	85
<b>Figura 38</b> - Rosas dos ventos - Varginha (10 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	86
<b>Figura 39</b> – Rosa do vento – Belo Horizonte (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	87
<b>Figura 40</b> - Rosa do vento – Curvelo (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	87
<b>Figura 41</b> - Rosa do vento – Diamantina (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	88
<b>Figura 42</b> - Rosa do vento – Formiga (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	88
<b>Figura 43</b> - Rosa do vento – Juiz de Fora (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	89
<b>Figura 44</b> - Rosa do vento – João Pinheiro (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	89
<b>Figura 45</b> - Rosa do vento – Montes Claros (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	90
<b>Figura 46</b> - Rosa do vento – São João Del Rei (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	90
<b>Figura 47</b> - Rosa do vento – Timóteo (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	91
<b>Figura 48</b> - Rosa do vento – Teófilo Otoni (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	91
<b>Figura 49</b> - Rosa do vento – Uberlândia (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	92
<b>Figura 50</b> - Rosa do vento – Varginha (100 metros). Legenda em $\text{ms}^{-1}$ .	92
<b>Figura 51</b> - Perfil médio mensal do vento.	93
<b>Figura 52</b> - Perfil médio mensal do vento.	94

<b>Figura 53</b> - Perfil médio diurno do vento. ....	95
<b>Figura 54</b> - Perfil médio diurno do vento. ....	96

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Geração de energia elétrica por fonte renovável (Ano base: 2018).....	16
<b>Tabela 2</b> - Produção de energia por região (2016 - 2018). .....	17
<b>Tabela 3</b> - Modelos de aerogeradores e valores de Cp.....	32
<b>Tabela 4</b> - Classificação da densidade de potência do vento (Padrão Internacional). .....	33
<b>Tabela 5</b> - Classificação da densidade de potência do vento a 100 metros. ....	34
<b>Tabela 6</b> - Variáveis GFS utilizadas.....	36
<b>Tabela 7</b> - Identificação das Estações Automáticas .....	37
<b>Tabela 8</b> - Resultados da validação da temperatura média do ar (°C). .....	42
<b>Tabela 9</b> - Resultados da validação da umidade relativa média do ar (%). .....	43
<b>Tabela 10</b> – Direção predominante do vento. ....	51
<b>Tabela 11</b> – Valores dos parâmetros k e c, onde k indica o formato de distribuição e c indica a velocidade média. ....	56
<b>Tabela 12</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Verão – DJF). .....	71
<b>Tabela 13</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Outono - MAM). ..	71
<b>Tabela 14</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Inverno - JJA). .....	72
<b>Tabela 15</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Primavera - SON). .....	72
<b>Tabela 16</b> – Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Verão - DJF). .....	73
<b>Tabela 17</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Outono – MAM), .....	73
<b>Tabela 18</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Inverno – JJA). .....	74
<b>Tabela 19</b> - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Primavera – SON). .....	74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	13
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
3.1 A matriz energética nacional .....	16
3.2 Climatologia de Minas Gerais: cenário atual e tendências futuras .....	20
3.3 O vento e a geração eólica .....	26
3.3.1 <i>Energia Eólica: Conceito e Aspectos Socioambientais</i> .....	28
3.3.2 <i>Avaliação do Potencial Eólico</i> .....	28
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
4.1 Dados utilizados e análises realizadas .....	35
4.2 Avaliação do potencial eólico .....	40
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
5.1 Análise da representatividade das variáveis temperatura e umidade relativa .....	42
5.2 Análise da distribuição espacial dos dados do GFS .....	44
5.3 Análise da relação precipitação x intensidade do vento .....	49
5.4 Análise da direção predominante do vento .....	50
5.5 Variabilidade mensal e diurna .....	53
5.6 Análise da distribuição de Weibull .....	56
5.7 Densidade de potência (dp) .....	60
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	62
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	64
<b>APÊNDICE A</b> .....	71
<b>APÊNDICE B</b> .....	75
<b>APÊNDICE C</b> .....	93
<b>APÊNDICE D</b> – Tutorial: WRPLOT <i>View x Google Earth</i> .....	97

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Em virtude do relevo acidentado e da abundância de recursos hídricos, o Brasil construiu sua matriz energética, ao longo de décadas, baseada principalmente na produção de energia hídrica. Além disso, por se tratar de uma fonte renovável de energia, diversas políticas públicas nacionais incentivaram a construção de hidrelétricas ao longo do território brasileiro. Entretanto, com o crescimento da população e o processo de urbanização, situações com déficits de energia passaram a ser registrados, e por conta disso, foram criados incentivos públicos que possibilitaram a implantação das primeiras usinas nucleares e termoeletricas (ELETROBRÁS, 2019). Posteriormente, por conta do impacto ambiental, custos elevados e insegurança quanto ao uso de combustíveis fósseis (como óleo, gás e carvão) e elementos radioativos, o governo brasileiro, em 2002, por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) começou a incentivar estudos e o desenvolvimento da geração de energia eólica, onde a velocidade de escoamento do ar é utilizada para a produção de eletricidade (BRASIL, 2002). Desta forma, o Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) começou a diversificar-se e passou a potencializar as características ambientais e climáticas regionais.

Desde então, segundo a Eletrobrás (2019), o Proinfa começou a universalizar o acesso à energia elétrica, principalmente com a construção de parques eólicos na região Nordeste e Sul do país devido às condições atmosféricas e topografia que conferem a estas regiões ventos com variabilidade e intensidade favoráveis à conversão da energia cinética em energia elétrica. Contudo, com o aquecimento global e as mudanças climáticas, alterações no regime de precipitação do Brasil têm sido registradas, causando prejuízos graves à produção de energia hídrica. O Estado de Minas Gerais (MG), por exemplo, privilegiado por seus recursos hídricos, tem sido atingido frequentemente com déficits de precipitação (COELHO et al., 2015a). A diminuição na vazão de rios leva a diminuição dos níveis dos reservatórios, impedindo e dificultando o abastecimento de água e a produção de energia elétrica.

Embora MG também seja o quarto estado em geração de energia, devido à alta demanda a produção ainda é insuficiente; em 2017, por exemplo, 54,3% da eletricidade foram geradas em outros estados; foi registrada uma queda na produção em 2014 e 2015 devido a um período intenso de seca (COELHO et al., 2015). A produção de eletricidade no estado corresponde a 7,35% da produção nacional total, basicamente de três fontes: hidrelétrica (79,0%), térmica (19,2%) e solar (1,80%). Não há eletricidade gerada por fontes eólicas,

apesar da existência de um parque eólico na cidade de Gouveia (Vale do Jequitinhonha) paralisado por razões financeiras (CEMIG, 2017; EPE, 2018). A grande variabilidade sazonal e interanual nas taxas de precipitação não é um fator positivo para a produção de energia e, de acordo com o Relatório de Síntese AR5 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), as variações climáticas apontam para a intensificação de extremos climáticos, colocando o sistema hidrelétrico em risco. É importante enfatizar que a seca de 2014 e 2015 levou ao racionamento de energia e água em várias áreas da região sudeste (RIBEIRO, 2017), onde 42,13% da população brasileira vivem (IBGE, 2010) e onde o estado de MG está localizado.

Coelho et al. (2015b) analisaram a estiagem ocorrida na região Sudeste e constataram que 2014 foi o ano mais seco entre 1961 e 2014, devido ao expressivo déficit de precipitação. Em 2017, outra crise hídrica com grandes proporções atingiu o norte e noroeste de Minas Gerais, levando a diminuição nos níveis d'água de importantes rios no Estado. Como consequência, diversos municípios decretaram Estados de emergência hídrica, registrando problemas com o abastecimento de água para consumo, além de alertarem as usinas hidroelétricas devido às baixas vazões dos reservatórios (RIBEIRO, 2017). O rio São Francisco e o rio Jequitinhonha, por exemplo, fundamentais na geração de vazões para operação das Usinas Hidrelétricas de Três Marias e Irapé, registraram historicamente os níveis mais baixos em 2017 (ANA, 2018), o que acarreta como consequência, uma diminuição na geração de energia elétrica.

Os cenários de mudanças climáticas, aliados a outros fatores como o uso e ocupação do solo e o crescimento populacional, indicam que o número de dias secos deve aumentar e que o intervalo entre episódios de seca extrema deve diminuir no futuro, indicando a necessidade de estudos que viabilizem a diversificação da matriz energética no Estado, que hoje é basicamente hídrica e térmica, com uma participação ainda muito restrita da fonte solar. A diversificação deveria priorizar estudos em fontes renováveis, como a eólica e solar, em detrimento da expansão das termoelétricas, que possuem alto potencial poluidor. Vale ressaltar que as fontes renováveis podem ser utilizadas de forma complementar à fonte hídrica, dando maior segurança ao sistema elétrico (TIEZZI, 2015). Sabendo que a aprovação e instalação de projetos de energia eólica exigem estudos iniciais com pelo menos cinco anos de dados observados, por estações meteorológicas, nos níveis de 50, 70 e 100 m (CANCINO-SOLORZANO et al., 2009), que em geral, são escassos no Brasil, o uso dos resultados das análises de modelos atmosféricos podem auxiliar nos processos de tomada de decisão.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a habilidade do uso do *Global Forecast System (GFS)* em estimativas do potencial eólico em Minas Gerais.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Definir, por meio de resultados das análises do GFS, as condições meteorológicas predominantes no Estado no período de 2013 a 2017.
- Analisar padrões associados à variabilidade espacial, sazonal e diurna do vento.
- Analisar o potencial eólico médio sazonal do Estado a 100 metros.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 A matriz energética nacional

A produção e dependência de energia elétrica, segundo Tan e Zhi (2016), são influenciadas por diferentes fatores como o clima e a topografia de cada local. No Brasil, por exemplo, em função da grande disponibilidade de recursos hídricos, o país desenvolveu diversos sistemas de fornecimento de água, para o abastecimento humano, uso pela indústria, pela agricultura e para geração de energia elétrica. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019) em dados divulgados no Balanço Energético Nacional (BEN), a produção de energia elétrica por fontes renováveis alcançou 495.290 GWh no Brasil, sendo aproximadamente 80% deste valor gerados por fonte hídrica (Tabela 1).

**Tabela 1** - Geração de energia elétrica por fonte renovável (Ano base: 2018).

Fonte				
Hídrica	Eólica	Solar	Lenha	Outras
Geração GWh (%)				
388.971 (78,53)	48.475 (9,78)	3.461 (0,70)	2.360 (0,48)	52.023 (10,50)
<b>Geração Total GWh (%)</b>				<b>495.290 (100)</b>

Fonte: Adaptado da EPE (2019)

A Tabela 1 revela também que fontes renováveis, como a eólica e solar, ainda são pouco utilizadas na geração de eletricidade quando comparadas à fonte hídrica. Em 2018, o Brasil produziu, ao todo, 601.396 GWh de energia elétrica, sendo que a fonte hídrica representou cerca de 64,7% desse total. Dentre as regiões brasileiras, a Sudeste possui maior produção de energia seguida da Região Sul. A produção de energia, na Região Sudeste, apresentou um decréscimo, saindo de 31,3% para 28,6% entre 2017 e 2018; e na Região Sul, um decréscimo saindo de 25,1% para 24,4% no mesmo período, conforme apresentado na Tabela 2. A Região Nordeste se destaca como maior produtora de energia elétrica por fonte solar (2.107 GWh) e eólica (42.448 GWh) e segunda maior por fonte térmica (33.733 GWh). A Região Sul destaca-se como maior geradora por fonte hidráulica (125.918 GWh) e segunda



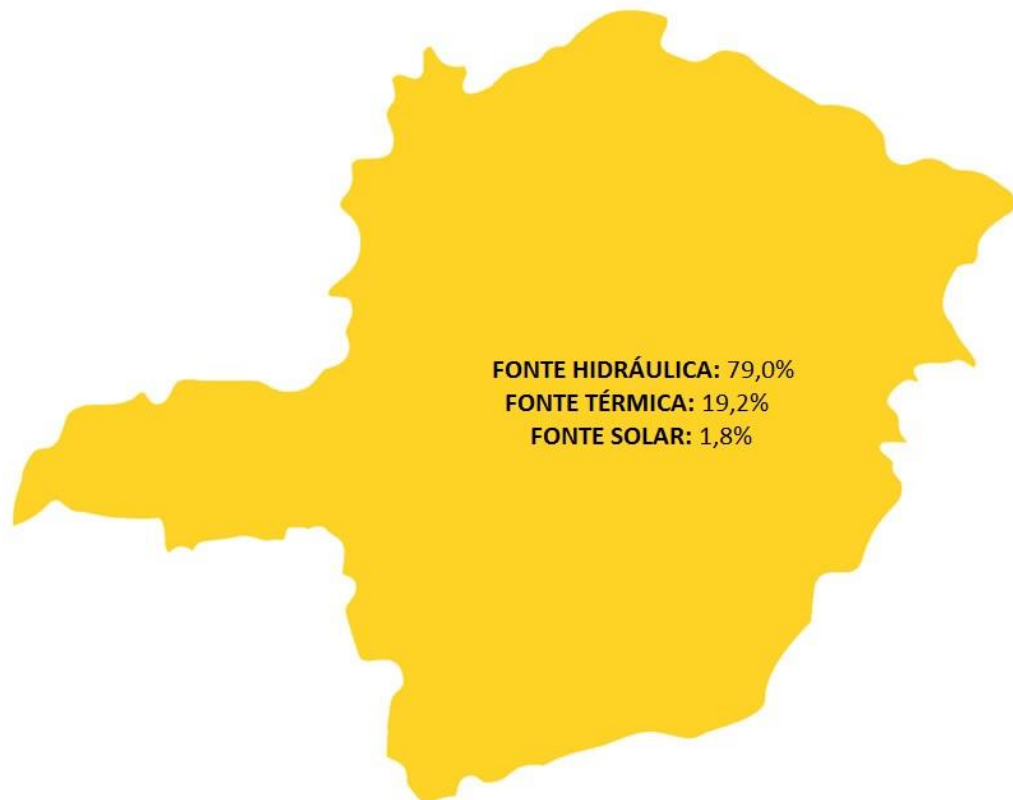
maior por fonte eólica (5.975 GWh). A Região Sudeste apresenta melhores valores de geração por fonte térmica (72.320 GWh) e nuclear (15.674 GWh, produção exclusiva do Estado do Rio de Janeiro) e está em segundo lugar na geração por fonte solar (1.126 GWh) e hidráulica (82.529 GWh). (EPE, 2019)

**Tabela 2** - Produção de energia por região (2016 - 2018).

Região	Produção de Energia (%)		
	2016	2017	2018
Norte	12,5	16,1	18,7
Nordeste	16,1	16,3	16,0
Sudeste	31,2	31,3	28,6
Sul	29,6	25,1	24,4
Centro-Oeste	10,7	11,1	12,3
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: Adaptado da EPE (2019).

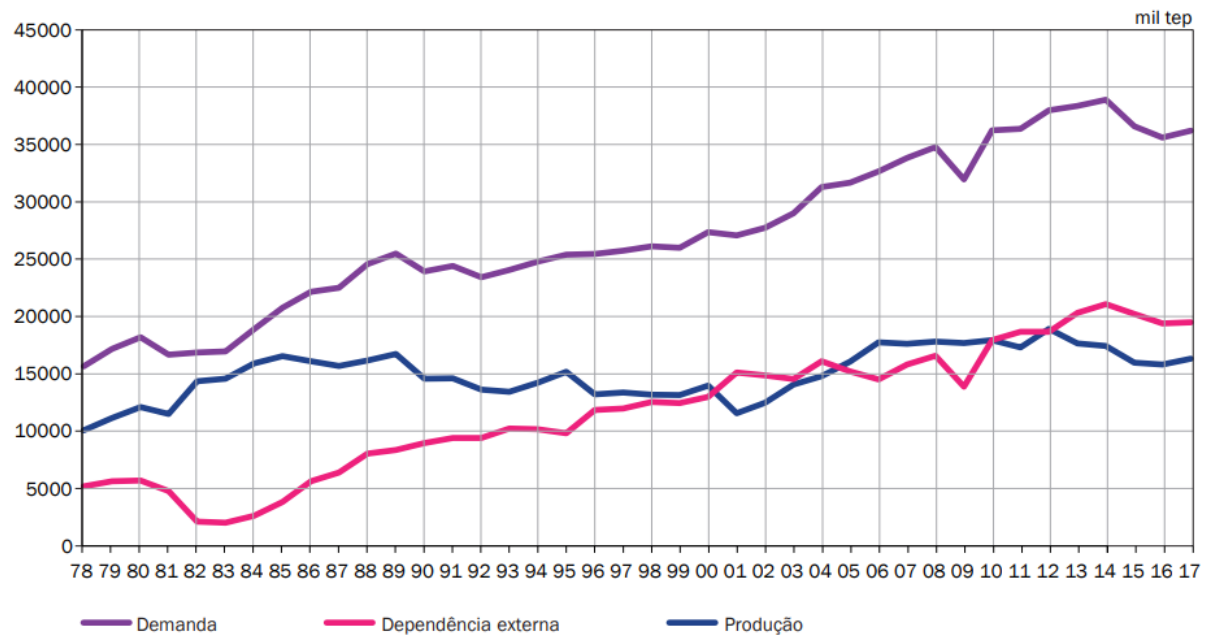
No Estado de Minas Gerais, a demanda por energia elétrica é controlada pela Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG) em parceria com concessionárias públicas e empresas autoprodutoras. A produção no Estado corresponde a 7,35% da produção energética nacional. A matriz energética de Minas Gerais é constituída conforme apresentado na Figura 1. Através da imagem, verifica-se que as usinas hidroelétricas são responsáveis pela produção de 79% da energia total do Estado, gerando em 2018, 34.947 GWh. (CEMIG, 2019; EPE, 2019)



**Figura 1** - Matriz Energética de Minas Gerais (Ano Base: 2018).

Fonte: Dados disponibilizados pela EPE (2019).

As usinas fotovoltaicas representaram 1,84% desta matriz, gerando, em 2018, 817 GWh; enquanto as usinas termelétricas entregaram aproximadamente 8.480 GWh para o mesmo período considerado (EPE, 2019). Não há registro de produção de energia elétrica por fonte eólica, mesmo com a presença do Parque Eólico do Morro de Carmelinho (instalado em Gouveia no Vale do Jequitinhonha), paralisado por motivações financeiras. Segundo a CEMIG (2019), em seu último balanço energético divulgado para o ano base de 2017, o Estado tem sua produção e operação de energia elétrica operados pelas diretrizes do Sistema Interligado Nacional (SIN), importando e exportando energia para outros Estados. No ano de 2017, por exemplo, a dependência externa do Estado foi de aproximadamente 54,3%. A evolução da demanda e produção de energia pode ser observada na Figura 2, onde é possível verificar que a taxa média de crescimento da dependência externa de energia foi de 3,4% por ano (CEMIG, 2019). A queda na produção, em 2014 e 2015, refletiu a intensa crise hídrica ocorrida nestes anos, que ocasionou uma diminuição considerável nas vazões de importantes rios, que abastecem usinas hidrelétricas importantes do Estado.



**Figura 2** - Evolução na demanda externa de energia (Minas Gerais).

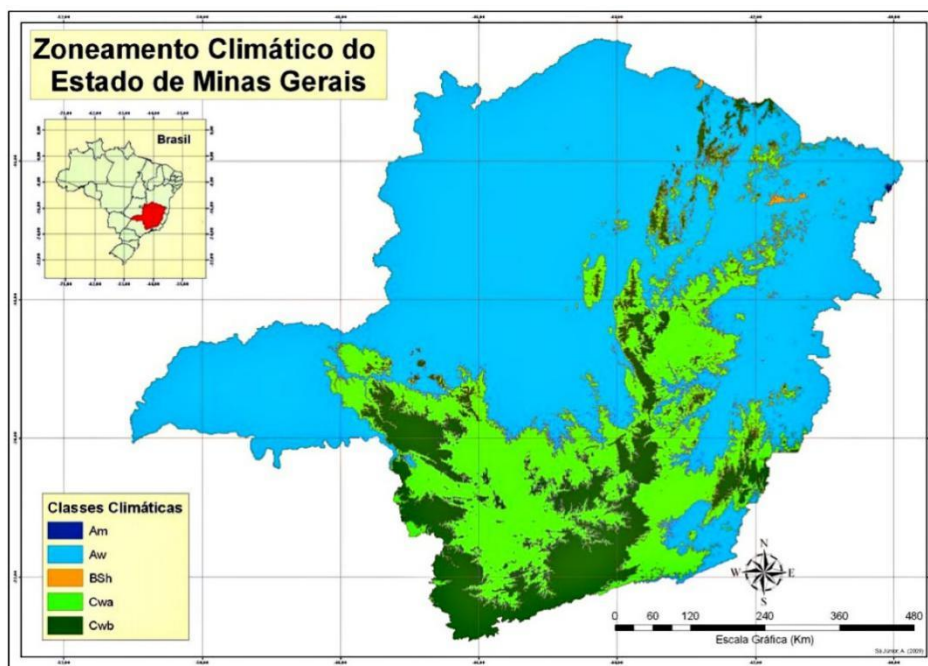
Fonte: CEMIG (2019).

Em 2017, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), dois grandes reservatórios no Estado sofreram reduções drásticas em seus volumes úteis (diferença entre o volume máximo de um reservatório e o seu volume morto). O reservatório de Três Marias chegou a 6,04% de seu volume útil em novembro de 2017, enquanto o reservatório de Irapé, 6,62% no mesmo período. Comparativamente, em 01 de agosto de 2017, o reservatório de Irapé estava com 15,16% de seu volume útil, e Três Marias com 22,60%. Nesta mesma data, em 2018, os volumes úteis praticamente dobraram chegando a 35,38% em Irapé e 42,70% em Três Marias.

Esta oscilação nos reservatórios dificulta o planejamento energético do setor e diante da dependência da hidroeletricidade, Mouriño et al. (2016) destacaram que as modificações no clima podem provocar mudanças hidrológicas (com aumento de períodos secos) cada vez mais frequentes. Essas mudanças influenciam diretamente nos níveis de água dos reservatórios, podendo gerar racionamento de energia ou o aumento no preço para os consumidores finais.

### 3.2 Climatologia de Minas Gerais: cenário atual e tendências futuras

Por estar inserido na América do Sul e possuir grande extensão territorial, Minas Gerais possui uma grande heterogeneidade climática impulsionada por diversos sistemas atmosféricos. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2010) mostra que o norte e nordeste do Estado são caracterizados por baixos volumes de precipitação, o que se contrasta, por exemplo, com o centro-sul do Estado que apresenta índices pluviométricos maiores ao longo do ano. Devido a esta diversidade climática, Sá Junior (2009), em seus estudos, identificou e agrupou áreas com homogeneidades climáticas, ou seja, com variações de clima parecidas ao longo do tempo, para todas as mesorregiões do Estado de Minas Gerais, conforme a Figura 3. Ambos os estudos foram baseados na classificação climática de Köppen Geiger, onde as classes Am, Aw, BSh, Cwa e Cwb são, respectivamente, clima tropical de monção, clima tropical de savana com estação seca de inverno, clima de estepe quente, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente, clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente.



**Figura 3** – Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais

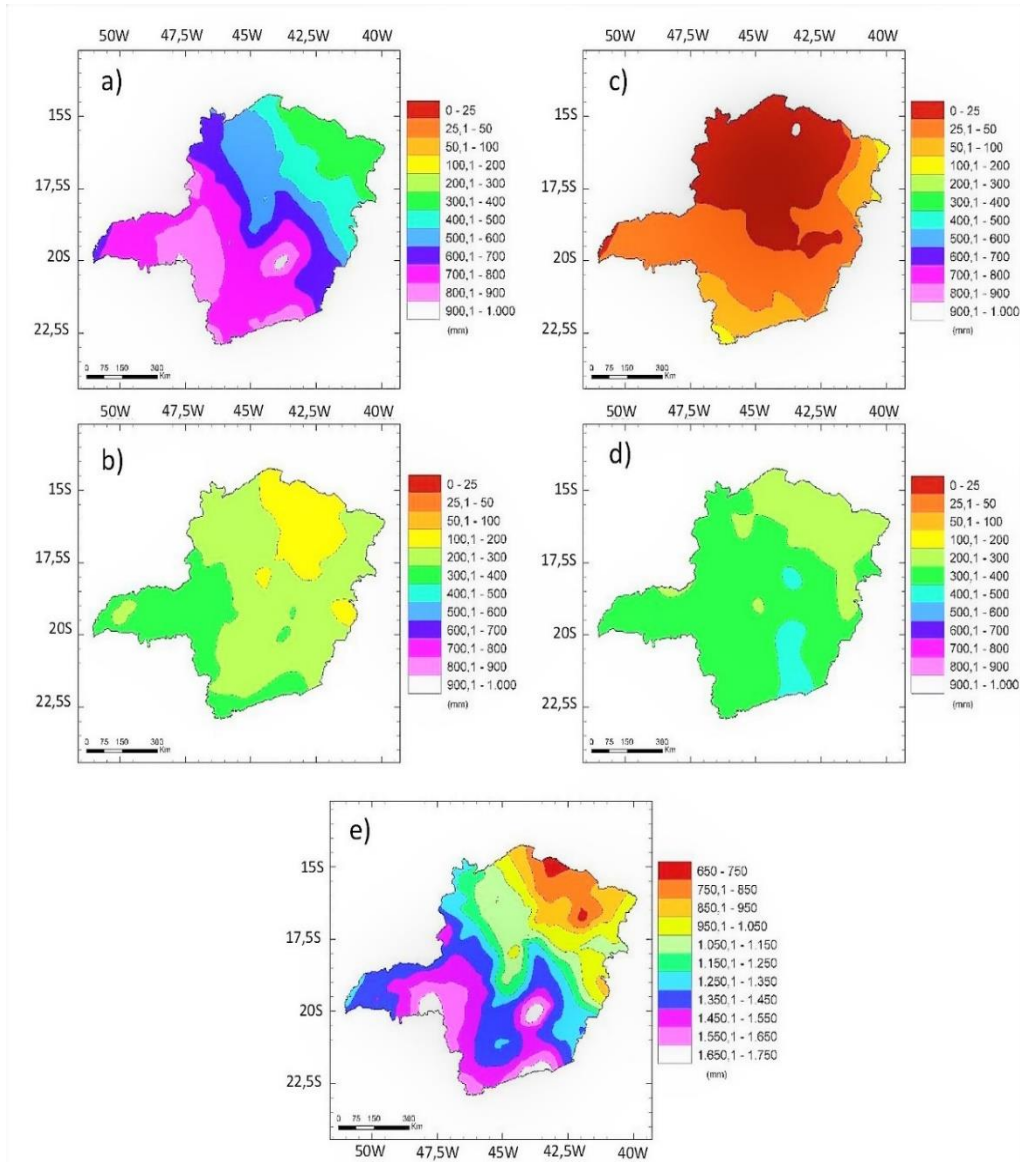
Fonte: Sá Junior (2009).

A variação do regime de precipitação, por exemplo, é explicada por diferentes fatores climáticos que influenciam de forma direta o ciclo da água entre atmosfera e superfície terrestre. Alguns autores caracterizaram os principais sistemas atmosféricos que atuam no Estado de Minas Gerais: Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), os Sistemas Frontais (SF) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (REBOITA et al., 2010; REBOITA et al., 2015; REBOITA et al., 2019).

Atuando na porção sul do oceano Atlântico, o ASAS é definido como um centro de alta pressão que, durante o inverno, ganha mais força e se inclina para a região oeste do oceano Atlântico, desfavorecendo os movimentos convectivos na região e, por consequência, a precipitação (MOSCATI, 1991; REBOITA et al., 2010; YNOUE et al., 2017).

Já os SF são frentes transitórias, que limitam massas de ar quente e fria atuantes no Brasil durante todas as estações do ano, sendo responsáveis em gerar zonas de instabilidade que modificam as atividades atmosféricas (BJERKNES, 1919). Durante os meses de dezembro a fevereiro, os sistemas frontais aliados ao deslocamento de ar úmido e quente da região Norte do Brasil aumentam a precipitação através da formação da zona convectiva de precipitação – ZCAS – caracterizada pelo desenvolvimento de nuvens e núcleos de condensação (KOUSKY, 1988).

Zhou e Lau (1998), Vera et al. (2006) e Marengo et al. (2012) definiram que o clima de Minas Gerais está inserido em um sistema de monção, mais precisamente no Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), caracterizado por um inverno seco e um verão chuvoso. Esta sazonalidade dos volumes de água precipitados e o volume total anual pode ser observada na Figura 4. O contraste dos volumes totais precipitados no verão (a) e no inverno (c) são nítidos. Durante o verão, os volumes médios precipitados estão entre 300 e 600 mm na região Norte do Estado e no Vale do Jequitinhonha, e bem superiores nas regiões Central e Sul de Minas Gerais. Entretanto, no inverno, não ultrapassa os 200 mm de volume médio precipitado em todo Estado, sendo o norte, noroeste e porção central, as áreas com os menores valores. Neste contexto, verifica-se uma grande heterogeneidade de volume médio acumulado anual precipitado em todas as regiões (e).



**Figura 4 -** Precipitação (mm) média sazonal e anual em Minas Gerais no período de 1998 a 2012: a) verão, b) outono, c) inverno, d) primavera e e) média do acumulado anual.

Fonte: Reboita et al. (2015).

Para o dimensionamento de sistemas de produção de energia, a grande variação sazonal da precipitação indica uma vulnerabilidade do sistema energético. Contudo, vale destacar que o aquecimento global e as mudanças climáticas apontam para a intensificação destes extremos, colocando o sistema hidrelétrico em risco, com a possibilidade de racionamento na distribuição de energia produzida.

Alterações climáticas sempre ocorreram ao longo dos anos, de forma irregular, mas sempre regularam as configurações de precipitações e temperaturas em todo planeta. Contudo,

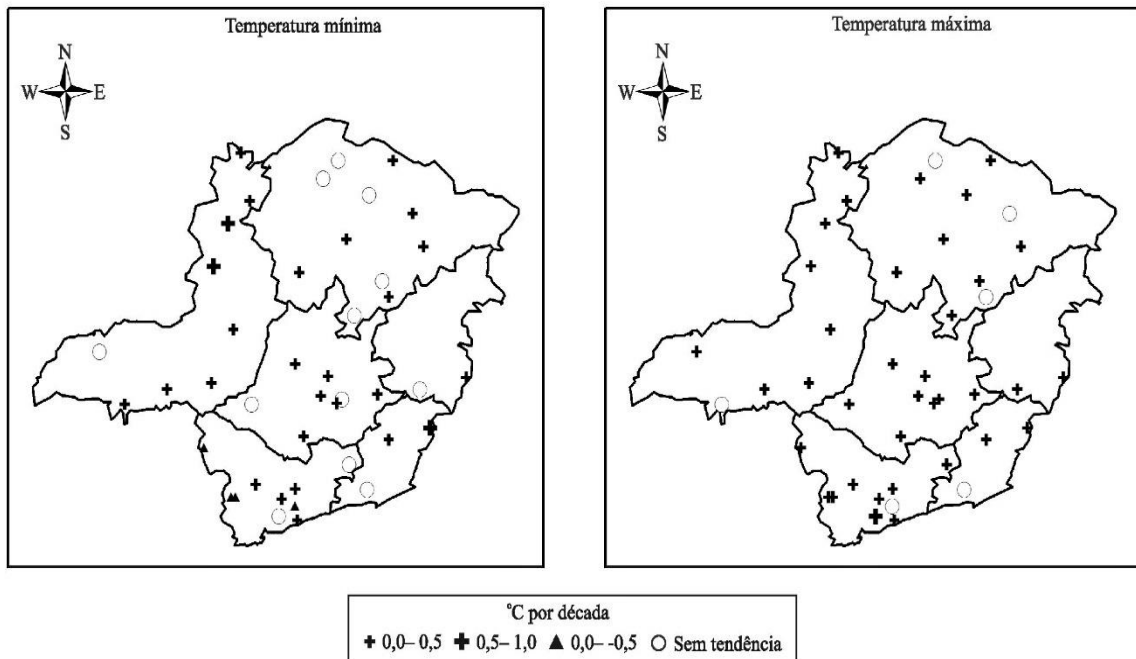
a grande preocupação atual é a velocidade com que estas mudanças vêm ocorrendo, tornando mais nítidos os efeitos associados a estas, como o aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos (como secas e cheias), a elevação da temperatura do ar e o aumento do nível dos oceanos (IPCC, 2013; 2014).

Ávila et al. (2014) apontam que, devido à complexidade geográfica e hidrológica do Estado de Minas Gerais, é fundamental verificar as tendências futuras do clima, analisando de que forma as alterações climáticas influenciarão o regime de precipitação. Natividade et al. (2017) destacam também que os padrões de precipitação e a forma como estes se relacionam com outros fatores, como a temperatura do ar, são fundamentais e requerem análises mais detalhadas, visto que uma modificação no regime de chuvas poderá causar danos em serviços básicos no Estado.

Vale ressaltar que as modificações climáticas não são as únicas responsáveis pela mudança dos regimes hídricos de Minas Gerais, pois fatores como o uso e ocupação do solo e o crescimento populacional, por exemplo, também contribuem para a fragilidade hídrica em muitas regiões. Entretanto, observações, estudos de tendências futuras e indicadores oferecem maior segurança ao planejamento estratégico (SALVIANO et al., 2016).

A análise realizada por Salviano et al. (2016) das séries mensais de temperatura do ar registradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em todo Brasil, entre 1961 e 2011, revela tendências positivas de temperaturas médias, aumentos com níveis de significância de 10%, 5% e 1% em grande parte do ano. Natividade et al. (2017) também identificaram indicadores de diminuição de noites frias (-0,10% por ano durante os anos de 1948 a 2005 e -0,02% para o período projetado de 2041 a 2070) com padrões próximos entre o norte e o sul de Minas Gerais. Revelaram também uma redução de dias frios no sul e norte do Estado. Para o norte, no período de 1948 a 2005, as tendências chegaram a -0,07% ao ano e para o período de 2041 a 2070, -0,03%. Na região sul, os resultados foram parecidos: -0,06% (1948 a 2005) e -0,04% (2041 a 2070). Os autores também destacaram que a região Norte de Minas Gerais apresentou os maiores valores de tendências de redução (NATIVIDADE et al., 2017).

O aumento das tendências positivas de temperatura também foi verificado por Ávila et al. (2014) como pode ser observado na Figura 5. Segundo Salviano et al. (2016), a Região Sudeste em toda sua extensão apresentou um aumento de 0,6 °C no período de 1961 a 2011, registrando elevação de 0,4 °C para as temperaturas máximas e mínimas.



**Figura 5** - Taxas de variação significativa das temperaturas mínima e máxima para o período de 1961 a 2009.

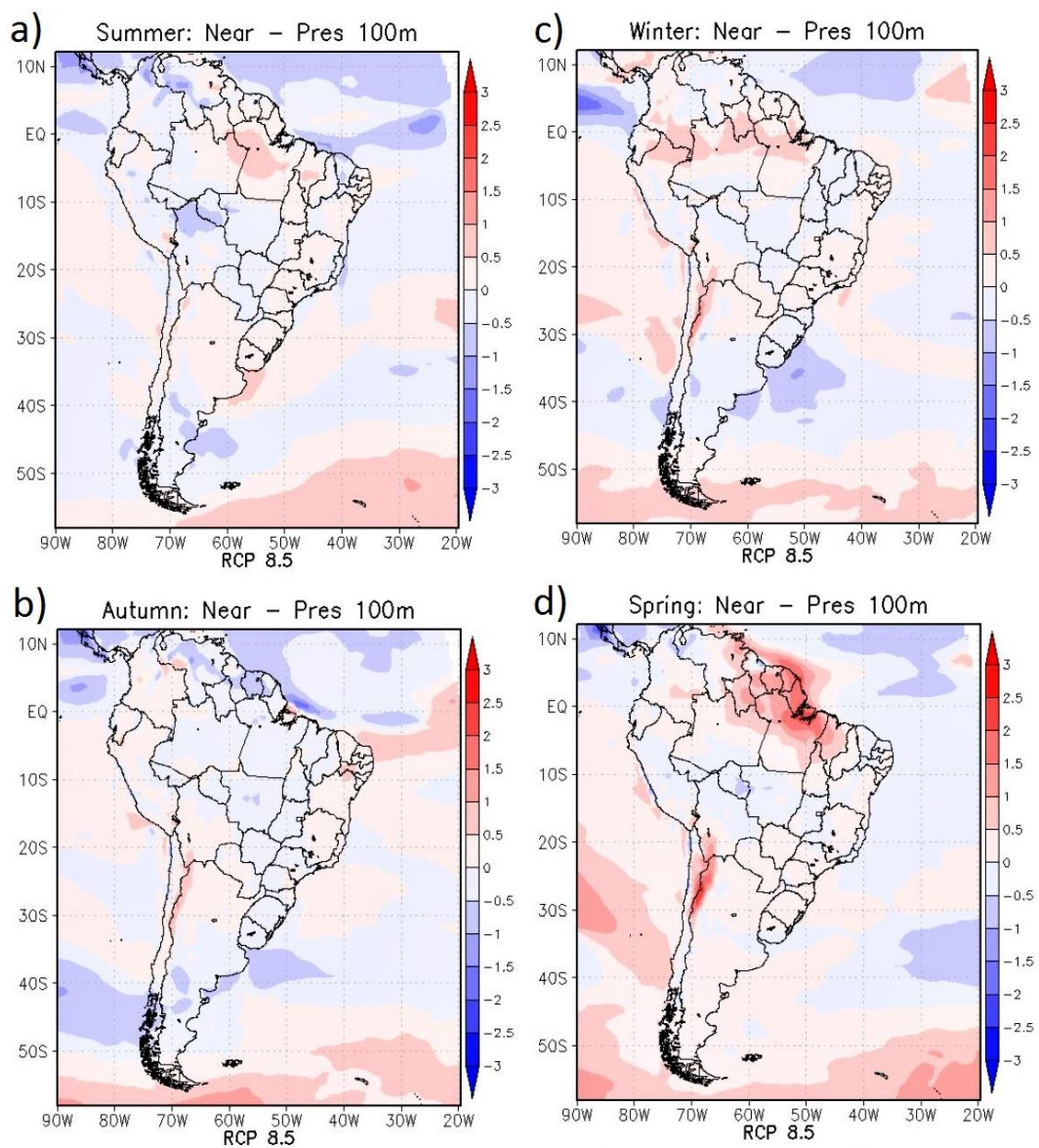
Fonte: Ávila et al. (2014).

Salviano et al. (2016) também concluíram que para Minas Gerais não há tendências significativas no que se refere a precipitação, exceto para os meses de março e dezembro que apresentaram um aumento do volume de chuvas de 57 mm para toda a Região Sudeste. Natividade et al. (2017) identificaram um aumento do número de dias secos para o norte de Minas Gerais e dos dias úmidos para o sul do Estado, mesmo com tendências pouco significativas. Já a evapotranspiração, em Minas Gerais, também apresentou tendências positivas diretamente proporcionais às tendências de temperatura (SALVIANO et al., 2016).

Reboita et al. (2018) analisaram uma projeção do vento a 100 metros para o cenário RCP8.5, por meio de análise dos resultados do modelo RegCM4 (Figura 6). Analisando o Estado de Minas Gerais, percebe-se que mesmo no cenário mais pessimista as diferenças entre o futuro próximo (2020 a 2050) e o presente (1979-2005) não são tão intensas, oscilando apenas em  $\pm 0,5 \text{ ms}^{-1}$  dependendo da estação e região do Estado. Considerando as diferenças entre o presente e o futuro distante (2070-2098), a variação na intensidade do vento oscila em  $\pm 1,0 \text{ ms}^{-1}$  sendo maior durante a primavera. Estes resultados podem indicar que o vento é menos vulnerável às modificações climáticas quando comparadas com as outras variáveis meteorológicas. Na projeção, as maiores velocidades do vento para o Estado são durante a

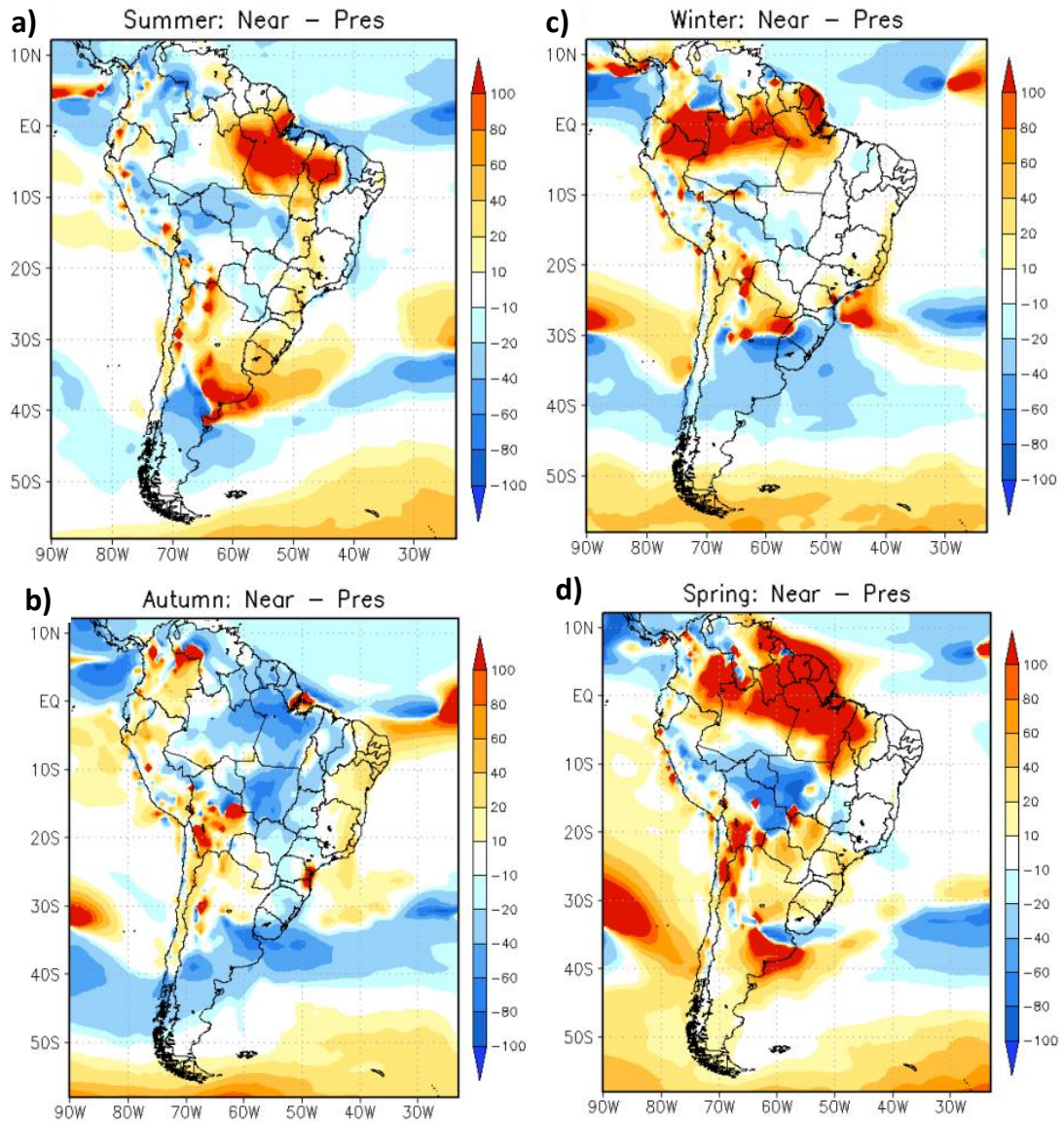


primavera, chegando até  $6 \text{ ms}^{-1}$  no Norte. Durante o verão e outono, as intensidades são menores, permanecendo entre 2 e  $4 \text{ ms}^{-1}$  ao longo do Estado. Ainda segundo os autores, analisando diferenças entre o futuro próximo (2020-2050) e o presente (cenário RCP8.5), não há modificações significantes na densidade de potência para o Estado de Minas Gerais, como pode ser visto na Figura 7. Considerando as diferenças em relação ao futuro distante (2070-2098), há um aumento de até  $60 \text{ Wm}^{-2}$  durante o inverno e primavera. Além disso, é possível notar uma relação proporcional entre a densidade de potência e a intensidade do vento.



**Figura 6** - Climatologia sazonal do vento a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP8.5 onde (a) verão: futuro próximo – presente (b) outono: futuro próximo – presente (c) inverno: futuro próximo – presente (d) primavera: futuro próximo – presente. As cores indicam a magnitude do vento.

Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2018).



**Figura 7** - Densidade de potência (a) Verão: futuro próximo – presente (b) Outono: futuro próximo – presente (c) Inverno: futuro próximo – presente (d) Primavera: futuro próximo – presente.

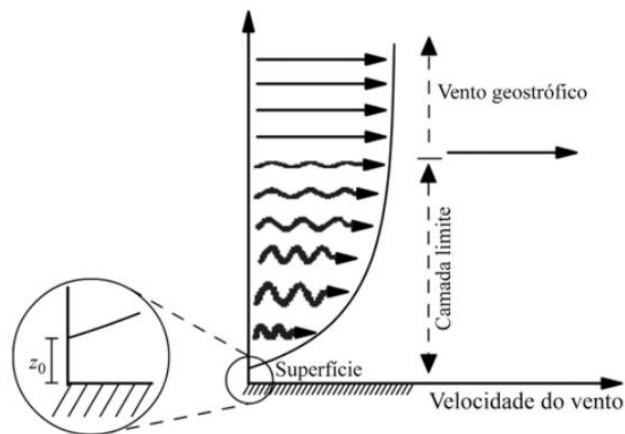
Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2018).

### 3.3 O vento e a geração eólica

O vento pode ser descrito como o deslocamento horizontal das massas de ar na atmosfera, resultado de uma diferença de pressão gerada pelo aquecimento diferenciado da superfície terrestre (MANWELL, 2009; YNOUE et al. 2017). Conforme os mesmos autores, este deslocamento de massas de ar surge a partir de uma força denominada Força do Gradiente de Pressão (FGP), sendo basicamente a diferença de pressão existente entre regiões, fazendo com que o ar de altas pressões se desloque para as baixas. Após este escoamento já

iniciado, outras forças como a gravidade, a força de atrito e a força de Coriolis atuam modificando a direção e intensidade deste movimento.

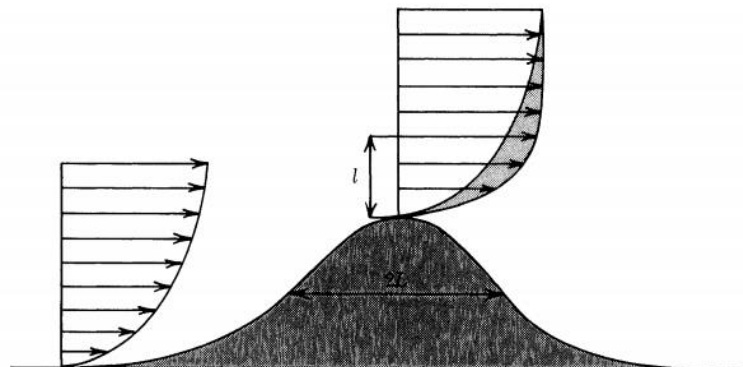
Troen e Petersen (1989) indicam que, devido ao cisalhamento, ao longo do perfil vertical da atmosfera, o vento possui uma intensidade que segue um perfil logarítmico, conforme Figura 8, com velocidade nula próximo à superfície. Em altos níveis, o vento se apresenta como geostrófico (descrito pelo equilíbrio da FGP e a força de Coriolis).



**Figura 8** - Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento da rugosidade ( $z_0$ ) é a altura onde a velocidade é nula.

Fonte: Martins et al. (2008).

Além disso, Troen e Petersen (1989) retratam que o perfil logarítmico do vento no topo de colinas tende a sofrer modificações quando comparados ao perfil à montante, resultantes da interferência topográfica conforme apresentado na Figura 9.



**Figura 9** – Perfil do vento à montante e no topo de colinas.

Fonte: Troen e Petersen (1989).

### 3.3.1 Energia Eólica: Conceito e Aspectos Socioambientais

O uso de recursos renováveis de energia cresce a cada dia, sendo necessário para diminuir a dependência da sociedade aos combustíveis fósseis (AQUILA et al., 2016). O vento é a fonte motriz de produção da energia eólica, onde a energia cinética produzida a partir da intensidade de escoamento é convertida em energia mecânica, e posteriormente em energia elétrica a partir de um conjunto de turbinas, hélices, rotores, transformadores e torres (CULTURE CHANGE, 2017). Segundo Silva et al. (2017), esta conversão pode ser realizada em torres de até 120 metros dispostas estrategicamente em grandes parques eólicos, que geralmente são agrupados em dois grupos em função da localização onde estão instalados: sobre a terra (*onshore*) ou sobre o mar (*offshore*).

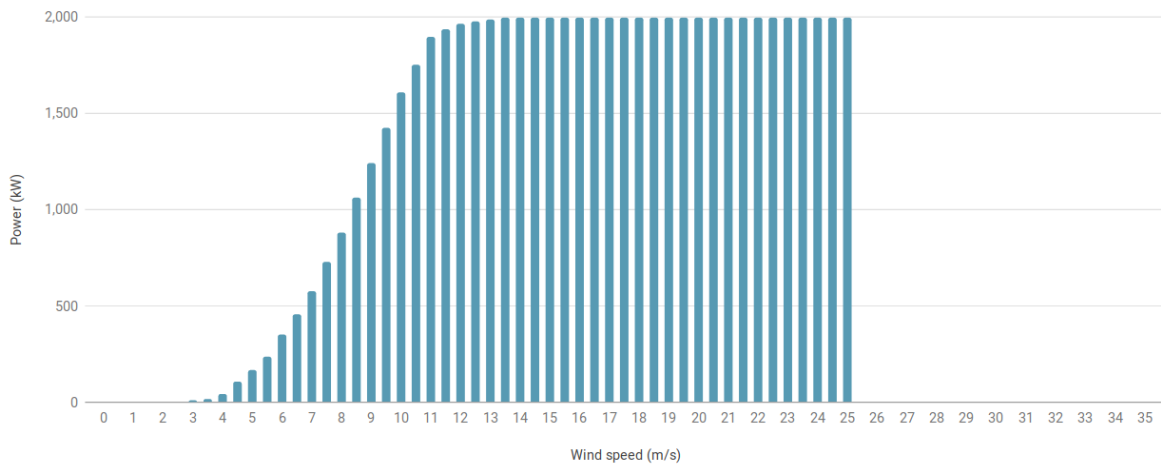
A capacidade de energia eólica mundial gerada nos últimos dez anos apresentou crescimento médio de 23%, representando cerca de 3% da produção mundial de eletricidade (GWEC, 2015). Esta evolução pode ser associada com a criação de políticas públicas que favoreçam este ambiente de construção e, principalmente, que considerem as constantes preocupações em relação ao aquecimento global, uma vez que a energia eólica é relativamente limpa, com baixa geração de resíduos em sua operação (ADAMI et al., 2017; RAIMUNDO et al., 2018; REGO; RIBEIRO, 2018).

Entretanto, segundo a Culture Change (2017), assim como todas as outras fontes de energia elétrica, a eólica também apresenta algumas desvantagens. A morte de pássaros ao se chocarem com as hélices das turbinas eólicas, a erosão do solo, os impactos visuais causados pelas construções de grandes parques eólicos e os impactos sonoros gerados pelos movimentos das pás são as principais desvantagens encontradas. Porém, tais desvantagens podem ser minimizadas com o auxílio da tecnologia.

### 3.3.2 Avaliação do Potencial Eólico

Para Manwell et al. (2009) e Silva et al. (2017), o potencial eólico de uma determinada região, ao ser avaliado, precisa considerar informações a respeito da disponibilidade e variabilidade dos ventos. The Wind Power (2019) destaca que valores extremos mínimos de intensidade (inferiores a  $4 \text{ ms}^{-1}$ ) podem não mover as turbinas, velocidades entre  $13$  e  $25 \text{ ms}^{-1}$  não geram acréscimos na densidade de potência e em casos de extremos máximos (superiores

a  $25 \text{ ms}^{-1}$ ) podem causar danos estruturais graves nas torres. A Figura 10 apresenta um exemplo clássico de uma curva de potência de uma turbina eólica do tipo Vestas V90/2000.

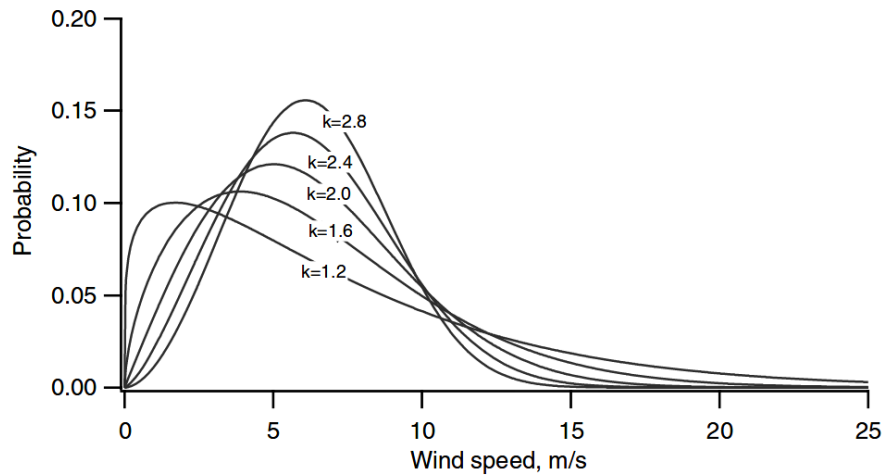


**Figura 10** - Curva de potência de uma turbina eólica do tipo Vestas V90/2000.

Fonte: The Wind Power (2019).

Além destas intensidades, é de fundamental importância relacionar a altura e a direção do vento em projetos eólicos. De acordo com Patel (2006), as velocidades de vento são, em geral, registradas a 10 metros. Entretanto, é necessário avaliar o comportamento do vento para alturas maiores (que geralmente apresentam maiores velocidades em função da redução do atrito superficial imposto pelo relevo e alguns obstáculos), principalmente em função da estruturação das torres que em geral ultrapassam os 50 metros. Para este fim, diversos métodos são utilizados para realizar a extrapolação da velocidade para outras alturas com destaque para os métodos exponenciais e logarítmicos. Todos estes, associados às distribuições de probabilidade, são utilizados para explicar a variabilidade dos ventos e estimar a energia que poderá ser produzida em uma determinada região (PATEL, 2006).

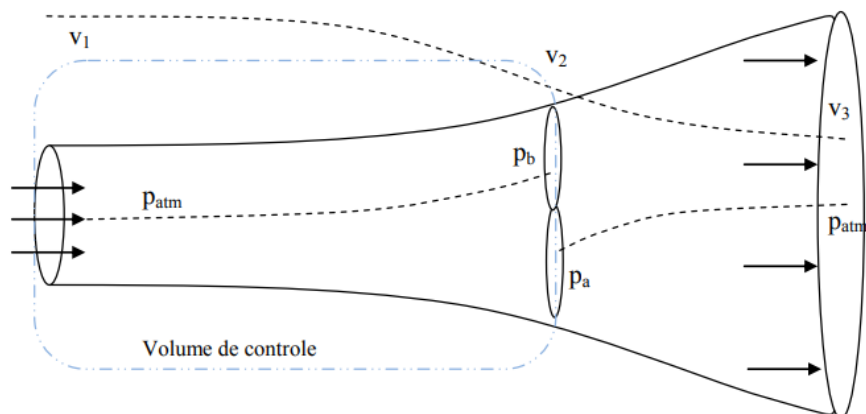
Justus et al. (1978), Patel (2006) e Manwell et al. (2009) indicam a distribuição de Weibull como a que melhor se adequa ao comportamento dos ventos, sendo a velocidade caracterizada por duas funções – uma função de densidade e uma cumulativa, que explicam as probabilidades de ocorrência de determinados valores de velocidades por meio de equações e coeficientes, onde um dos fatores  $k$  (forma) assume valores que explicam a variabilidade do vento conforme mostrado na Figura 11. Maiores valores de  $k$  indicam maior constância dos ventos, com menor ocorrência de valores extremos.



**Figura 11** - Frequência de ocorrência de vento baseada na Distribuição de Weibull, para diferentes valores de k

Fonte: Manwell et al. (2009).

Segundo Manwell et al. (2009) e Burton et al. (2011), nem toda a energia cinética contida no escoamento do vento poderá ser convertida em energia elétrica pelos aerogeradores. É possível observar na Figura 12 que, antes de alcançar o rotor do aerogerador, a velocidade do vento ( $v_1$ ) é mais intensa. À medida que o escoamento do vento se aproxima das pás do aerogerador, há um aumento na pressão ( $p_b$ ) e na seção transversal por onde o vento passa (devido à influência ocasionada pelo diâmetro da hélice), e um decréscimo na velocidade ( $v_2$ ). Imediatamente após a passagem do vento pelo rotor, tanto a velocidade quanto a pressão ( $p_a$ ) continuam a decrescer.

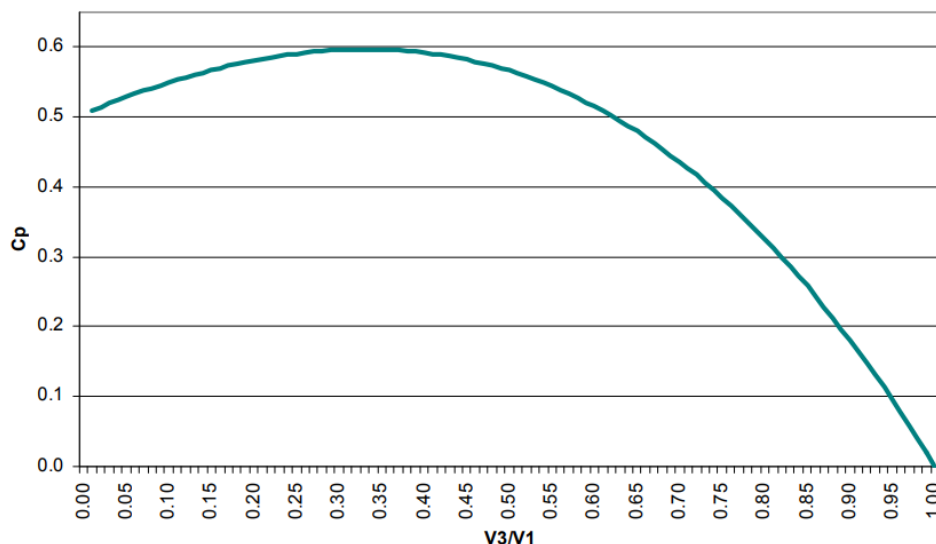


**Figura 12** – Esquema simplificado do escoamento de ar em uma turbina eólica.

Fonte: Simonsen (2010).

Com o afastamento entre o vento e o rotor, a pressão retorna ao valor anterior e a velocidade atinge seu valor mínimo ( $v_3$ ). Esse decréscimo na velocidade é justamente devido a absorção de parte da energia pelo aerogerador utilizada posteriormente na geração de energia elétrica. Se  $v_3$  for nula, pode-se concluir que o aerogerador funciona com uma barreira de impedimento do vento, não girando as pás e consequentemente não produzindo potência. O mesmo ocorre se  $v_3$  for igual a  $v_1$ . Por este raciocínio, quanto menor for a velocidade  $v_3$  maior será a energia extraída do vento, porém, quanto menor  $v_3$ , menor também será  $v_2$ , o que implicaria numa redução do escoamento do vento no rotor (MANWELL et al., 2009; BURTON et al., 2011).

Todo este mecanismo é considerado pelo Limite de Betz que mostra que o rendimento máximo que se pode obter de uma turbina eólica é de 59,3%, ou seja, a relação entre a velocidade de entrada e de saída é de um terço. A relação entre  $v_3$  e  $v_1$  interfere de forma direta no rendimento máximo aerodinâmico. Quanto maior esta relação, menores serão os limites máximos (Figura 13). Cada aerogerador possui sua curva de  $C_p$  (coeficiente de potência do rotor) que em geral possui valores variando de 0,35 (35%) a 0,45 (45%) (MANWELL et al., 2009; BURTON et al., 2011). Na Tabela 3 são apresentados alguns exemplos.



**Figura 13** - Distribuição de  $C_p$  em função de  $v_3/v_1$ .

Fonte: Dutra (2008).

**Tabela 3** - Modelos de aerogeradores e valores de Cp.

Modelo de Aerogerador	Cp
H1.25 – 400W	0.40
ELV H3.1 – 1KW	0.45
H10.0 – 30000W	0.42
VESTAS V126-3.3 MW	0.45
H19.5 – 100KW	0.42
H9.0 – 20000W	0.40

Fonte: Vestas (2018) e EnergyBras (2019).

A partir da velocidade do vento e sabendo do limite máximo de conversão, é possível calcular a densidade de potência (dp) extraída do vento. De acordo com Hennessey Jr (1977) e Patel (2006), a estimativa da dp disponível no escoamento do vento, considerando uma área unitária, pode ser calculada pela Equação 1, onde  $\rho$  é a densidade do ar (considerada  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $A$  é a área ( $\text{m}^2$ )  $v$  é a velocidade do vento. Já a Equação 2 mostra como o cálculo de dp é feito, levando em consideração o coeficiente de potência máximo (Cp).

$$dp = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (1)$$

$$dp = \frac{1}{2} A \rho v^3 \cdot 0,593 \quad (2)$$

Diversos trabalhos já assumem  $\rho$  como uma constante para cálculos eólicos, como exemplo de Silva et al. (2016) e Emeksiz e Cetin (2019). Em seus estudos, Elliotti et al. (1991) apresentaram uma classificação da densidade de potência do vento para 10 e 50 metros, sendo perceptível que dp é sensível às variações de velocidade. Na análise, Elliotti et al. (1991) consideraram a Equação 3 (frequência de velocidade adotando a distribuição Rayleigh) para realizar o cálculo da dp.

$$dp = 0,955 \cdot \rho v^3 \quad (3)$$



Os resultados encontrados por Elliotti et al. (1991) estão apresentados na Tabela 4. Entretanto, a tabela foi adaptada para facilitar o estudo comparativo deste trabalho. Utilizando a Equação 1, foi calculada uma nova dp, respeitando as velocidades do estudo original.

**Tabela 4** - Classificação da densidade de potência do vento (Padrão Internacional).

CLASSES	10 metros			50 metros		
	v (m/s)	dp (W/m <sup>2</sup> ) Eq. 3	dp (W/m <sup>2</sup> ) Eq. 1	v (m/s)	dp (W/m <sup>2</sup> ) Eq. 3	dp (W/m <sup>2</sup> ) Eq. 1
1 - Poor	4,40	100	52,18	5,60	200	107,56
2 - Marginal	5,10	150	81,25	6,40	300	160,56
3 - Moderate	5,60	200	107,56	7,00	400	210,09
4 - Good	6,00	250	132,30	7,50	500	258,40
5 - Excellent	6,40	300	160,56	8,00	600	313,60
6 - Excellent	7,00	400	210,09	8,80	800	417,40
7 - Excellent	9,40	1000	508,73	11,90	2000	1032,16

Fonte: Adaptado de Elliotti et al. (1991).

Complementando os estudos de Elliotti et al. (1991) e mantendo o mesmo padrão do cálculo original, os valores de intensidade do vento foram extrapolados para 100 metros através da Equação 4 e o coeficiente de rugosidade considerado pelos autores foi recalculado por meio da Equação 5 (PATEL, 2006; LABAN et al., 2019), usando como referência os valores a 10 metros. Desta forma, foi possível tornar a Tabela 4 mais informativa com as informações expostas na Tabela 5.

$$v_{100} = v_{10} \cdot \left(\frac{Z_{100}}{Z_{10}}\right)^{\alpha} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\ln(v_{50}) - \ln(v_{10})}{\ln(Z_{50}) - \ln(Z_{10})} \quad (5)$$

Onde:

$v_{10}, v_{100}$  = velocidade do vento a 10 e 100 metros respectivamente (ms<sup>-1</sup>).

$\alpha$  = coeficiente de rugosidade.

$Z_{10}, Z_{50}, Z_{100}$  = altura acima do solo (10, 50 e 100 metros respectivamente).

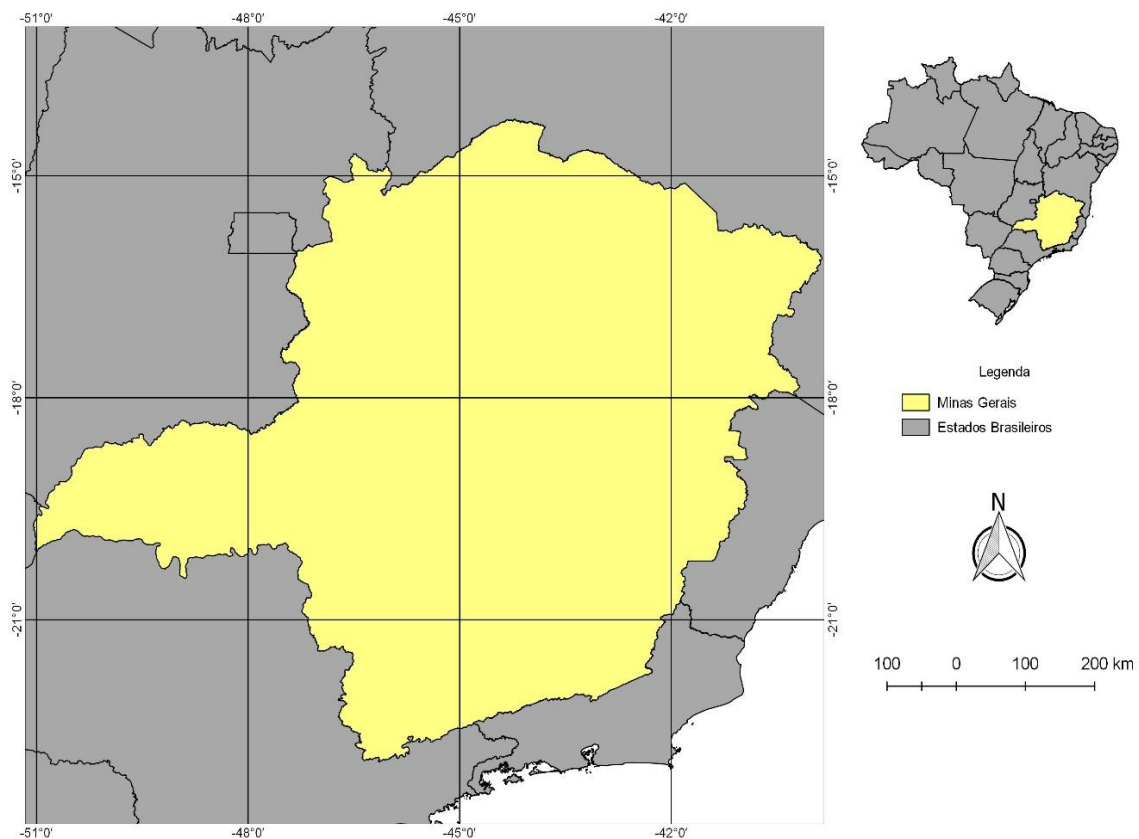
**Tabela 5** - Classificação da densidade de potência do vento a 100 metros.

<b>CLASSES</b>	<b>v (m/s) Eq. 4</b>	<b>DP (W/m<sup>2</sup>) Eq. 3</b>	<b>DP (W/m<sup>2</sup>) Eq. 1</b>
1 - Poor	6,21	280,56	146,89
2 - Marginal	7,20	436,90	228,74
3 - Moderate	7,91	578,40	302,83
4 - Good	8,47	711,41	372,47
5 - Excellent	9,04	863,39	452,04
6 - Excellent	9,88	1129,69	591,46
7 - Excellent	13,27	2735,59	1432,24

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Dados utilizados e análises realizadas

A análise da habilidade do uso do *Global Forecast System (GFS)* em estimativas do potencial eólico foi realizada para todo o Estado de Minas Gerais (Figura 14). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), o Estado de Minas Gerais é o quarto maior Estado do Brasil em extensão territorial, possui área aproximada a 587 mil km<sup>2</sup>, população superior a 21 milhões de pessoas e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) igual 0,731. Apresenta como principais atividades econômicas: a agricultura, pecuária, indústria, serviços, geração de energia e mineração (IBGE, 2018).



**Figura 14** - Localização da área de estudo

Os resultados da análise do modelo GFS (termo meteorológico aplicado para indicar um resultado do modelo que não é uma previsão) foram utilizados com resolução horizontal de 0,5 graus e vertical de 64 níveis; e frequência de seis horas (0, 6, 12 e 18 UTC). O período

considerado foi de 2013 a 2017 para todo o estado de MG. Os resultados do GFS foram obtidos através da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2018). De acordo com a NOAA (2018), o GFS é um modelo global de previsão do tempo, desenvolvido e operado pelos *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), que usa a *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI) como um esquema de análise global (RAJAGOPAL et al., 2007; PRASAD et al., 2011). O GSI está incluído no sistema *Global Data Assimilation and Forecasting* (GDAF) no *National Center for Medium Range Weather Forecasting* (NCEP) e as execuções de assimilação são realizadas usando o método intermitente de seis horas (o sistema tem acesso a um banco de dados observado quatro vezes por dia), onde são realizadas três interações principais (entre previsões e observações) e as análises são usadas como condições iniciais para previsões subsequentes (PRASAD et al., 2011; PRASAD et al., 2017). A partir dos componentes zonal (UGRD) e meridional (VGRD), as intensidades ( $\text{ms}^{-1}$ ) e as direções ( $^{\circ}$ ) do vento foram obtidas a cada seis horas e, no final, as médias foram calculadas.

**Tabela 6** - Variáveis GFS utilizadas

Parâmetro	Descrição	Altura (m)
TMP	Temperatura [K]	2
RH	Umidade Relativa [%]	2
UGRD	U-Componente do vento [ $\text{ms}^{-1}$ ]	10 e 100
VGRD	V-Componente do vento [ $\text{ms}^{-1}$ ]	10 e 100

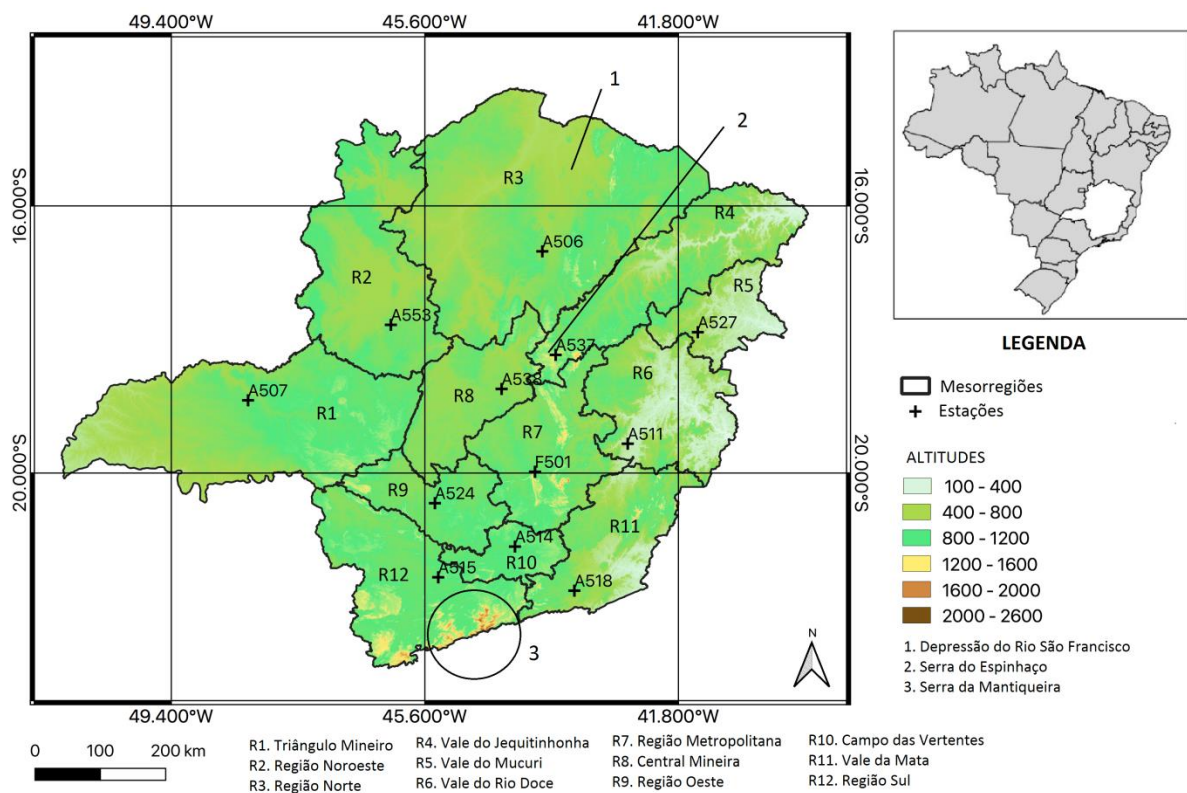
Fonte: Adaptado de National Centers for Environmental Prediction (NCEP, 2018)

Para verificar a representatividade das análises do GFS, foram utilizados dados registrados em doze estações automáticas entre 2013 e 2017. Os dados foram registrados e fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As estações apresentadas na Tabela 7 e Figura 15 foram escolhidas de acordo com as mesorregiões do Estado de Minas Gerais definidas pelo IBGE (2018) e os dados do GFS foram extraídos para os pontos de grades mais próximos a estas. A Figura 15 apresenta também as altitudes de MG, que variam entre 100 e 2600 metros em todo o Estado. Na região Sul, a altitude é maior devido a presença da Serra da Mantiqueira. Na região Norte, a altitude é mais heterogênea devido a Serra do Espinhaço e a Depressão do Rio São Francisco, por exemplo. (CEMIG, 2010)

**Tabela 7 - Identificação das Estações Automáticas**

Região	Código	Estação	Latitude	Longitude
Campo das Vertentes	A514	São João Del Rei	21,10°S	44,25°W
Central Mineira	A538	Curvelo	18,74°S	44,45°W
Oeste	A524	Formiga	20,45°S	45,45°W
Noroeste	A553	João Pinheiro	17,78°S	46,11°W
Norte	A506	Montes Claros	16,68°S	43,84°W
Região Metropolitana	F501	Belo Horizonte	19,98°S	43,95°W
Sul	A515	Varginha	21,56°S	45,40°W
Triângulo Mineiro	A507	Uberlândia	18,91°S	48,25°W
Vale do Jequitinhonha	A537	Diamantina	18,23°S	43,64°W
Zona da Mata	A518	Juiz de Fora	21,76°S	43,36°W
Vale do Mucuri	A527	Teófilo Otoni	17,89°S	41,51°W
Vale do Rio Doce	A511	Timóteo	19,56°S	42,56°W

Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Meteorologia (2018)



**Figura 15 - Localização do Estado de MG em relação ao Brasil, distribuição espacial de estações meteorológicas e topografia (metros) de MG.**

A comparação entre os dados observados de temperatura e umidade relativa do ar a 2 m com os resultados do GFS foi realizada. Para isso, foram realizadas as seguintes análises estatísticas: média aritmética (Equação 6), desvio padrão (Equação 7), raiz do erro quadrático médio (Equação 8), raiz do erro médio quadrático com remoção do desvio médio (Equação 9), coeficiente de correlação (Equação 10), índice de concordância (Equação 11) e erro médio (Equação 12). As equações apresentadas seguiram os modelos utilizados por Wilks (1995), Pielke (2002) e Obermann et al. (2016), onde a incógnita “y” está relacionada com os dados simulados pelo GFS, “o” com os dados observados pelas estações automáticas e “n” o número de dados. A análise estatística foi feita para todo o período analisado e posteriormente, por estação do ano.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - o_i)^2} \quad (8)$$

$$\text{RMSE}_{\text{RD}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum [(y_i - \bar{y}) - (o_i - \bar{o})]^2} \quad (9)$$

$$r = \frac{\sum [(y_i - \bar{y})(o_i - \bar{o})]}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum (o_i - \bar{o})^2}} \quad (10)$$

$$d = \frac{\sum (y_i - o_i)^2}{\sum [(y_i - \bar{o}) + (o_i - \bar{o})]^2} \quad (11)$$

$$\text{EM} = \frac{1}{n} \sum (y_i - o_i) \quad (12)$$

A habilidade (*skill*) do modelo em representar as variáveis observadas foi avaliada a partir dos critérios propostos por Pielke (2002) e apresentados nas Equações 13, 14 e 15.

$$\sigma_{\text{GFS}} \cong \sigma_{\text{observado}} \quad (13)$$

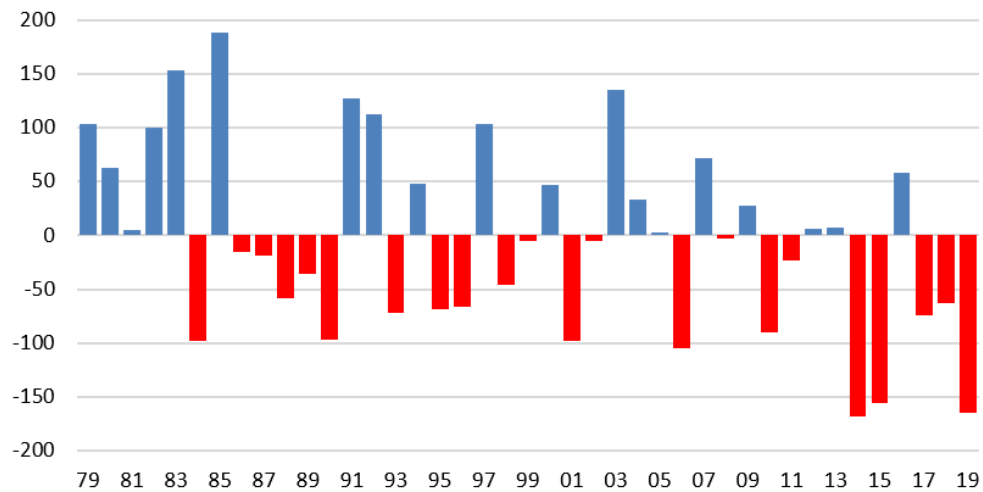
$$\text{RMSE} < \sigma_{\text{observado}} \quad (14)$$

$$\text{RMSE}_{\text{RD}} < \sigma_{\text{observado}} \quad (15)$$

Foram calculadas a partir dos resultados do GFS médias sazonais para a velocidade do vento a 10 e a 100 metros, para temperatura do ar e umidade relativa do ar, ambos a 2 metros. Todos os mapas foram gerados por meio do *software Grid Analysis and Display System (Grads)*. Destaca-se que o modelo GFS já disponibiliza os resultados de vento a 100 m, não havendo a necessidade de cálculos de extrapolação vertical.

A análise da representatividade da intensidade e direção do vento foi feita por meio de gráficos e rosas dos ventos sobrepostas ao terreno (com o auxílio do WRPLOT e *Google Earth*), onde os dados observados e do GFS foram comparados (10 metros). Foram realizadas análises sazonais, mensais e de variabilidade diurna da intensidade do vento. A variabilidade do ciclo diurno é importante uma vez que permite a identificação do período em que o vento atinge sua maior intensidade em determinada localidade, pois, em geral, a produção eficiente de energia eólica se dará quando a maior velocidade do vento for registrada. Os perfis médios horários e mensais do vento observado e simulado pelo GFS foram plotados, considerando apenas os horários 0, 6, 12 e 18 UTC, devido a disponibilidade dos dados do GFS. Além disso, a variação percentual entre os dados a 10 metros foi calculada.

O estudo apresenta, ainda, uma análise da relação entre a precipitação e a intensidade do vento, com o objetivo de verificar se os períodos secos (ocorridos na região) estão relacionados com um aumento na intensidade do vento. Em suas análises, Silva (2019) apresentou todas as anomalias de precipitação (janeiro) entre os anos 1979 e 2019 para a região Sudeste. Conforme Figura 16 e considerando o período analisado neste trabalho (2013 a 2017), em 2014/2015 foram registradas anomalias negativas e em 2016 ocorreram anomalias positivas de precipitação. Desta forma, foram realizadas médias sazonais do vento nestes dois períodos e, posteriormente, foram calculadas as diferenças entre os valores. Os resultados foram apresentados por mapas gerados pelo *software Grid Analysis and Display System (Grads)*.



**Figura 16** - Anomalias de precipitação (mm) no mês de janeiro para o período de 1979 a 2019 na região Sudeste.

Fonte: Silva (2019)

## 4.2 Avaliação do potencial eólico

A distribuição de frequência da intensidade do vento pode ser representada pela distribuição de Weibull. Aqui essa distribuição foi ajustada às análises do GFS e aos dados observados a fim de analisar a constância da intensidade do vento em torno de um valor médio. As estatísticas são usadas em estudos de vento para verificar a variabilidade do vento e avaliar como o vento se comporta na maioria das vezes (acima, abaixo ou igual ao valor médio; além de verificar com que frequência valores extremos de exercício ocorrem). É uma maneira de capturar recursos de dados e facilitar a comparação entre diferentes conjuntos de dados. A distribuição de Weibull depende apenas de dois parâmetros: o de forma “ $k$ ” e o de escala “ $c$ ”. Os parâmetros foram obtidos através das Equações 16 e 17 respectivamente, onde  $\sigma$  é o desvio padrão das velocidades,  $\bar{v}$  é a velocidade média e  $\Gamma$ , a função gama. O parâmetro “ $k$ ” (adimensional) está relacionado com o formato da distribuição e possui estrita relação com o desvio padrão dos dados de velocidade dos ventos enquanto o parâmetro “ $c$ ” ( $\text{ms}^{-1}$ ) possui relação direta com a velocidade média. (JUSTUS et al., 1978; PATEL, 2006; MANWELL et al., 2009)



$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (16)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{[\Gamma(1 + 1/k)]} \quad (17)$$

Também foi calculada a densidade de potência (dp) média sazonal (Watts m<sup>-2</sup>), a partir dos dados GFS, seguindo a metodologia aplicada por Hennessey Jr. (1977), Patel (2006), Silva et al. (2016) e Emeksiz e Cetin (2019), onde a densidade do ar foi considerada constante (1,225 kg m<sup>-3</sup>). Conforme retratado por Kalmikov (2017), os valores de WPD são mais vantajosos que os valores de velocidade do vento, especialmente ao comparar locais com características de frequências assimétricas, dada a sensibilidade da dp às variações de vento. Os cálculos foram realizados de duas formas: a primeira aplicando exatamente a Equação 1 (página 32), e a segunda considerando o coeficiente de potência máximo (cp) imposto pela Lei de Betz como mostrado na Equação 2 (página 32). Para o cálculo da dp, o valor da área (A) foi desprezado a fim de obter a energia disponível por unidade de área (Wm<sup>-2</sup>). E finalmente o valor de dp encontrado foi classificado conforme Tabela 5 (página 34).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise da representatividade das variáveis temperatura e umidade relativa

Os resultados da aplicação dos métodos estatísticos para temperatura média (°C) aos dados observados e aos simulados pelo GFS, de todo período analisado, estão expostos na Tabela 8. Os valores de  $r$  acima de 0,82 para todas as estações consideradas revelam que os dados simulados e observados possuem uma forte correlação. O maior valor de  $r$  corresponde ao Município de Formiga ( $r = 0,92$ ) e o menor valor encontrado foi em Timóteo ( $r = 0,83$ ). Contudo, pode-se verificar também, a partir do EM, que o modelo subestima os valores de temperatura em oito das doze localidades consideradas neste estudo (Belo Horizonte, Formiga, João Pinheiro, Montes Claros, São João Del Rei, Teófilo Otoni, Uberlândia e Varginha). Os valores de  $d$  indicam que existe concordância entre os dados observados e os simulados. O maior valor foi verificado em Curvelo ( $d = 0,95$ ) e o menor em Belo Horizonte,  $d = 0,86$ .

**Tabela 8** - Resultados da validação da temperatura média do ar (°C).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	RMSE	RMSE <sub>RD</sub>	$r$	$d$	EM
B. Horizonte	22.28	19.78	3.95	4.24	3.12	1.86	0.90	0.86	-2.50
Curvelo	23.41	23.50	4.71	4.79	1.99	1.99	0.91	0.95	0.09
Diamantina	18.74	20.02	3.78	4.53	2.43	2.07	0.89	0.91	1.28
Formiga	21.76	20.29	4.47	4.43	2.26	1.72	0.92	0.93	-1.46
Juiz de Fora	19.46	20.02	4.03	4.52	2.35	2.28	0.86	0.92	0.56
João Pinheiro	22.88	22.07	3.96	4.09	1.98	1.81	0.90	0.94	-0.81
Montes Claros	24.47	21.55	4.48	4.53	3.48	1.88	0.91	0.86	-2.92
S. J. Del Rei	19.83	19.17	4.92	4.39	2.23	2.13	0.90	0.94	-0.66
Timóteo	22.78	22.80	3.88	4.80	2.65	2.65	0.83	0.90	0.02
Teófilo Otoni	23.32	21.69	3.95	4.22	2.59	2.01	0.88	0.90	-1.63
Uberlândia	23.47	22.34	3.97	4.41	2.39	2.11	0.88	0.92	-1.13
Varginha	20.60	19.60	4.53	4.58	2.18	1.93	0.91	0.94	-1.00

A análise realizada a partir dos valores de  $\sigma_o$ ,  $RMSE$  e  $RMSE_{RD}$  revelou que todos os critérios necessários para obtenção do *skill* da simulação foram atendidos para as doze estações analisadas, mostrando que o modelo possui habilidade em descrever a temperatura do ar a 2 metros.

A Tabela 9 apresenta os resultados da aplicação dos métodos estatísticos considerando a UR (%) a 2 metros. Os dados simulados e observados revelaram valores altos, porém inferiores aos apresentados para a temperatura. O maior valor foi verificado em Curvelo, João Pinheiro e Montes Claros ( $r=0,87$ ) e o menor, em Timóteo ( $r=0,74$ ). A análise do EM revela que em todas as localidades o modelo superestimou a UR do ar. O maior valor de EM foi em Belo Horizonte (EM = 16,74) e o menor, em Curvelo (EM = 4,89). Os valores de  $d$ , em geral, também foram altos, porém inferiores aos encontrados para a temperatura do ar, com menor valor igual a 0,71 (em Belo Horizonte) e o maior igual a 0,99 (em Formiga). Analisando os critérios necessários para obter o *skill* da simulação, os municípios de Belo Horizonte e Montes Claros apresentaram valores de  $RMSE$  superiores ao  $\sigma_o$ , não atendendo ao segundo critério ( $RMSE < \sigma_o$ ). As demais localidades atenderam aos três critérios analisados.

**Tabela 9** - Resultados da validação da umidade relativa média do ar (%).

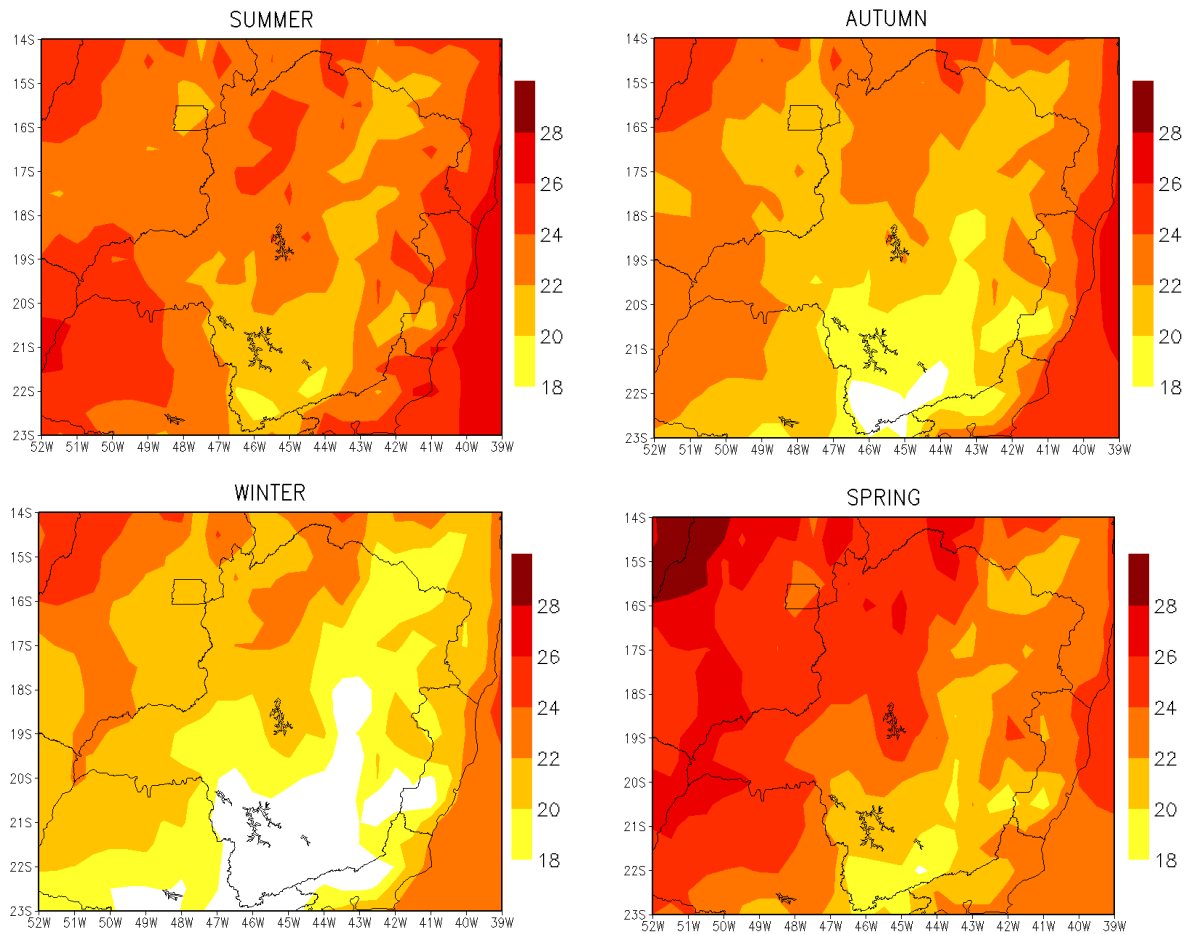
Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	$RMSE$	$RMSE_{RD}$	$r$	$d$	EM
B. Horizonte	62.76	79.50	16.65	17.94	20.10	11.12	0.80	0.71	16.74
Curvelo	63.29	68.18	19.90	20.64	11.45	10.37	0.87	0.92	4.89
Diamantina	72.56	78.36	18.05	18.75	12.27	10.81	0.83	0.88	5.80
Formiga	67.67	78.40	19.10	18.62	14.95	10.40	0.85	0.99	10.73
Juiz de Fora	78.45	84.40	16.09	15.20	11.99	10.41	0.78	0.84	5.95
João Pinheiro	59.87	73.17	19.82	19.87	16.80	10.26	0.87	0.98	13.30
Montes Claros	56.31	73.00	18.82	21.14	19.60	10.27	0.87	0.78	16.70
S. J. Del Rei	74.30	81.37	19.70	17.34	13.53	11.54	0.81	0.86	7.07
Timóteo	70.08	75.64	16.37	18.41	13.78	12.61	0.74	0.82	5.55
Teófilo Otoni	69.58	80.20	17.23	18.09	15.37	11.11	0.80	0.81	10.62
Uberlândia	60.38	72.80	21.04	21.59	17.32	12.07	0.84	0.84	12.42
Varginha	71.11	81.26	20.76	17.34	15.67	11.94	0.82	0.83	10.14

Os métodos estatísticos foram aplicados também aos dados simulados e observados de temperatura e UR considerando as estações do ano. Os resultados, apresentados no Apêndice A, mostram que, de forma geral, a temperatura demonstrou uma boa relação entre os dados simulados e observados. Sendo que, com a exceção de uma única cidade, todas as outras apresentaram desvios padrão dos dados observados superiores ao  $RMSE$  e ao  $RMSE_{RD}$ . Além disso, tanto os coeficientes de correlação, quanto os de concordância, foram superiores a 0,75 indicando uma forte correlação e concordância. A validação sazonal demonstrou que os dados referentes ao verão (dezembro, janeiro e fevereiro) foram os piores quando comparados com o outono, inverno e primavera.

Quanto à umidade relativa média do ar, na análise sazonal, a representatividade não foi tão boa quanto a de temperatura, mas a maioria dos valores dos coeficientes de correlação ( $r$ ) e concordância ( $d$ ) ficaram entre 0,60 e 0,80. A primavera apresentou a melhor relação entre os dados. As demais estações do ano apresentaram estações meteorológicas com valores de  $RMSE$  superiores aos desvios padrão observados.

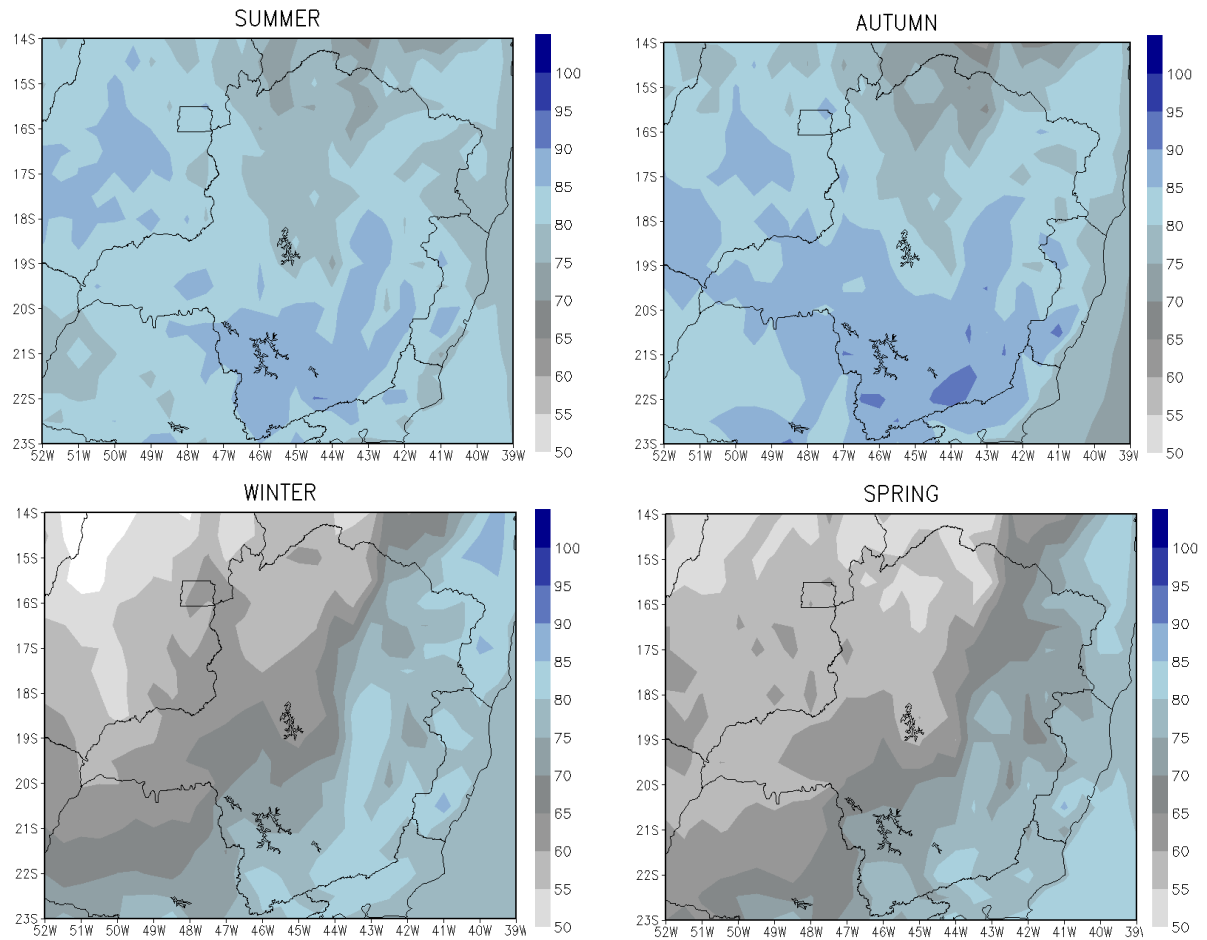
## **5.2 Análise da distribuição espacial dos dados do GFS**

As médias sazonais de temperatura média do ar, umidade relativa média do ar, vento a 10 metros e 100 metros podem ser observadas entre Figuras 17 e 20. Vale destacar que os campos médios sazonais apresentam variações ao longo das estações do ano, em função da intensificação ou enfraquecimento de sistemas atmosféricos, principalmente, de escala sinótica, como o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais. A variação da temperatura sazonalmente segue o padrão apresentado por Reboita et al. (2015), quando analisado o período de 1998 a 2012 através dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Durante o verão, devido à migração dos sistemas atmosféricos para o sul do continente americano, a temperatura intensifica-se; durante o inverno, o processo se inverte, registrando assim, as temperaturas médias do ar menores ao longo do Estado.



**Figura 17 - Temperatura média sazonal (°C) a 2 metros.**

A umidade relativa média do ar, Figura 18, também apresenta padrão coerente com o período chuvoso em Minas Gerais, como retratado por Reboita et al. (2015). Durante o verão e o outono, têm-se os maiores valores de umidade relativa, em geral, acima de 80% no sul do Estado (região onde os índices pluviométricos são maiores) e variando entre 60 e 70% no norte do Estado (região onde os índices pluviométricos são menores). No inverno e primavera, o ar é mais frio e seco, e sob a influência do ASAS, é registrada menor umidade relativa média do ar. Durante o verão e o outono, devido principalmente a atuação da ZCAS, ar úmido e quente chega ao Estado, aumentando a umidade relativa média do ar, corroborando o apresentado por Reboita et al. (2015).



**Figura 18** - Umidade relativa média do ar sazonal (%) a 2 metros.

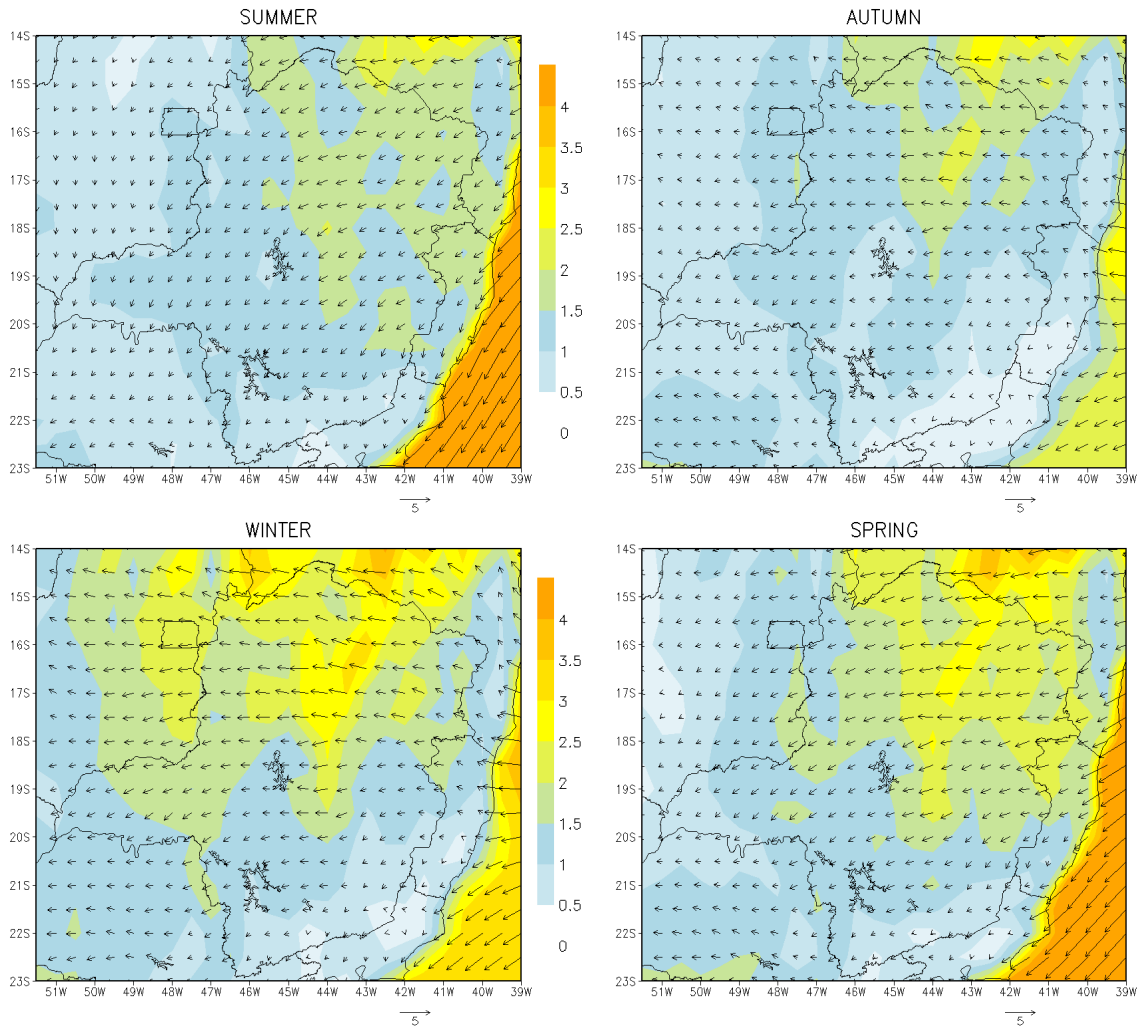
As médias sazonais de vento a 10 e 100 metros podem ser observadas nas Figuras 19 e 20. As médias sazonais variam ao longo das estações do ano devido à intensificação ou enfraquecimento dos sistemas atmosféricos, principalmente associados ao ASAS, ZCAS e Sistemas Frontais (REBOITA et al., 2010; REBOITA et al., 2015; REBOITA et al., 2019).

Em relação ao vento a 10 metros (Figura 19), em geral, o GFS indica que o vento tem baixa intensidade, não excedendo  $2 \text{ ms}^{-1}$  no sul e  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  no norte. No entanto, a 100 metros, a velocidade do vento (Figura 20) mostra valores mais altos devido a menor perda de energia para a superfície. A porção norte do Estado mostra a velocidade média do vento a 10 metros entre  $1$  e  $2,5 \text{ ms}^{-1}$  durante o verão e o outono austral; a 100 metros, foram encontrados valores médios entre  $3,5$  e  $4,5 \text{ ms}^{-1}$ . Durante o inverno e a primavera, os valores da velocidade do vento aumentam de  $2,5$  para  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  (a 10 metros) e de  $4$  para  $6 \text{ ms}^{-1}$  (a 100 metros). Um padrão semelhante foi encontrado em todo o Estado. A velocidade do vento a 100 metros

atinge o critério mínimo para geração de eletricidade durante o inverno e a primavera (estação seca), que é de  $4 \text{ ms}^{-1}$  (para pequenas turbinas eólicas elétricas) e  $6 \text{ ms}^{-1}$  (parques eólicos em escalas maiores), de acordo com Culture Change (2017) e The Wind Power (2019).

As regiões Norte e do Vale do Jequitinhonha apresentam as maiores intensidades de vento, concordando com a Cemig (2010). Intensidades de vento mais altas durante o inverno e a primavera indicam uma possível complementaridade com a precipitação, que apresenta valores mínimos nessas estações (SILVA; REBOITA, 2013; REBOITA et al., 2015; REBOITA et al., 2017; REIS et al. 2018) e reforça um fator positivo para a implementação da fonte eólica na matriz energética do Estado. Os valores de intensidade do vento com base nos dados ERA-Interim e nos resultados do RegCM4 (Reboita et al., 2018) também encontraram diferenças significativas de vento entre as regiões Norte e Sul do Estado de MG e valores mais altos de velocidade do vento durante o inverno e a primavera. No entanto, os dados do ERA-Interim apresentaram maior contraste entre as regiões do Estado, com o Norte mostrando intensidade do vento menor que  $4 \text{ ms}^{-1}$  e o sul do Estado, apresentando valores inferiores a  $2 \text{ ms}^{-1}$ .

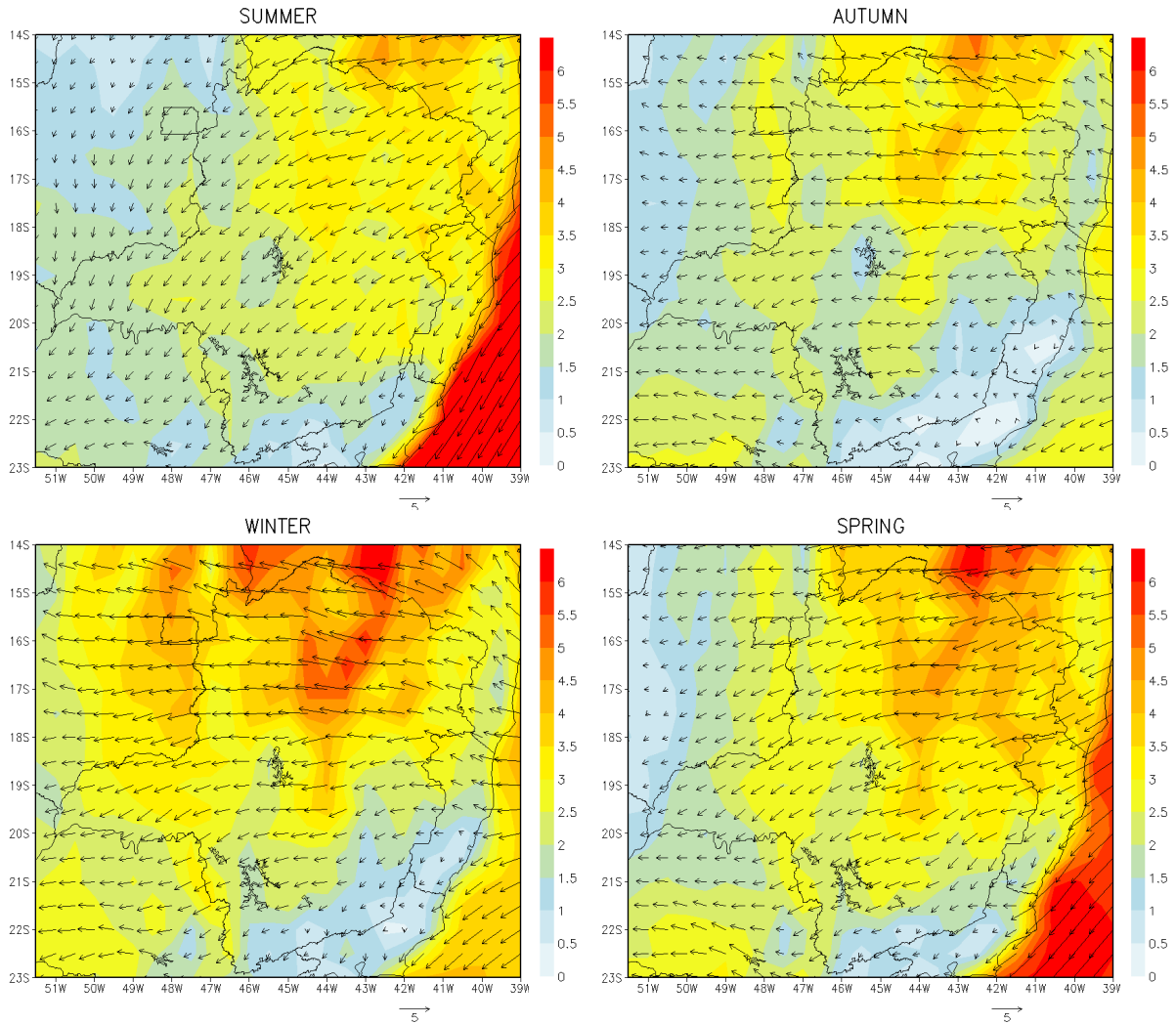
Outro fator importante é que a velocidade média do vento é inferior aos limites máximos apresentados pelo The Wind Power (2019), possibilitando que as turbinas operem ao longo de todo o dia e das estações climatológicas, minimizando possíveis problemas estruturais nos aerogeradores. Os resultados apresentados na Figura 20 não apresentam grandes diferenças em relação às análises de Paula et al. (2017), cujas velocidades variaram de  $0,8$  a  $5,5 \text{ ms}^{-1}$ , e foram mais intensas no inverno e no norte de MG. Vale ressaltar que Paula et al. (2017) utilizaram apenas dados de estações meteorológicas e a extrapolação vertical da velocidade para 100 m.



**Figura 19** - Intensidade média sazonal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 10 metros.

O padrão de direção e intensidade do vento a 10 e 100 metros é influenciado principalmente pelo ASAS, que é um centro de alta pressão que desempenha um papel importante no clima do continente sul-americano; vale ressaltar que Reboita et al. (2019) mostram que a área de atuação do ASAS está se expandindo para o sul e oeste em comparação com sua posição climática atual e projeções climáticas. A expansão do ASAS pode alterar as condições climáticas, intensificando a periodicidade dos períodos secos, impactando diretamente o setor de energia da região Sudeste do Brasil. O ASAS influencia a região especialmente no inverno, quando ganha força e se estende para o oeste do Oceano Atlântico, dificultando movimentos convectivos e frentes frias no Sudeste do Brasil e, conseqüentemente, reduzindo as taxas de precipitação (REBOITA et al., 2015; REBOITA et al., 2017). Portanto, verifica-se a possível complementaridade entre vento e energia hidrelétrica (com taxas máximas de precipitação no verão) durante o inverno.

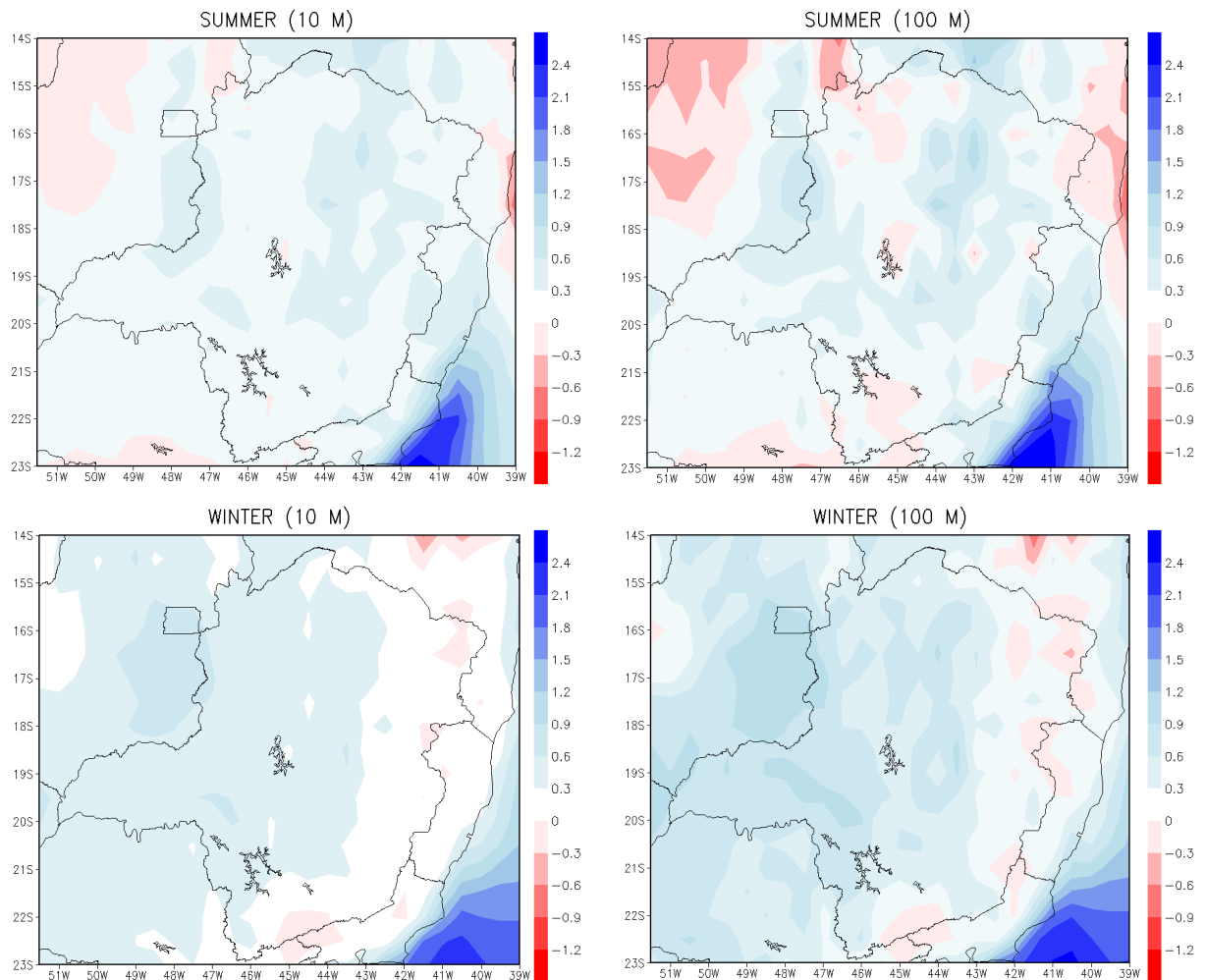




**Figura 20** - Intensidade média sazonal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 100 metros.

### 5.3 Análise da relação precipitação x intensidade do vento

Conforme observado, o vento em Minas Gerais é mais intenso durante o inverno e a primavera – estações que geralmente apresentam menores índices pluviométricos demonstrando que o vento e a precipitação possuem uma relação inversa que pode ser explicada devido à atuação dos fenômenos atmosféricos já mencionados (ASAS, SF e a ZCAS). Neste sentido, a Figura 21 apresenta as diferenças (para o verão e inverno) da intensidade do vento entre um período seco e um chuvoso. Pode-se observar que as diferenças são positivas na maior parte do Estado para as duas estações, indicando que ocorreu um incremento na intensidade do vento de até  $1,5 \text{ ms}^{-1}$  durante o período seco.



**Figura 21** – Diferenças entre as intensidades do vento, período seco (2014/2015) – período úmido (2016) a 10 e 100 metros.

Segundo Coelho et al. (2015b) e Silva (2019), os anos de 2014 e 2015 foram os que apresentaram as maiores anomalias negativas de precipitação nos meses de janeiro dentre o período de 1971 e 2017. Em janeiro de 2016, segundo Silva (2019) ocorreu uma anomalia positiva de precipitação (cerca de 60 mm) para a mesma região. As diferenças positivas apresentadas na figura acima indicam, mais uma vez, a relação inversa existente entre estas variáveis climáticas, sendo que o vento tende a ser mais intenso em períodos secos.

#### 5.4 Análise da direção predominante do vento

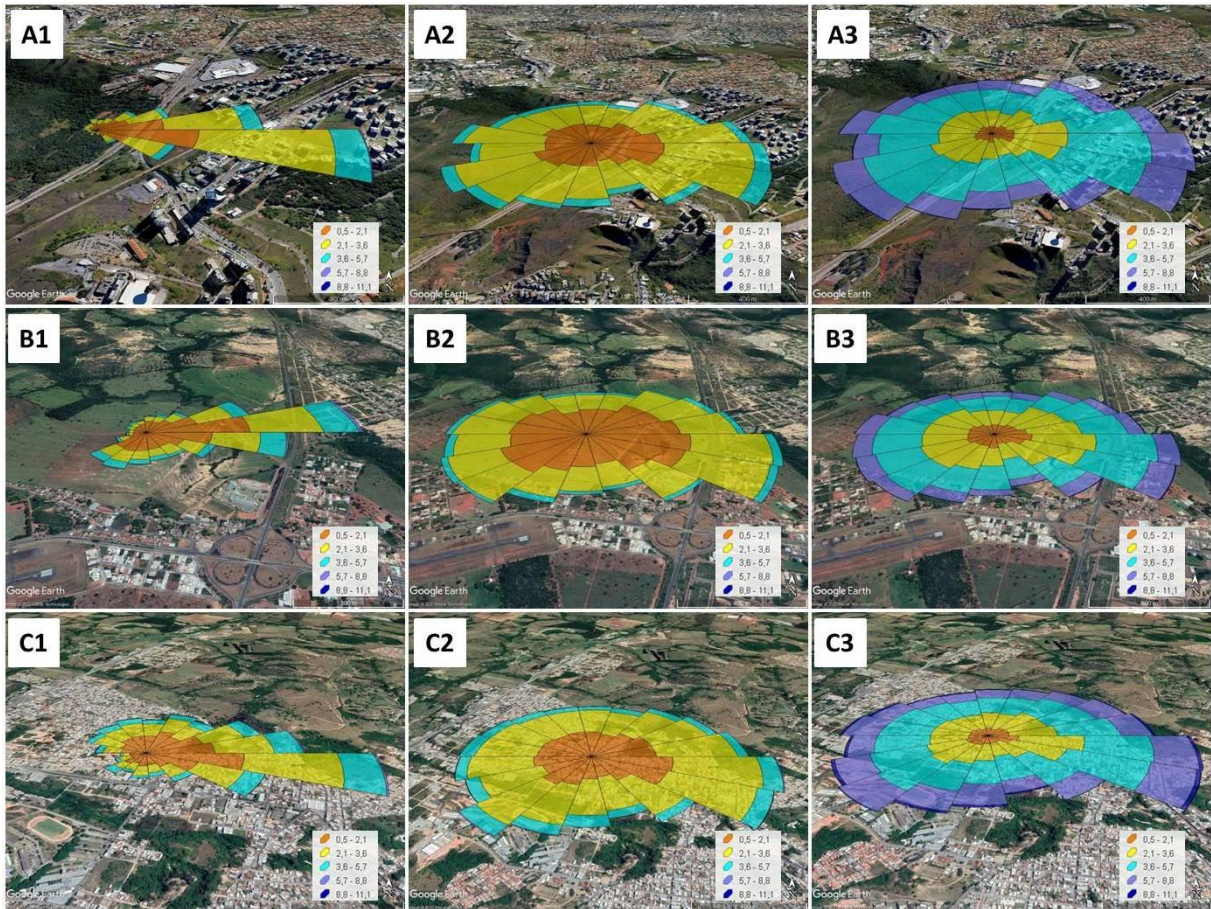
Com a utilização de rosas dos ventos, a direção predominante do vento do GFS (10 metros) foi comparada à direção registrada pelas estações meteorológicas em doze locais. Além disso, são apresentadas as rosas dos ventos com a direção predominante do vento

registrado pelo GFS a 100 metros. Como destacado por Emeksiz et al. (2019), a análise da direção do vento pode fornecer informações que auxiliam no posicionamento da turbina eólica, a fim de maximizar a eficiência máxima. Da Tabela 10, pode-se observar que, para todos os dados, o vento apresentou uma direção nordeste-sudeste. Para os dados observados a 10 metros, as estações apresentaram a direção mais heterogênea. Os dados simulados pelo GFS, a 10 e 100 metros, apresentaram a direção nordeste-sudeste como predominante do vento, e não mostraram diferenças significativas de direção na diferença de altura, como ocorreu com a intensidade do vento. Observe que, a princípio, o GFS não simula satisfatoriamente os dados de direção a 10 metros.

Como exemplo, as estações de Belo Horizonte, Curvelo e Formiga (a 10 e 100 metros) têm uma direção de vento predominante similar. E, como pode ser visto na Figura 22, os diagramas de direção do vento simulados pelo GFS estão espacialmente melhores distribuídos. Em análise geral, as turbinas eólicas estariam melhor posicionadas na direção NE-SE onde captariam a maior frequência de ventos. As demais rosas dos ventos podem ser observadas no Apêndice B. Além disso, no Apêndice D é apresentado um tutorial de utilização dos *softwares* WRPLOT View e Google Earth, utilizados na montagem das figuras.

**Tabela 10** – Direção predominante do vento.

<b>Estação</b>	<b>Observado (10 m)</b>	<b>Simulado (10 m)</b>	<b>Simulado (100 m)</b>
Belo Horizonte	NE - SE	NE - SE	NE - SE
Curvelo	NE - SE	NE - SE	NE - SE
Diamantina	L - S	NE - SE	NE - SE
Formiga	NE - SE	NE - SE	NE - SE
Juiz de Fora	N - L	NE - SE	NE - SE
João Pinheiro	L - S	NE - SE	NE - SE
Montes Claros	N - L	NE - SE	NE - SE
São João Del Rei	L - S	NE - SE	NE - SE
Timóteo	NO - NE	NE - SE	NE - SE
Teófilo Otoni	NE - L	NE - SE	NE - SE
Uberlândia	N - L	NE - SE	NE - SE
Varginha	L - S	NE - SE	NE - SE



**Figura 22** - Rosas dos ventos, de 2013 a 2017, para (A) Belo Horizonte, (B) Curvelo e (C) Formiga. Considerando (1) dados observados, (2) dados GFS (10 metros) e (3) dados GFS (100 metros). A legenda está em  $\text{ms}^{-1}$ .

Pelas figuras é possível perceber que o GFS cria um padrão para a direção do vento, não apresentando modificações expressivas na comparação entre 10 e 100 metros. A ausência de mudanças na direção do vento sobre as cidades (percebe-se que a maioria das estações analisadas está localizada em centros urbanos ou próximas a eles) dá a entender que a urbanização apresentou pouca ou nenhuma influência. Entretanto, o processo de urbanização potencializa a perda de energia do ar para a superfície, acarretando influências tanto na intensidade quanto na direção predominante do vento. Vale ressaltar ainda que os centros urbanos crescem de forma proporcional ao crescimento populacional e envolvem mudanças no uso e ocupação do solo (resultado das atividades humanas) que modificam as condições de rugosidade superficial. Desta forma, pode-se entender que o GFS não representou bem as condições do terreno no processo de interpolação da direção (visto que o primeiro nível de interpolação do modelo é a 10 metros).

## 5.5 Variabilidade mensal e diurna

Em relação à variabilidade mensal, as médias de velocidade do vento são maiores entre julho e outubro em MG, reforçando mais uma vez a complementaridade entre os padrões de vento e precipitação. Durante o verão e o outono (quando as médias de velocidade do vento são mais baixas), as taxas mais altas de precipitação garantem que as usinas hidrelétricas possam operar com a máxima eficiência. Além disso, durante a estação seca, ventos mais fortes podem produzir energia para ajudar na demanda energética do Estado. A 100 m, cidades como Uberlândia, Montes Claros e Teófilo Otoni (localizadas no Triângulo Mineiro, região Norte e Vale do Mucuri, respectivamente) apresentaram médias de velocidade do vento próximas a  $6 \text{ ms}^{-1}$ . A 10 metros, as observações e resultados do GFS mostram valores entre  $1,5$  e  $3 \text{ ms}^{-1}$ . As médias mais baixas de velocidade do vento foram registradas entre fevereiro e maio.

Para a maioria das estações, a comparação entre perfis observados e simulados mostrou padrões semelhantes (Figura 23). Os melhores resultados foram encontrados para Belo Horizonte, São João Del Rei e Varginha (municípios onde as estações estão localizadas em áreas com poucos obstáculos, em geral com campos ou plantações agrícolas), enquanto maiores diferenças podem ser observadas em Diamantina, Montes Claros e Juiz de Fora (regiões onde as estações estão localizadas em áreas com maiores obstáculos, como montanhas (no caso de Diamantina) e áreas residenciais (em Montes Claros e Juiz de Fora)). Em geral, o modelo GFS superestimou os valores (10 metros) quando comparadas às observações, exceto Diamantina, Juiz de Fora e São João Del Rei (também mostradas pelas variações percentuais).

Quanto à variabilidade da velocidade do vento diurno, a velocidade mais alta, a 10 metros, foi registrada a partir das 12 horas, e a menor entre 0 e 6 horas, de acordo com o ciclo diurno da temperatura da superfície da Terra. A 100 metros, a velocidade mais alta ocorreu entre 0h e 6 h (noite e madrugada) e diminuiu ao longo do dia. Para a maioria dos locais, conforme identificado para a análise mensal de variabilidade, os perfis observados e simulados mostram padrões semelhantes (Figura 24). O modelo GFS também superestimou os valores (a 10 metros) quando comparado aos valores observados, exceto em Juiz de Fora e Diamantina. Todos os perfis médios podem ser observados no Apêndice C.

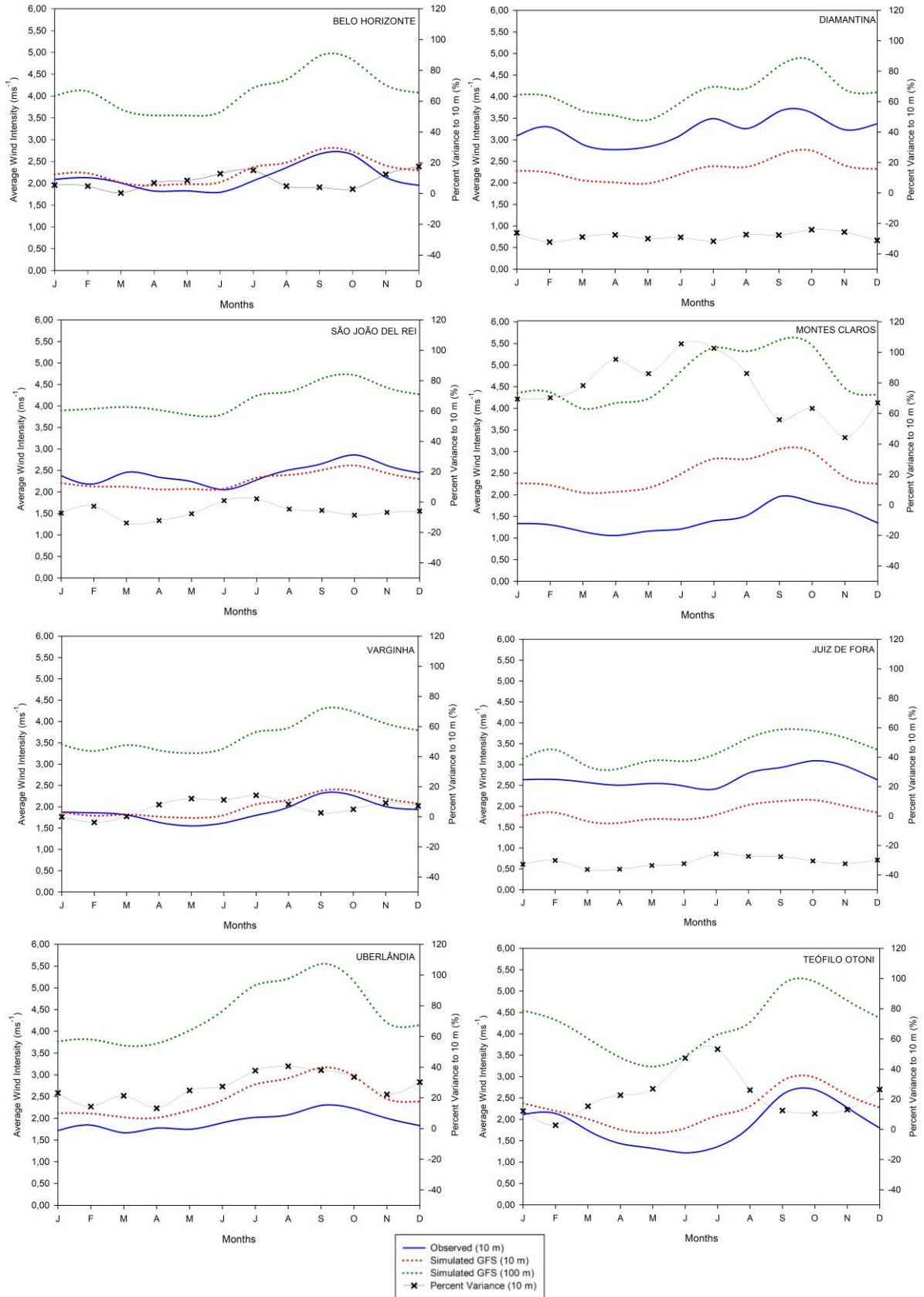


Figura 23 – Perfil médio mensal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ).

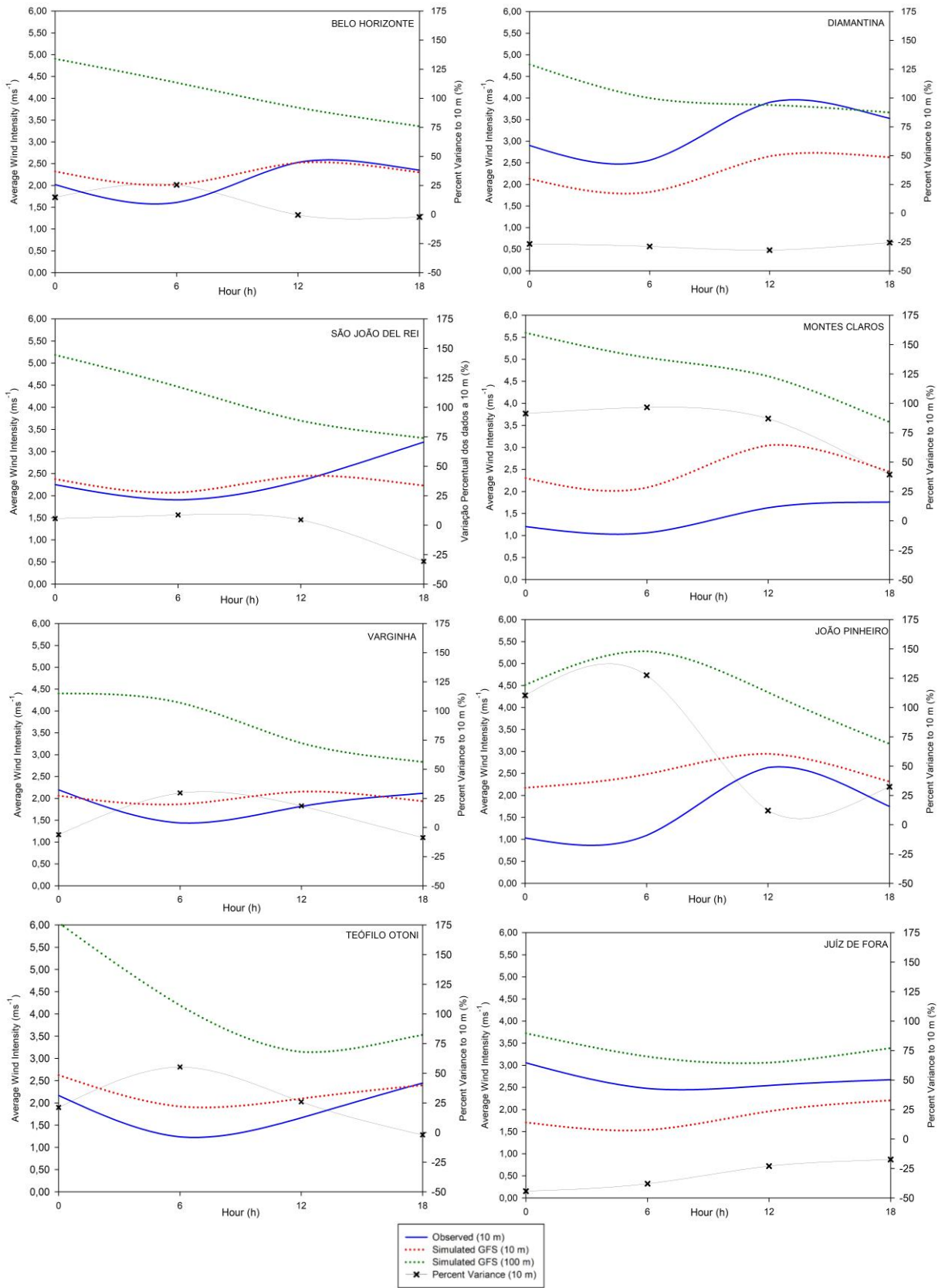


Figura 24 - Perfil médio diurno do vento.

## 5.6 Análise da distribuição de Weibull

As estatísticas são utilizadas em estudos de vento para verificar a sua variabilidade e o seu comportamento ao longo do tempo (acima, abaixo ou igual ao valor médio; além de verificar com que frequência valores extremos de velocidades ocorrem). É uma maneira de facilitar a comparação entre diferentes conjuntos de dados. O parâmetro de forma ( $k$ ) de Weibull, quando apresenta valores altos, indica que a velocidade do vento apresentou pouca variabilidade em torno de um valor médio, enquanto o parâmetro de escala ( $c$ ) indica o valor médio dos dados. Em todos os locais, considerando observações a 10 m, os valores de ( $k$ ) estavam entre 1 e 2,16. Os valores de ( $c$ ) apresentaram valores com maior variabilidade (Tabela 11). Segundo Patel (2006), a curva à esquerda ( $k$  igual ou próxima a 1, denominada distribuição exponencial), como no caso de Timóteo e Montes Claros, por exemplo, diz que a maioria dos dias não registrou ventos ou registrou ventos muito fracos com velocidades próximas a zero. Curvas com valores ( $k$ ) iguais ou próximos a 2 (distribuição Rayleigh), como Belo Horizonte, Diamantina, Juiz de Fora e Uberlândia, são distribuições padrão de velocidade do vento (encontradas na maioria dos lugares) e, nesses casos, a maioria dos dias apresentou velocidades abaixo da velocidade média.

**Tabela 11** – Valores dos parâmetros  $k$  e  $c$ , onde  $k$  indica o formato de distribuição e  $c$  indica a velocidade média.

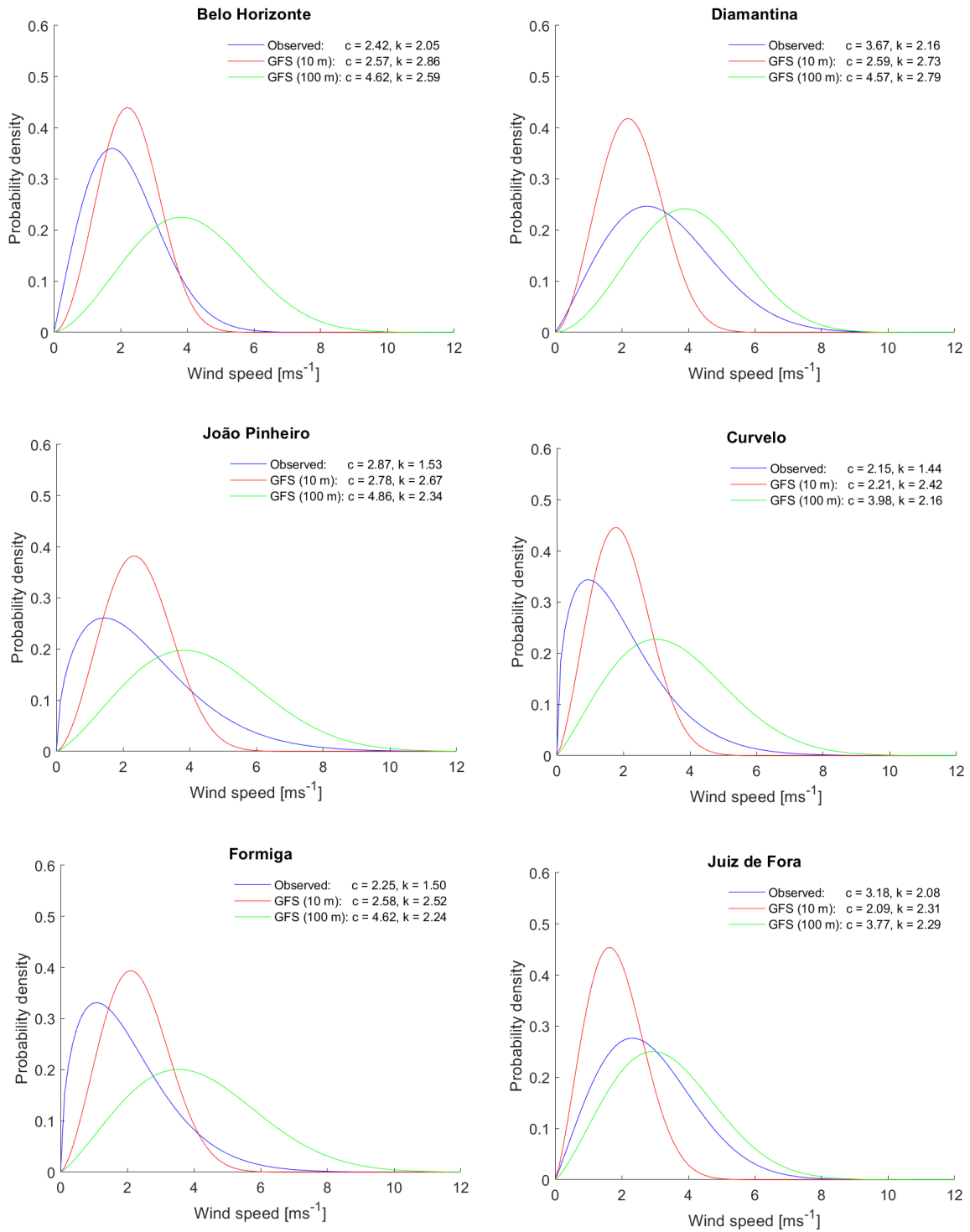
Station	Observed (10 m)		Simulated (10 m)		Simulated (100 m)	
	$k$	$c$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	$k$	$c$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	$k$	$c$ ( $\text{ms}^{-1}$ )
Belo Horizonte	2.05	2.42	2.86	2.57	2.59	4.62
Curvelo	1.44	2.15	2.42	2.21	2.16	3.98
Diamantina	2.16	3.67	2.73	2.59	2.79	4.57
Formiga	1.50	2.25	2.52	2.58	2.24	4.62
Juiz de Fora	2.08	3.18	2.31	2.09	2.29	3.77
João Pinheiro	1.53	2.87	2.67	2.78	2.34	4.86
Montes Claros	1.39	1.73	2.58	2.78	2.64	5.30
S. João Del Rei	1.65	2.74	2.57	2.56	2.29	4.65
Timóteo	1.01	1.03	2.51	1.94	2.32	3.56
Teófilo Otoni	1.70	1.37	1.94	2.50	2.31	3.54
Uberlândia	1.90	2.24	2.22	2.78	2.27	4.97
Varginha	1.81	2.22	2.39	2.26	2.09	4.10



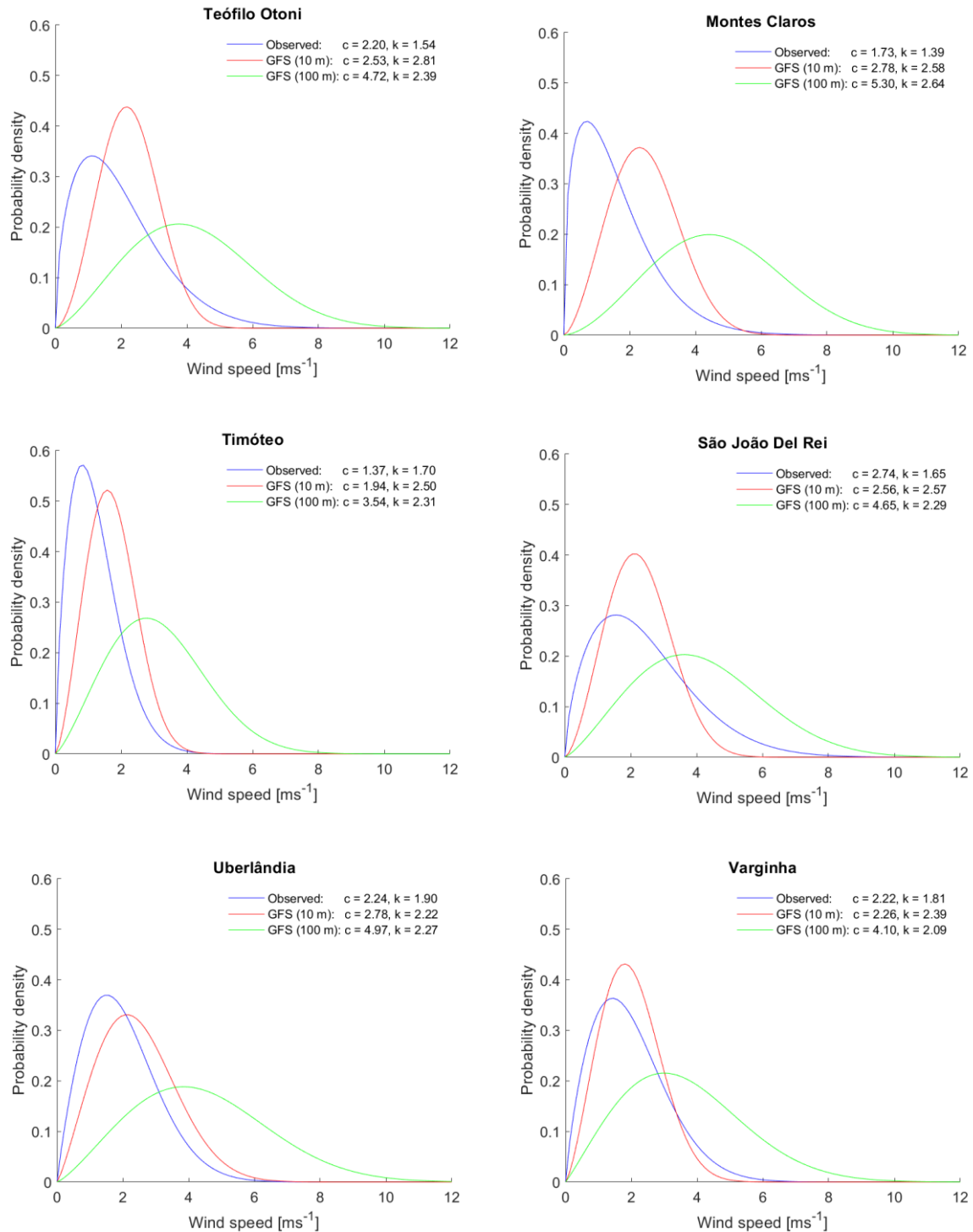
Para o conjunto de dados observados, todos apresentaram assimetrias positivas, onde o valor modal < mediana dos valores < valor médio da velocidade (PISHGAR-KOMLEH et al., 2015). Para o conjunto de dados GFS, de 10 a 100 metros, os valores de (k) permaneceram entre 2 e 3 (Figura 25). Ainda segundo Patel (2006), as curvas com  $k = 3$  (distribuições próximas a Diamantina e Belo Horizonte) são semelhantes a uma distribuição normal, onde a frequência de ventos fortes é igual a frequência de ventos fracos (os valores são simétricos em relação ao valor médio). O parâmetro (c), em geral, foi próximo de  $3 \text{ ms}^{-1}$  (10 metros) e  $4 \text{ ms}^{-1}$  (100 metros). Segundo Ramos et al. (2018), os padrões de distribuição como os citados são positivos para a geração de energia eólica, pois refletem poucos problemas com a mudança de vento, ou seja, os ventos têm menor variabilidade.

Observações e resultados do GFS mostram que a frequência de ocorrência de eventos extremos superiores a  $8 \text{ ms}^{-1}$  foi inferior a 1%. As análises mostram que os ventos têm valores anuais aceitáveis de (k) em relação aos estudos de vento em uma área, mas são inferiores aos encontrados em regiões com alto potencial eólico, como o Nordeste brasileiro (com valores de (k) iguais ou maior que 6) (CRESESB, 2001).

Uma avaliação precisa e confiável dos recursos eólicos desempenha um papel importante no uso efetivo da energia eólica (SHAMSHIRBAND et al., 2016). Dada a variedade de estudos realizados que confirmam a eficiência da distribuição Weibull (SHOAIB et al., 2017; KATINAS et al., 2018; SOUZA et al., 2019) em estudos eólicos, pode-se concluir que os resultados apresentados mostram que os dados de intensidade do vento, aplicados à distribuição Weibull, fornecem informações gerais relevantes sobre a variabilidade do vento.



**Figura 25** - Distribuição de Weibull para a velocidade do vento (dados observados e GFS) para todo o período considerado (2013 a 2017).



**Figura 25** - Distribuição de Weibull para a velocidade do vento (dados observados e GFS) para todo o período considerado (2013 a 2017).

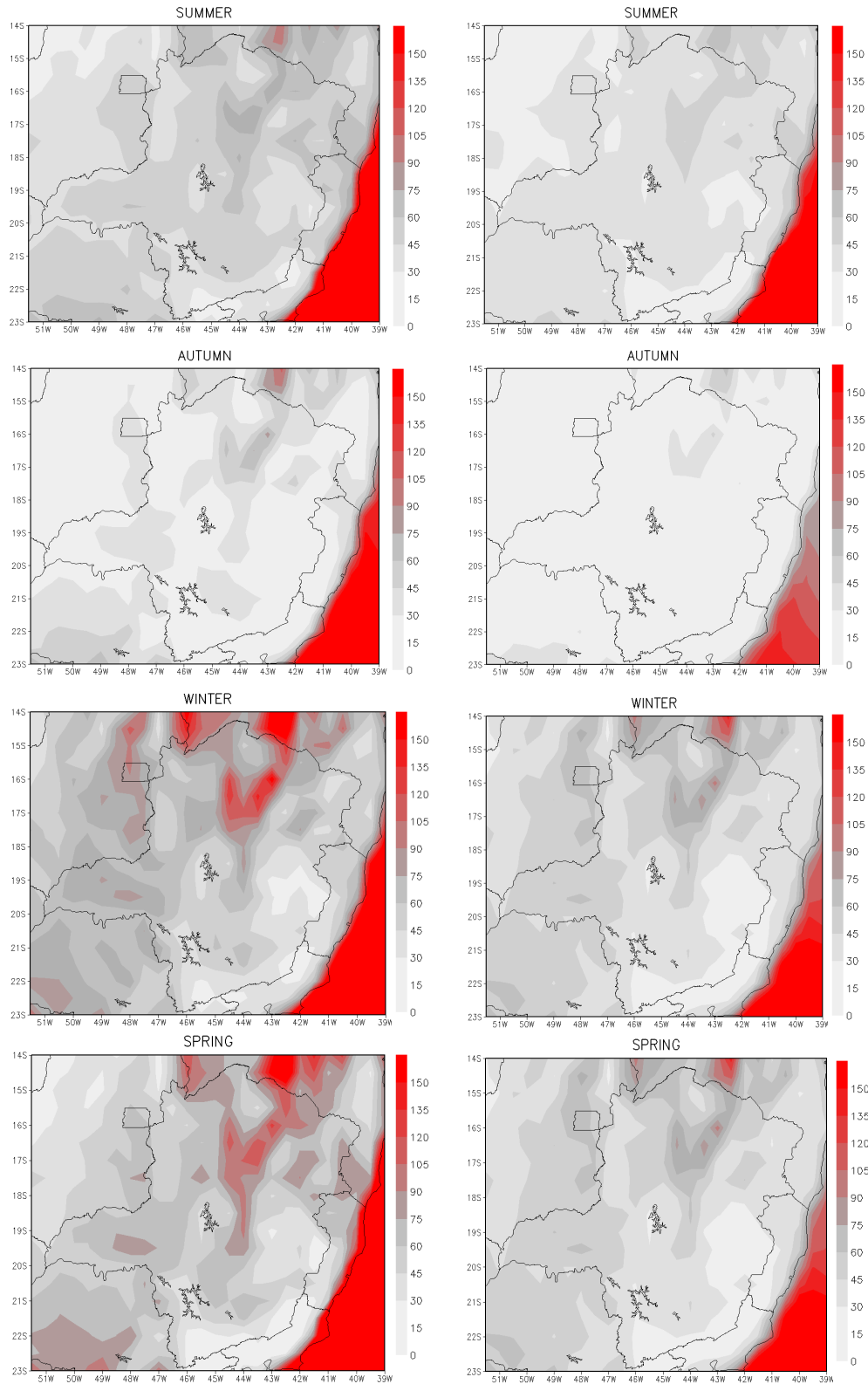
### 5.7 Densidade de potência (dp)

Os valores da dp dependem do modelo da turbina eólica que, dependendo de suas características, apresentará diferentes coeficientes de potência (cp). Os resultados apresentados estão em função da área e a densidade do ar foi considerada igual a  $1.225 \text{ kg m}^{-3}$ . A coluna da esquerda (Figura 26) mostra a média sazonal da dp a 100 metros, desconsiderando a conversão máxima de energia estimada pelo Limite de Betz - onde mostra que o rendimento máximo que pode ser obtido de uma turbina eólica é de 59,3% (MANWELL et al., 2009). Os resultados da dp mostram valores abaixo de  $70 \text{ Wm}^{-2}$  durante o verão e o outono, com valores mais altos no norte e mais baixos no sul do Estado. Durante o inverno e a primavera, os valores são mais altos, chegando a  $150 \text{ Wm}^{-2}$  na região Norte. A coluna da direita (Figura 26) mostra a média sazonal da dp a 100 metros, considerando a conversão máxima de energia estimada pelo Limite de Betz. A figura mostra uma redução aproximada de 60% nos valores da dp analisados anteriormente. Como os valores de cp dependem da turbina eólica escolhida, essa redução é variável e deve ser levada em consideração nos cálculos de potencial, pois influenciam a relação entre a velocidade do vento e a densidade de potência gerada.

Os resultados da dp têm uma alta sensibilidade à velocidade do vento; portanto, seus valores são maiores quando os valores da velocidade do vento são maiores. Regiões com registros de velocidade do vento, a 100 metros, acima de  $4,5 \text{ ms}^{-1}$  apresentaram maiores potenciais eólicos. No entanto, os valores são baixos quando comparados aos resultados da região Nordeste do país, conhecida por seu alto potencial eólico. Ramos et al. (2018), em estudo para localidades do Nordeste (Estado de Alagoas), mostram que durante a estação seca, a dp é de aproximadamente  $700 \text{ Wm}^{-2}$  e, durante a estação chuvosa,  $400 \text{ Wm}^{-2}$ . Entretanto, é importante destacar que o Nordeste apresenta ventos com intensidade superior a  $8 \text{ ms}^{-1}$ , além de altos valores de (k). As regiões com maiores valores de dp também estão localizadas perto do sul da Bahia (região nordeste), onde um grande número de parques eólicos opera.

Para o Estado de MG, os resultados apontam para as mesmas áreas com maior potencial eólico destacadas pela ANEEL (2003) e CEMIG (2010), mas com menor intensidade do vento e valores de dp. No entanto, é importante destacar que o estudo realizado pela CEMIG (2010), por exemplo, utilizou um modelo atmosférico, que possui uma resolução mais alta ( $3,6 \text{ km} \times 3,6 \text{ km}$ ) que os dados do GFS apresentam. Assim, considerando a escala

espacial de 50 km utilizada neste trabalho, a dp encontrada na estação seca, pode-se classificar o potencial eólico de MG na Classe 1 (Tabela 5, pg. 34).



**Figura 26** – Densidade de potência ( $\text{Wm}^{-2}$ ) a 100 m, de 2013 a 2017. Coluna esquerda: dp sem considerar cp. Coluna direita: dp considerando o valor máximo de cp (59,3% pelo limite de Betz (MANWELL et al., 2009)).

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados das análises do GFS, comparados com dados observados por estações meteorológicas, foi possível apresentar a distribuição sazonal e espacial do potencial eólico do Estado de Minas Gerais. De forma geral, os dados de temperatura e umidade relativa foram bem representados pelos dados do GFS. Para a temperatura, os valores de RMSE e  $RMSE_{RD}$  foram inferiores aos desvios observados em todos os municípios, exceto em Montes Claros durante o verão. Os melhores resultados foram registrados durante a primavera, e nos municípios de Curvelo, Formiga, João Pinheiro e São João Del Rei. Para umidade relativa, os resultados foram inferiores ao de temperatura, mas ainda com coeficientes de correlação e concordâncias fortes. Os piores resultados foram durante o outono, onde os municípios Belo Horizonte, Formiga, João Pinheiro, Montes Claros, Teófilo Otoni e Uberlândia não obedeceram a um dos critérios necessários para obter o *skill* da simulação. Os melhores resultados foram observados em Curvelo, durante a primavera.

Quanto à sazonalidade do vento, tanto a 10 metros quanto a 100 metros, a menor intensidade foi registrada durante o verão e outono, e a maior durante o inverno e primavera (chegando a registrar  $4 \text{ ms}^{-1}$  a 10 metros e  $6 \text{ ms}^{-1}$  a 100 metros). Pode-se notar ainda que a interação entre o vento e a superfície influenciou nos valores de velocidade (sendo maiores a 100 metros). O perfil médio horário do vento indica maiores intensidades do vento a partir das 12h (a 10 metros) e durante a noite e madrugada (a 100 metros). Quanto à espacialidade, os ventos são mais intensos na região Norte de Minas Gerais. De forma geral, na comparação com dados observados de velocidade do vento, o modelo GFS apresenta padrões e valores semelhantes aos observados, contudo superestima os valores, à exceção de duas localidades (Diamantina e Juiz de Fora); já quanto à direção predominante do vento, há uma maior discrepância entre os registros observados e os resultados do GFS.

Em relação ao potencial eólico, a análise de Weibull mostrou que grande parte das localidades analisadas apresentaram fator  $k$  entre 2 e 3, indicando que, na maior parte do tempo, as velocidades registradas são inferiores aos valores médios. O parâmetro  $c$  apresentou uma maior variabilidade com valores próximos a  $3 \text{ ms}^{-1}$  (10 metros) e  $4 \text{ ms}^{-1}$  (100 metros). Além disso, a frequência de ocorrência de eventos extremos superiores a  $8 \text{ ms}^{-1}$  foi inferior a 1%. Quanto à densidade de potência livre ( $dp$ ) a 100 metros, os valores são maiores durante o inverno e a primavera, chegando atingir um valor médio sazonal igual a  $150 \text{ Wm}^{-2}$ . Neste sentido, pode-se concluir, a partir das análises realizadas, que a região Norte de MG (que apresenta maiores

valores de  $dp$ ) pode ser classificada na Classe 1, apresentando baixo potencial e critérios mínimos para geração de energia elétrica; contudo, requerem estudos mais específicos que levem em consideração dados com melhor resolução espacial, que a utilizada neste trabalho, de forma a avaliar a existência de *hotspots* e análises que verifiquem a viabilidade econômica, social e ambiental em possíveis áreas de implantação de parques eólicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, V. S.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V.; SELKITTO, M. A. Regional industrial policy in the wind energy sector: The case of the State of Rio Grande do Sul, Brazil. **Energy Policy**, New York, v. 111, p. 18-27, 2017.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEEL). **Energia Eólica: Potencial Eólico Brasileiro**, 2003. Disponível em: <[http://www.2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/6\\_3.htm](http://www.2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_3.htm)>. Acesso em: 10 set. 2019.

Agência Nacional das Águas (ANA). **Dados de operação dos reservatórios SIN. SAR: Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**, 2018. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br/MedicaoSin?dropDownListEstados=14&dropDownListReservatorios=19115&dataInicial=01%2F01%2F2017&dataFinal=01%2F08%2F2018&button=Buscar>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

AQUILA, G.; ROCHA, L. C. S.; ROTELA JÚNIOR, P.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; PAIVA, A. P. Wind power generation: An impact analysis of incentive strategies for cleaner energy provision in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, New York, v. 137, p. 1100-1108, 2016.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. de; YANAGI, S. de N. M.; NETO, O. B. S. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 247-256, abr. 2014.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária e cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). **Presidência da República**, Casa Civil, Brasília, DF, 26 abr. 2002. 181º da Independência e 114º da República.

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikationer**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.

BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

CANCINO-SOLORZANO, Y.; XIBERTA-BERNAT, J. Statistical analysis of wind power in the region of Veracruz (Mexico). **Renewable Energy**, v. 34, p. 1628-1634, 2009.

Centrais Elétricas Brasileiras S. A. (ELETROBRÁS). **Memória da Eletricidade**. 2019. Disponível em: <<https://www.memoriadaeletricidade.com.br/historia-do-setoreletrico/>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). **Atlas do potencial eólico brasileiro**, 2001. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 02 out. 2019.



COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M.A.F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, New York, v. 125, n. 3-4, p. 769-784, 2015a.

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C.; AMBRIZZI, T.; Reboita, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P. ; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 3737-3752, 2015b.

Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG). **33º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG**. CEMIG, 2019. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/BEE\\_MG.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/BEE_MG.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2020.

Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG). **Atlas Eólico de Minas Gerais**. CEMIG, 2010. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/atlas%20eolico%20MG.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas%20eolico%20MG.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2019.

CULTURE CHANGE. **The most frequently asked questions about wind energy (circa 2001-2004)**. 2017. Available in: <<http://www.culturechange.org/wind.htm>>. Access in: 10 sep. 2018.

DUTRA, R. M. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB), Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2019.

ELLIOTTI, D. L.; WENDEL, L. L.; GOWER, G. L. **An assessment of the available wind energy potencial in the contiguous United States**. Springfield: Battelle, 1991.

EMEKSIZ, C.; CETIN, T. In case study: Investigation of tower shadow disturbance and wind shear variations effects on energy production, wind speed and power characteristics. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 148-159, 2019.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 30: Índices Pluviométricos em Minas Gerais**. Sete Lagoas, 2010.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional 2019: Ano Base 2018**. EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

ENERGYBRAS. **Energias Renováveis: Modelos de Turbinas**, 2019. Disponível em: <http://energybras.com.br/produtos/aerogeradores/modelo-h90-20000w>>. Acesso em: 28 abr. 2019.

Global Wind Energy Council (GWEC). **Global Wind Statistics (2014)**. 2015. Available in: <[https://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2015/02/GWEC\\_GlobalWindStats2014\\_FINAL\\_10.2.2015.pdf](https://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf)>. Access in: 02. dec. 2019.

HENNESSEY JUNIOR, J. P. Some Aspects of Wind Power Statistics. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 2, p. 119-128, 1977.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística (IBGE). **Panorama**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>>. Acesso em: 07 out. 2018.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Estações Automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 10 out. 2018.

JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; MIKHAIL, A.; GRABER, D. Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, p. 350-353, 1978.

KALMIKOV, A. **Wind Power Fundamentals**. Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2017. Available in: <http://web.mit.edu/wepa/WindPowerFundamentals.A.Kalmikov.2017.pdf> >. Accessed on: 16 mar. 2020.

KATINAS, V.; GECEVICIUS, G.; MARCIUKAITIS, M. An investigation of wind power density distribution at location with low and high wind speeds using statistical model. **Applied Energy**, v. 218, p.442–451, 2018.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, p. 217-231, 1988.

LABAN, O. N.; MAGHHANGA, C. M.; JOASH, K. Determination of the Surface Roughness Parameter and Wind Shear Exponent of Kisii Region from the On-Site Measurement of Wind Profiles. **Journal of Energy**, v. 2019, p. 1-12, 2019.

MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; DIAS, P. L. S.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 1-21, 2012.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304/1- 1304/13, 2008.

MOSCATI, M. C. L. **Variabilidade da Precipitação no Litoral Leste da Região Nordeste do Brasil**. 1991. 250 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1991.

MOURIÑO, G. L.; ASSIREU, A. T.; PIMENTA, F. Regularization of hydroelectric reservoir levels through hydro and solar energy complementarity. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 549-555, jul./set. 2016.

National Centers For Environmental Prediction (NCEP). **Inventory of File gfs.t00z.pgrb2.0p50.f000**. Available in: <<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/gfs.t00z.pgrb2.0p50.f000.shtml>>. Access in: 08 oct. 2018.

National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA). **Global Forecast System (GFS) [0.5 Deg.]**. Available in: <<https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00634>>. Access in: 08 oct. 2018.

NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetado no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 600-614, 2017.

OBERMANN, A.; BASTIN, S.; BELAMARI, S.; CONTE, D.; GAERTNER, M. A.; LI, L.; AHRENS, B. Mistral and Tramontine wind speed and wind direction patterns in regional climate simulations. **Clim Dyn**, v. 51, p. 1059-1076, 2016.

PRASAD, V. S.; JOHNY, C. J.; MALO, P.; SINGH, S. K.; RAJAGOPAL, E. N. Global retrospective analysis using NGFS for the period 2000-2011. **Current Science**, v. 112, n. 2, p. 370-377, 2017.

PRASAD, V. S., MOHANDAS, S., GUPTA, M. D., RAJAGOPAL, E. N., DUTTA, S. K. **Implementation of Upgraded Global Forecasting Systems (T382L64 and T574L64) at NCMRW**. Available in: <[https://www.researchgate.net/publication/327727886\\_Implementation\\_of\\_Upgraded\\_Global\\_Forecasting\\_Systems\\_T382L64\\_and\\_T574L64\\_at\\_NCMRWF](https://www.researchgate.net/publication/327727886_Implementation_of_Upgraded_Global_Forecasting_Systems_T382L64_and_T574L64_at_NCMRWF)>. Accessed on: 14 mar. 2020.

PATEL, M. R. **Wind and Solar Power Systems: Design, analysis and operation**. 2. ed. New York: Taylor&Francis Group, 2006.

PAULA, D. L. P.; CARDOSO, F. A. C.; CARDOSO, G. P. Q.; VIEIRA, E. M. Modelagem espacial da velocidade do vento a 50, 75 e 100 metros de altura para o Estado de Minas

Gerais, Brasil, empregando geoestatística. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 04, p. 1281-1295, 2017.

PIELKE, R. A. Mesoscale meteorological modeling. **Geophysics Series**, v.78, n.1, p. 676, 2002.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; KEYHANI, A.; SEFEEDPARI, P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 313–322, 2015.

RAIMUNDO, D. R.; SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; BARROS, R. M. Evaluation of greenhouse gas emissions avoided by wind generation in the Brazilian energetic matrix: A retroactive analysis and future potential. **Resources, Conservation & Recycling**, New York, v. 137, p. 270-280, 2018.

RAJAGOPAL, E.N.; GUPTA, M. D.; MOHANDAS, S.; PRASAD, V. S.; GEORGE, J. P.; IYENGAR, G. R.; KUMAR, D. P. **Implementation of T254L64 Global Forecast System at NCMRWF, NCMRWF Technical Report**, pp. 1-42, 2007.

RAMOS, D. N. S.; LYRA, R. F. F.; SILVA JUNIOR, R. S. S.; CAVALCANTE SEGUNDO, G. H.; LOPES, G. E. V. Wind Power in Girau do Ponciano, Alagoas, Brazil Using Anemometric Data and Microscale Modeling. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 279-288, 2018.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; SOUZA, M. R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, New York, v. 51, p. 187-205, 2018.

REBOITA, M. R.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B. A.; PINHEIRO, R. F.; ROCHA, R. P. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 1-15, 2019.

REBOITA, M. S.; MARIETTO, D. M. G.; SOUZA, A.; BARBOSA, M. Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, ano 13, p. 20-37, 2017.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p.185-204, jun. 2010.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 17, ano 11, p. 206-226, jul. 2015.

REIS, A. L.; SILVA, M. S.; REGIS, M. V.; SILVEIRA, W. W.; SOUZA, A. C.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B. Climatologia e eventos extremos de precipitação no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, p. 652-660, 2018.

REGO, E. E.; RIBEIRO, C. O. Successful Brazilian experience for promoting wind energy generation. **The Electricity Journal**, New York, v. 31, p. 13–17, 2018.

RIBEIRO, L. **Mapa da crise hídrica bate recorde e já abrange 265 municípios de Minas Gerais**. 2017. Disponível em: <[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2017/11/20/\\_gerais,917953/mapa-da-crise-hidrica-bate-recorde-e-ja-abrange-265-municipios-de-mg.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2017/11/20/_gerais,917953/mapa-da-crise-hidrica-bate-recorde-e-ja-abrange-265-municipios-de-mg.shtml)>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SÁ JÚNIOR, A. de. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado e Minas Gerais**. 2009. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016.

SHAMSHIRBAND, S.; KEIVANI, A.; MOHAMMADI, K.; LEE, M.; HAMID, S. H. A.; PETKOVIC, D. Assessing the proficiency of adaptive neuro-fuzzy system to estimate wind power density: Case study of Aligoodarz, Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 429–435, 2016.

SHOAIB, M.; SIDDIQUI, I.; AMIR, Y. M.; REHMAN, S. U. Evaluation of wind power potential in Baburband (Pakistan) using Weibull distribution function. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1343–1351, 2017.

SILVA, A. R.; PIMENTA, F. M.; ASSIREU, A. T.; SPYRIDES, M. H. C. Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 413–427, 2016.

SILVA, E. D.; REBOITA, M. S. Estudo da precipitação no Estado de Minas Gerais – MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, p. 120-136, 2013.

SILVA, G. K.; SANTOS, A. C. S.; SILVA, M. V. M.; ALVES, J. M. B.; BARBOSA, A. C. B.; FREIRE, C. O.; ALCÂNTARA, C. R.; SOMBRA, S. S. Estudo dos Padrões de Ventos Offshore no Litoral do Ceará Utilizando Dados Estimados pelo Produto de Satélites BSW. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 579-690, 2017.

SILVA, P. N. **Características anômalas do verão de 2019**. 2019. 33 f. Monografia (Graduação em Ciências Atmosféricas) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SIMONSEN, H. **Projeto e construção de turbina eólica de baixa potência**. 2010. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SOUZA, A.; BOUZAHIR, H.; TIZGUI, I.; GUEZAR, F.; OZONUR, D. Probability distributions of wind speed in the Campo Grande, MS, Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, ano 15, p. 138-160, 2019.

TAN, C.; ZHI, Q. The Energy-Water Nexus: A literature Review of the Dependence of Energy on Water. **Energy Procedia**, v. 88, p. 277-284, 2016.

The Wind Power. **Wind Energy Market Intelligence: V90/2000**. 2019. Available in: <[https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_32\\_vestas\\_v90-2000.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_32_vestas_v90-2000.php)>. Access in: 02 dec. 2019.

TIEZZI, R. de O. **Variabilidade hidroclimatológica e seus efeitos no suprimento de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional**. 2015. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**. Dinamarca: Riso National Roskilde, 1989.

VERA, C.S.; HIGGINS, W.; AMADOR, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J. A.; MECHOSO, C. R.; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA, P. L. D.; ZHANG, C. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. **Journal of Climate**, v.19, s/n, p. 4977 - 5000, 2006.

VESTAS. **Vestas V126-3.3**. 2018. Disponível em: <<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/695-vestas-v126-3.3>>. Acesso em 10 sep. 2018.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego: Academic Press, 1995.

YNOUE, R. Y.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; SILVA, G. A. M. **Meteorologia: Noções Básicas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a monsoon climate exists over South America?. **Journal of Climate**, v. 11, p. 1020–1040, 1998.

## APÊNDICE A

**Tabela 12** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Verão – DJF).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	EM
B. Horizonte	23.92	21.39	3.33	3.41	3.21	1.98	0.83	0.79	-2.53
Curvelo	24.99	24.38	3.82	4.07	2.04	1.95	0.88	0.93	-0.61
Diamantina	20.32	21.38	3.08	3.74	2.23	1.96	0.85	0.89	1.06
Formiga	23.63	21.80	3.52	3.48	2.61	1.86	0.86	0.86	-1.83
Juiz de Fora	22.08	22.37	3.31	3.86	2.28	2.27	0.81	0.89	0.29
João Pinheiro	23.85	22.86	3.33	3.24	2.10	1.85	0.84	0.89	-0.99
Montes Claros	25.56	22.04	3.99	3.91	4.03	1.97	0.88	0.77	-3.52
S. J. Del Rei	22.46	20.99	3.85	3.43	2.30	1.77	0.89	0.90	-1.47
Timóteo	24.75	24.48	3.37	4.21	2.60	2.58	0.79	0.87	-0.27
Teófilo Otoni	25.16	23.11	3.42	3.67	2.86	1.99	0.84	0.84	-2.05
Uberlândia	24.38	23.06	3.28	3.46	2.55	2.19	0.79	0.85	-1.32
Varginha	22.74	21.48	3.72	3.54	2.30	1.92	0.86	0.90	-1.26

**Tabela 13** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Outono - MAM).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	EM
B. Horizonte	22.11	19.29	3.41	3.62	2.05	1.61	0.90	0.81	-2.82
Curvelo	23.11	22.61	4.18	4.19	1.78	1.71	0.92	0.95	-0.5
Diamantina	18.79	20.04	3.15	3.80	2.25	1.87	0.87	0.89	1.25
Formiga	21.44	19.53	4.01	3.81	2.42	1.48	0.93	0.91	-1.91
Juiz de Fora	19.33	19.64	3.36	3.86	2.04	2.01	0.85	0.91	0.31
João Pinheiro	22.68	21.32	2.75	2.78	2.07	1.56	0.89	0.90	-1.36
Montes Claros	24.45	21.15	4.14	4.01	3.71	1.70	0.91	0.81	-3.3
S. J. Del Rei	19.94	18.77	4.22	3.77	2.24	1.91	0.89	0.92	-1.17
Timóteo	22.60	22.48	3.41	4.38	2.49	2.48	0.83	0.89	-0.12
Teófilo Otoni	23.73	21.70	3.51	3.90	2.84	1.99	0.86	0.85	-2.03
Uberlândia	23.15	21.28	3.40	3.66	2.64	1.86	0.86	0.86	-1.87
Varginha	20.28	18.96	3.90	3.97	2.24	1.81	0.89	0.92	-1.32

**Tabela 14** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Inverno - JJA).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	EM
B. Horizonte	20.01	17.38	3.70	4.26	3.13	1.70	0.92	0.86	-2.63
Curvelo	20.60	21.32	4.78	4.88	1.94	1.80	0.93	0.96	0.72
Diamantina	16.34	17.41	3.51	4.38	2.31	2.05	0.89	0.91	1.07
Formiga	18.95	17.88	4.42	4.41	1.84	1.50	0.94	0.96	-1.07
Juiz de Fora	16.82	17.29	3.47	4.19	2.42	2.37	0.82	0.89	0.47
João Pinheiro	20.79	20.00	3.93	4.20	1.81	1.63	0.92	0.95	-0.79
Montes Claros	22.35	19.80	4.44	4.68	3.02	1.63	0.94	0.89	-2.55
S. J. Del Rei	16.57	16.74	4.86	4.37	2.43	2.43	0.87	0.93	0.17
Timóteo	20.29	20.29	3.33	4.58	2.71	2.71	0.81	0.87	0
Teófilo Otoni	20.76	19.54	3.36	3.87	2.26	1.91	0.87	0.90	-1.22
Uberlândia	21.51	20.35	4.05	4.62	2.16	1.82	0.92	0.94	-1.16
Varginha	17.61	16.72	4.28	4.50	2.17	1.98	0.90	0.94	-0.89

**Tabela 15** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura (Primavera - SON).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	EM
B. Horizonte	23.10	21.05	4.15	4.33	2.88	2.02	0.89	0.89	-2.05
Curvelo	24.94	25.69	4.59	4.80	2.17	2.04	0.91	0.94	0.75
Diamantina	19.51	21.24	4.05	4.89	2.88	2.30	0.88	0.89	1.73
Formiga	22.98	21.90	4.30	4.54	2.11	1.82	0.92	0.94	-1.08
Juiz de Fora	19.60	20.75	4.08	4.54	2.60	2.33	0.86	0.90	1.15
João Pinheiro	24.12	24.07	4.28	4.30	1.92	1.92	0.90	0.95	-0.05
Montes Claros	25.65	23.28	4.49	4.72	3.08	1.97	0.91	0.89	-2.37
S. J. Del Rei	20.68	20.34	4.63	4.51	1.94	1.91	0.91	0.95	-0.34
Timóteo	23.55	24.00	3.94	4.86	2.81	2.77	0.82	0.89	0.45
Teófilo Otoni	23.68	22.34	4.02	4.45	2.42	2.02	0.89	0.92	-1.34
Uberlândia	24.82	24.61	4.20	4.51	2.18	2.17	0.88	0.93	-0.21
Varginha	21.53	20.97	4.52	4.65	1.99	1.91	0.91	0.95	-0.56



**Tabela 16** – Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Verão - DJF).

<b>Estação</b>	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<b>EM</b>
B. Horizonte	65.89	83.96	16.25	14.44	21.85	12.28	0.69	0.57	18.07
Curvelo	67.48	75.27	18.70	17.22	12.43	9.68	0.86	0.88	7.79
Diamantina	74.37	81.63	16.93	16.67	13.23	11.06	0.78	0.83	7.26
Formiga	71.33	85.44	17.55	13.34	17.57	10.47	0.80	0.71	14.11
Juiz de Fora	77.40	85.97	15.54	13.60	13.44	10.34	0.76	0.78	8.57
João Pinheiro	67.07	81.64	18.03	14.06	17.78	10.18	0.83	0.73	14.57
Montes Claros	61.80	80.95	19.27	17.05	21.72	10.25	0.85	0.70	19.15
S. J. Del Rei	74.95	86.84	18.14	12.58	15.79	10.39	0.83	0.75	11.89
Timóteo	70.60	78.74	16.35	17.33	15.59	13.29	0.69	0.76	8.14
Teófilo Otoni	69.71	83.21	17.59	16.53	17.12	10.53	0.81	0.76	13.5
Uberlândia	69.32	83.36	18.70	13.99	18.51	12.06	0.76	0.70	14.04
Varginha	73.80	87.08	19.30	12.30	18.11	12.32	0.78	0.69	13.28

**Tabela 17** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Outono – MAM),

<b>Estação</b>	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<b>EM</b>
B. Horizonte	66.74	86.49	13.82	12.74	21.58	8.71	0.79	0.54	19.75
Curvelo	69.32	77.80	17.34	15.96	12.49	9.21	0.86	0.86	8.48
Diamantina	77.41	83.62	14.91	14.86	11.59	9.78	0.78	0.84	6.21
Formiga	73.40	87.13	16.24	11.63	16.31	8.81	0.85	0.71	13.73
Juiz de Fora	82.11	89.53	12.86	10.56	11.13	8.30	0.77	0.77	7.42
João Pinheiro	66.39	83.72	16.28	12.20	19.70	9.36	0.82	0.63	17.33
Montes Claros	61.70	81.52	16.77	15.65	21.80	9.06	0.85	0.65	19.82
S. J. Del Rei	77.94	88.18	17.33	11.53	14.47	10.22	0.82	0.76	10.24
Timóteo	75.66	81.38	14.02	15.43	12.71	11.35	0.71	0.79	5.72
Teófilo Otoni	71.06	84.34	15.36	14.76	16.74	10.20	0.77	0.71	13.28
Uberlândia	67.13	85.75	17.37	12.17	21.69	11.13	0.77	0.58	18.62
Varginha	76.73	88.10	17.67	11.22	15.29	11.20	0.79	0.71	11.37

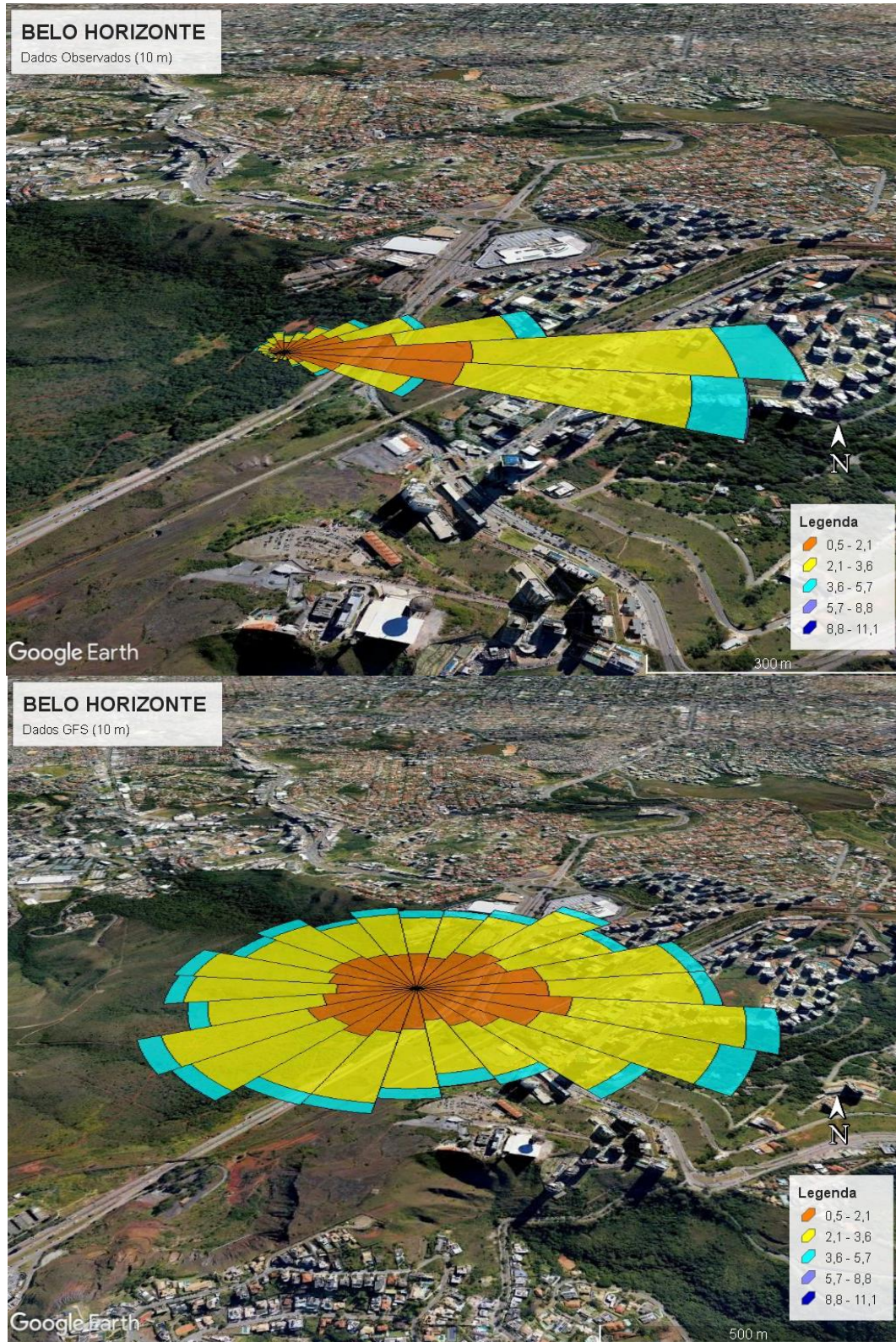
**Tabela 18** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Inverno – JJA).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	EM
B. Horizonte	59.90	75.93	15.97	19.29	18.80	9.84	0.86	0.75	16.03
Curvelo	60.39	62.56	19.25	20.34	9.66	9.42	0.89	0.94	2.17
Diamantina	71.27	77.92	17.94	18.80	12.25	10.28	0.84	0.88	6.65
Formiga	65.13	72.31	18.92	19.37	12.13	9.78	0.87	0.90	7.18
Juiz de Fora	78.46	82.90	16.56	15.68	11.74	10.87	0.77	0.85	4.44
João Pinheiro	52.49	64.94	17.30	18.97	15.39	9.05	0.88	0.83	12.45
Montes Claros	51.68	67.12	15.86	20.91	17.97	9.20	0.91	0.79	15.44
S. J. Del Rei	75.04	76.83	21.05	18.85	12.06	11.92	0.83	0.90	1.79
Timóteo	69.67	74.04	15.20	18.05	13.06	12.30	0.74	0.83	4.37
Teófilo Otoni	71.69	79.31	16.30	17.78	13.29	10.88	0.80	0.84	7.62
Uberlândia	51.29	62.53	18.17	20.36	15.30	10.38	0.86	0.84	11.24
Varginha	69.28	77.00	21.12	18.22	14.33	12.07	0.82	0.86	7.72

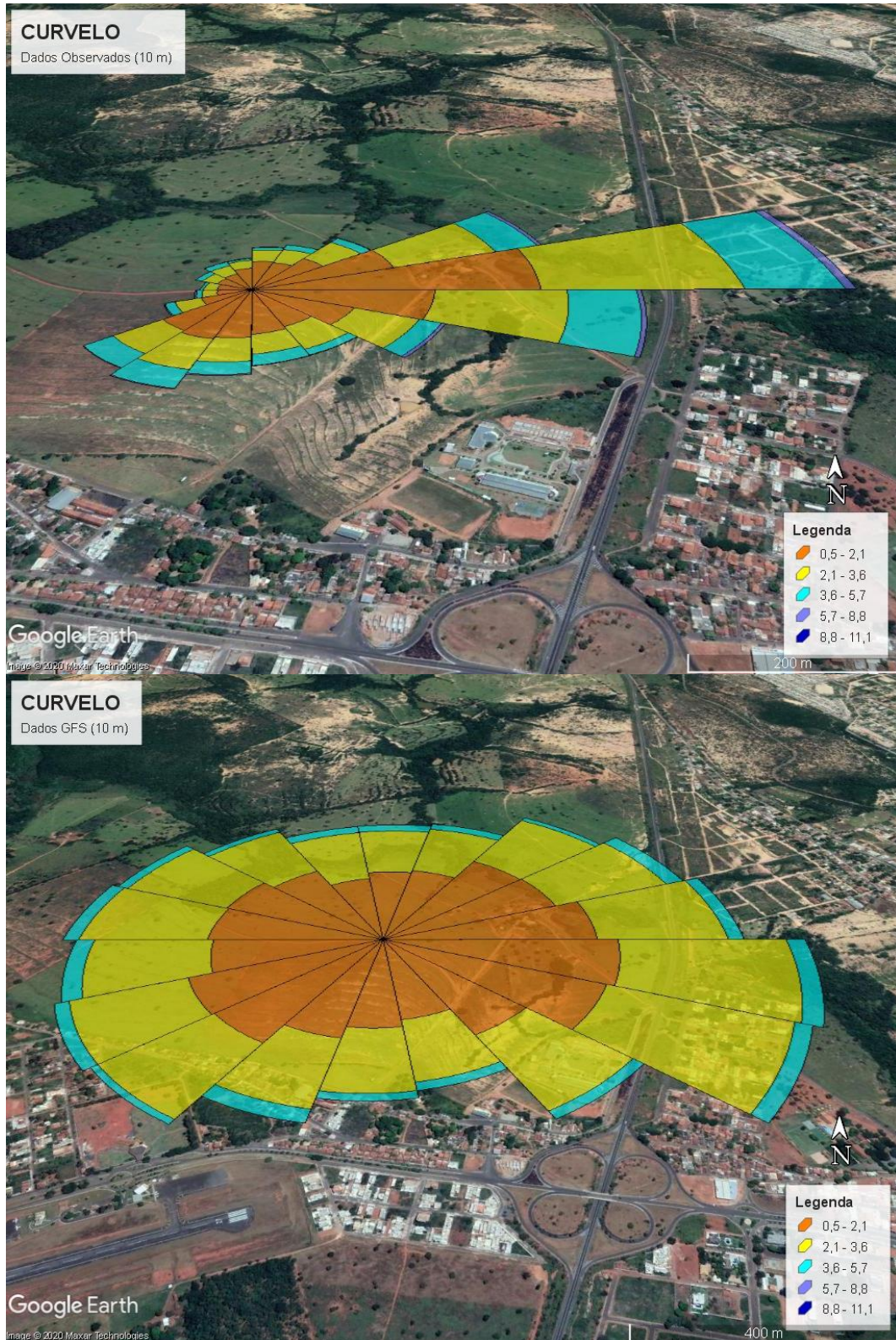
**Tabela 19** - Resultados da aplicação dos métodos estatísticos para a umidade relativa (Primavera – SON).

Estação	$\bar{o}$	$\bar{y}$	$\sigma_o$	$\sigma_y$	<i>RMSE</i>	<i>RMSE<sub>RD</sub></i>	<i>r</i>	<i>d</i>	EM
B. Horizonte	58.68	71.94	18.59	20.05	17.94	12.09	0.81	0.79	13.26
Curvelo	56.00	57.08	21.13	21.03	10.98	10.93	0.87	0.93	1.08
Diamantina	67.40	70.50	20.37	21.22	11.92	11.51	0.85	0.91	3.1
Formiga	61.41	69.65	20.78	21.10	13.28	10.41	0.88	0.90	8.24
Juiz de Fora	76.02	79.44	18.20	17.95	11.49	10.97	0.82	0.89	3.42
João Pinheiro	53.07	61.78	22.12	22.37	13.56	10.39	0.89	0.91	8.71
Montes Claros	50.01	62.34	19.82	23.11	16.32	10.69	0.89	0.86	12.33
S. J. Del Rei	69.76	75.15	20.67	19.84	11.86	10.58	0.86	0.91	5.39
Timóteo	64.47	68.62	17.69	19.87	13.70	13.05	0.76	0.85	4.15
Teófilo Otoni	66.51	75.36	18.50	20.49	14.42	11.38	0.83	0.86	8.85
Uberlândia	54.04	60.11	23.20	23.56	12.65	11.10	0.89	0.92	6.07
Varginha	64.95	73.07	22.53	20.55	13.84	11.21	0.87	0.89	8.12

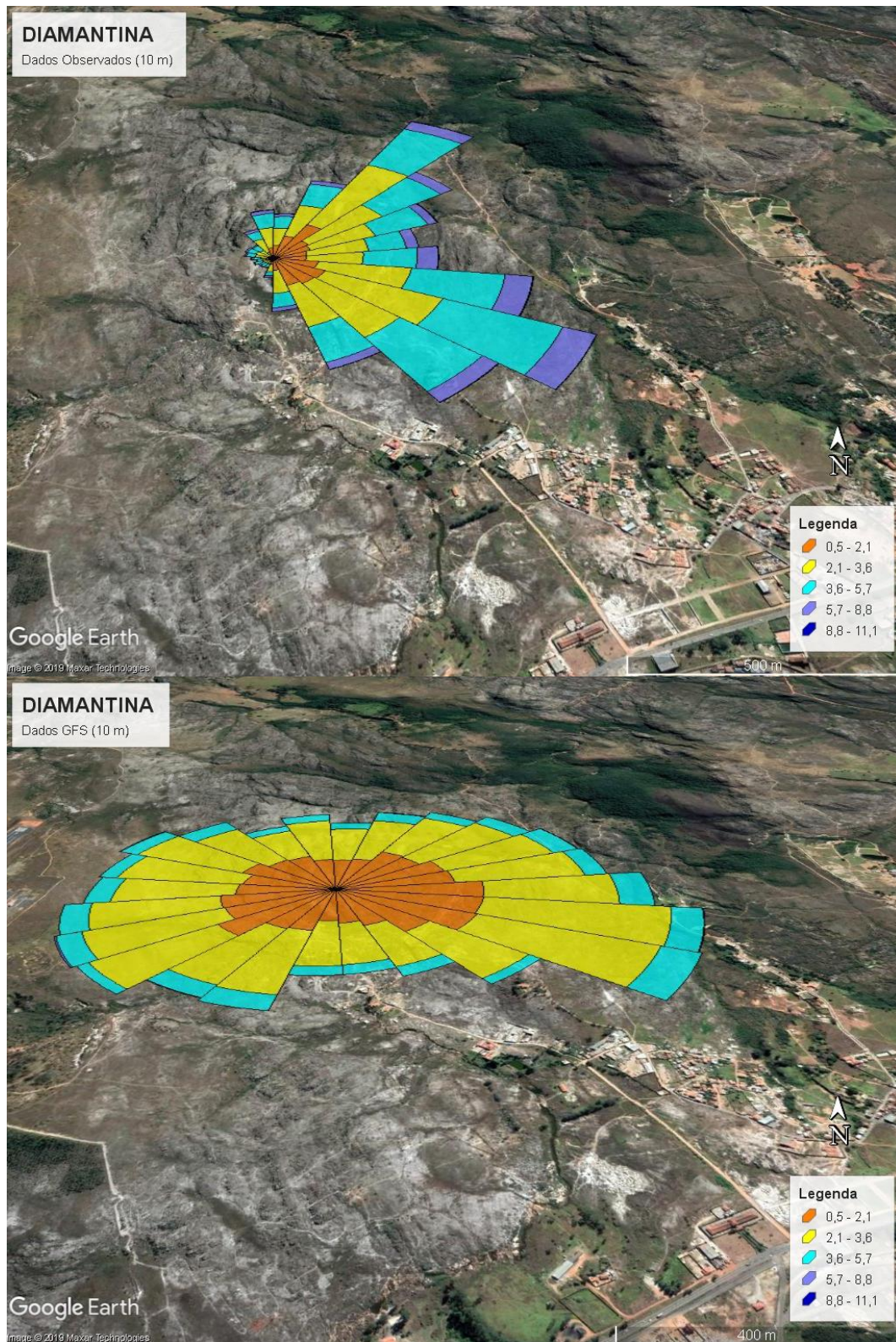
## APÊNDICE B



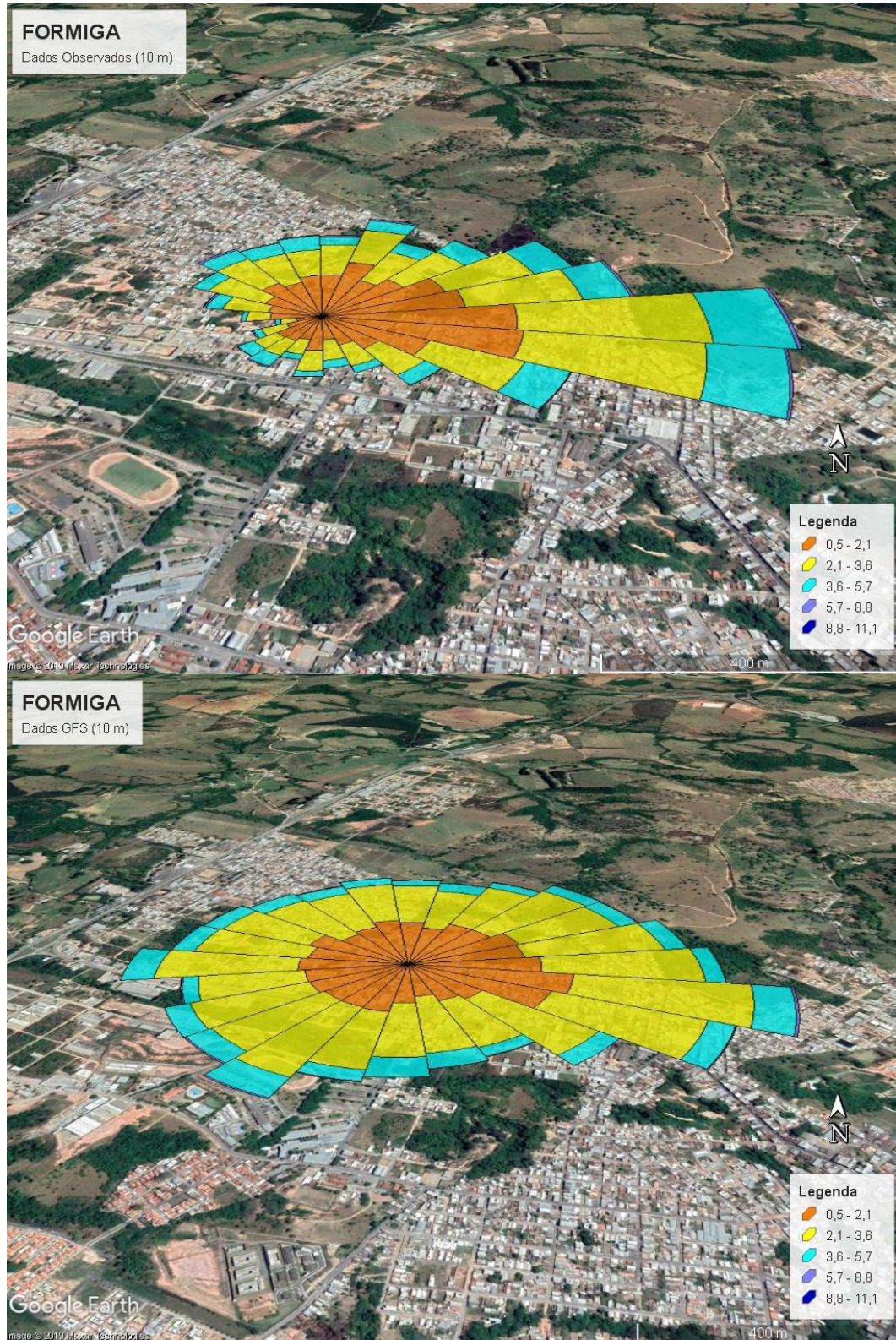
**Figura 27** - Rosas do vento - Belo Horizonte (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



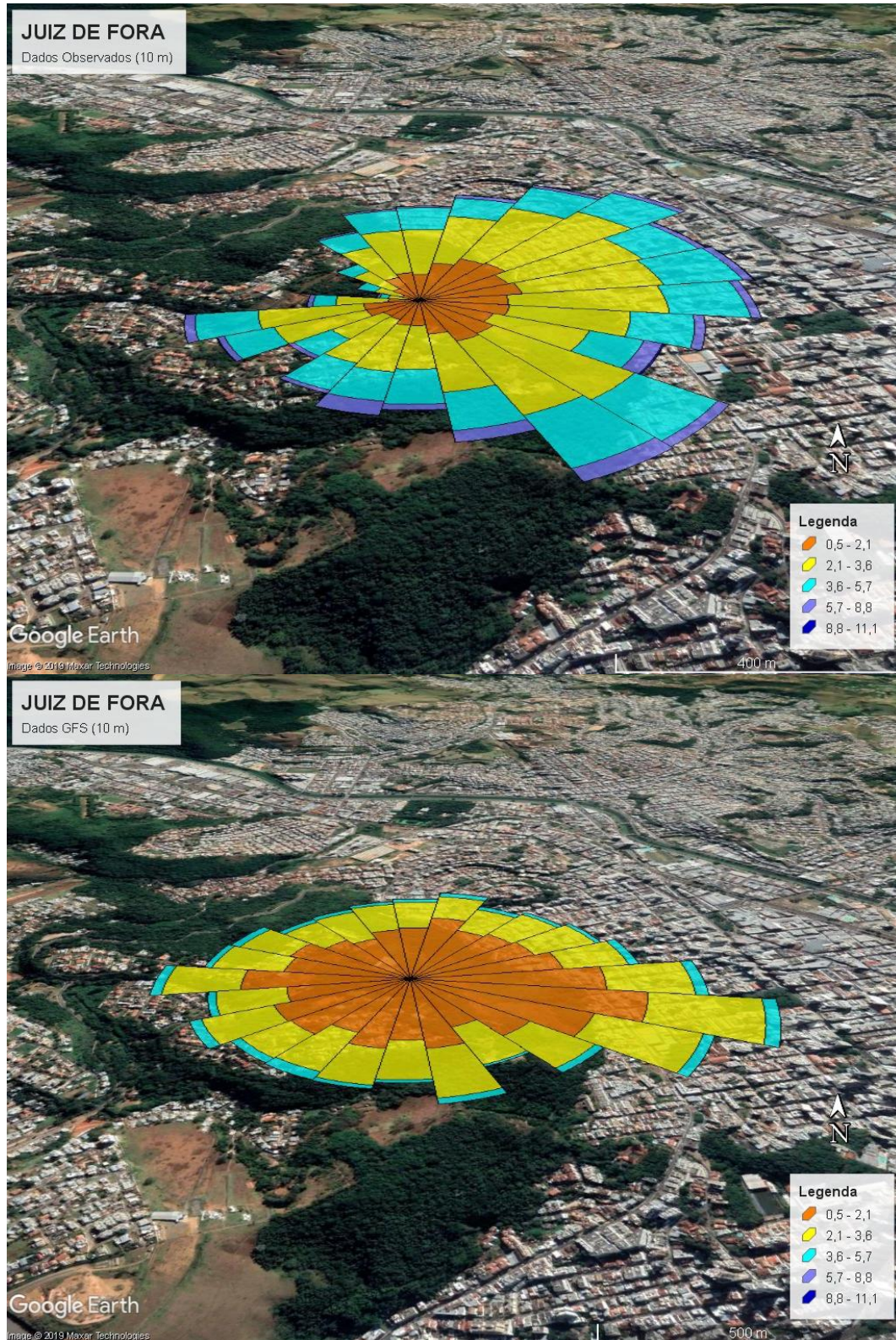
**Figura 28** - Rosas dos ventos - Curvelo (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



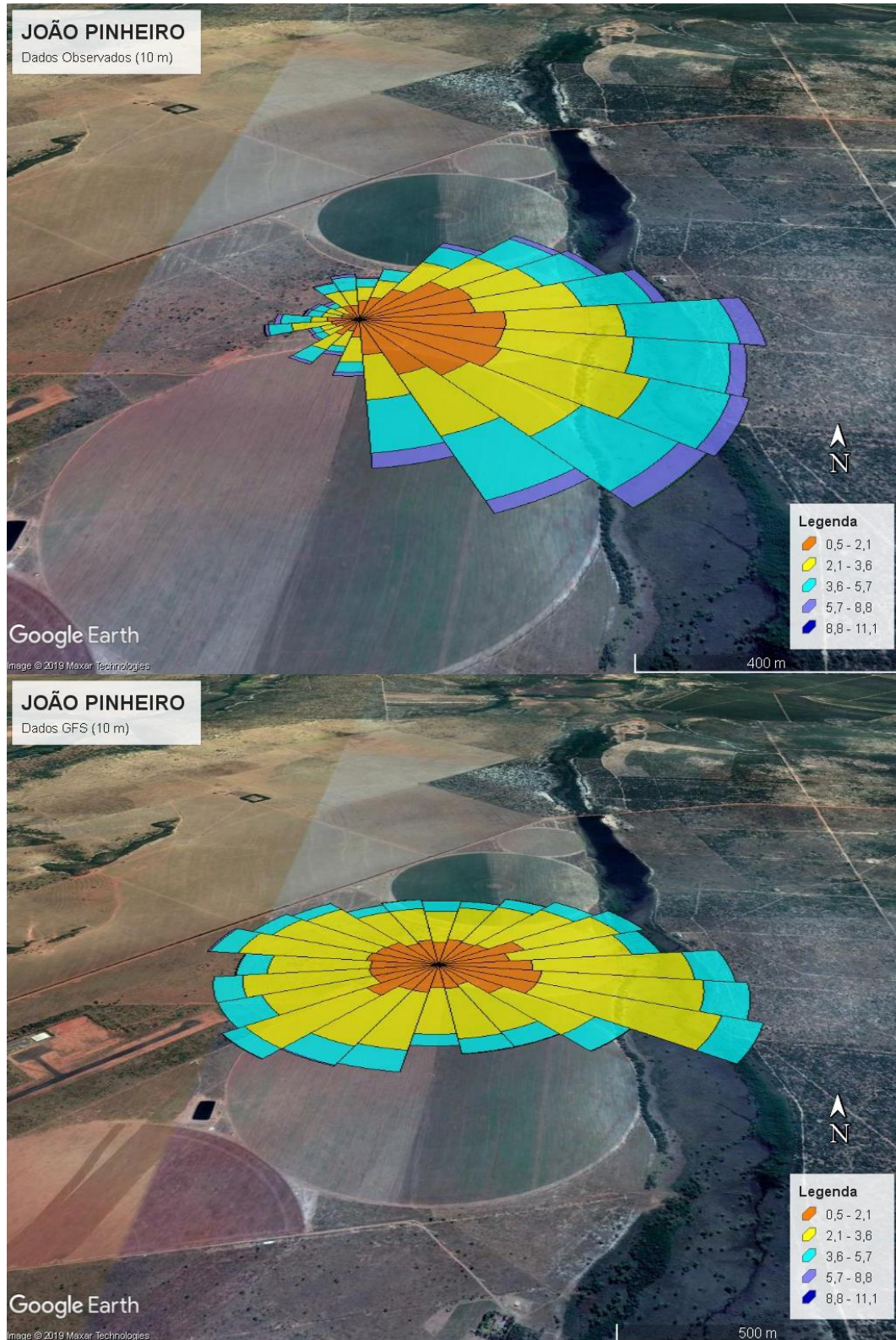
**Figura 29** - Rosas dos ventos - Diamantina (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



**Figura 30 - Rosas dos ventos - Formiga (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .**

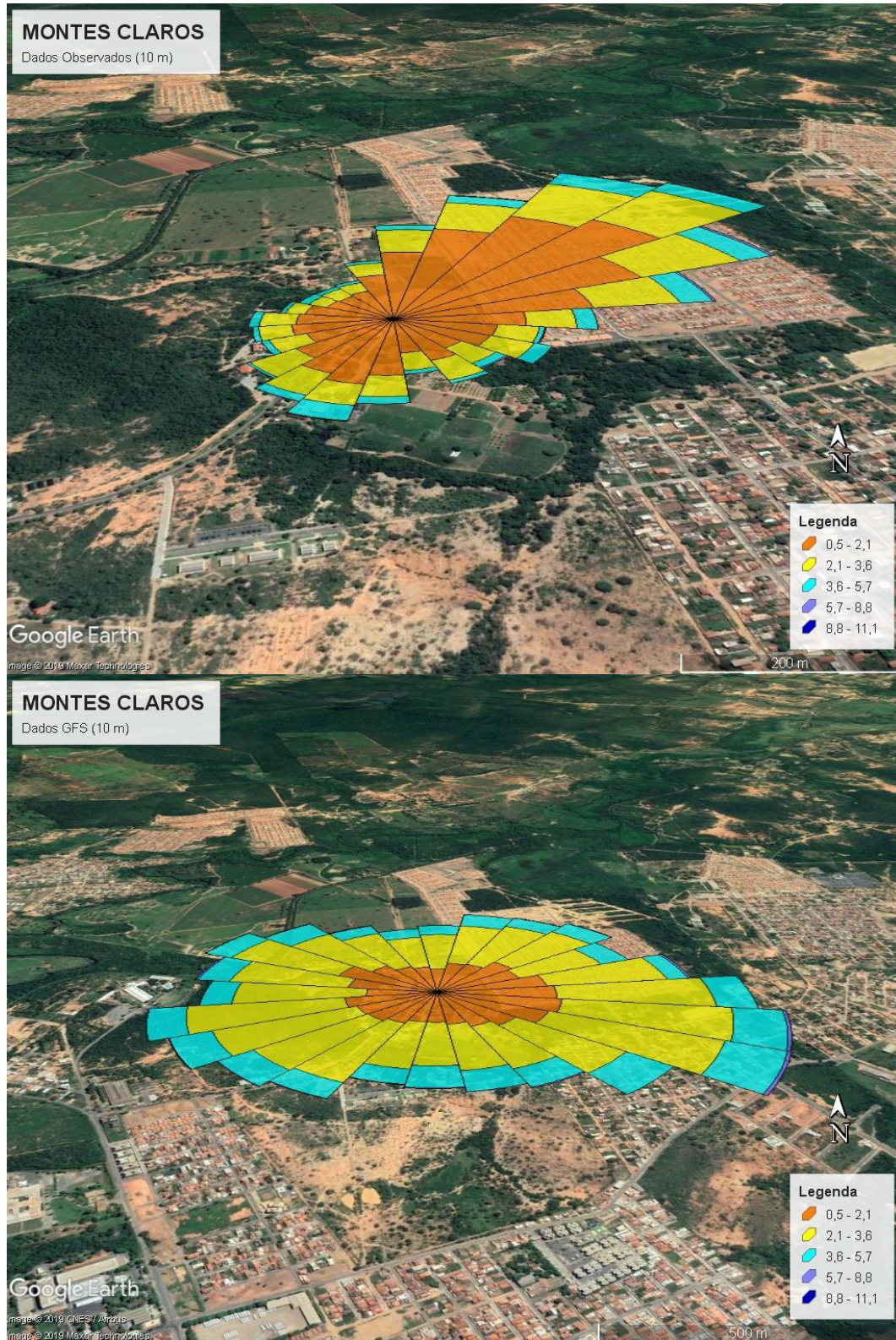


**Figura 31** – Rosas dos ventos – Juiz de Fora (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .

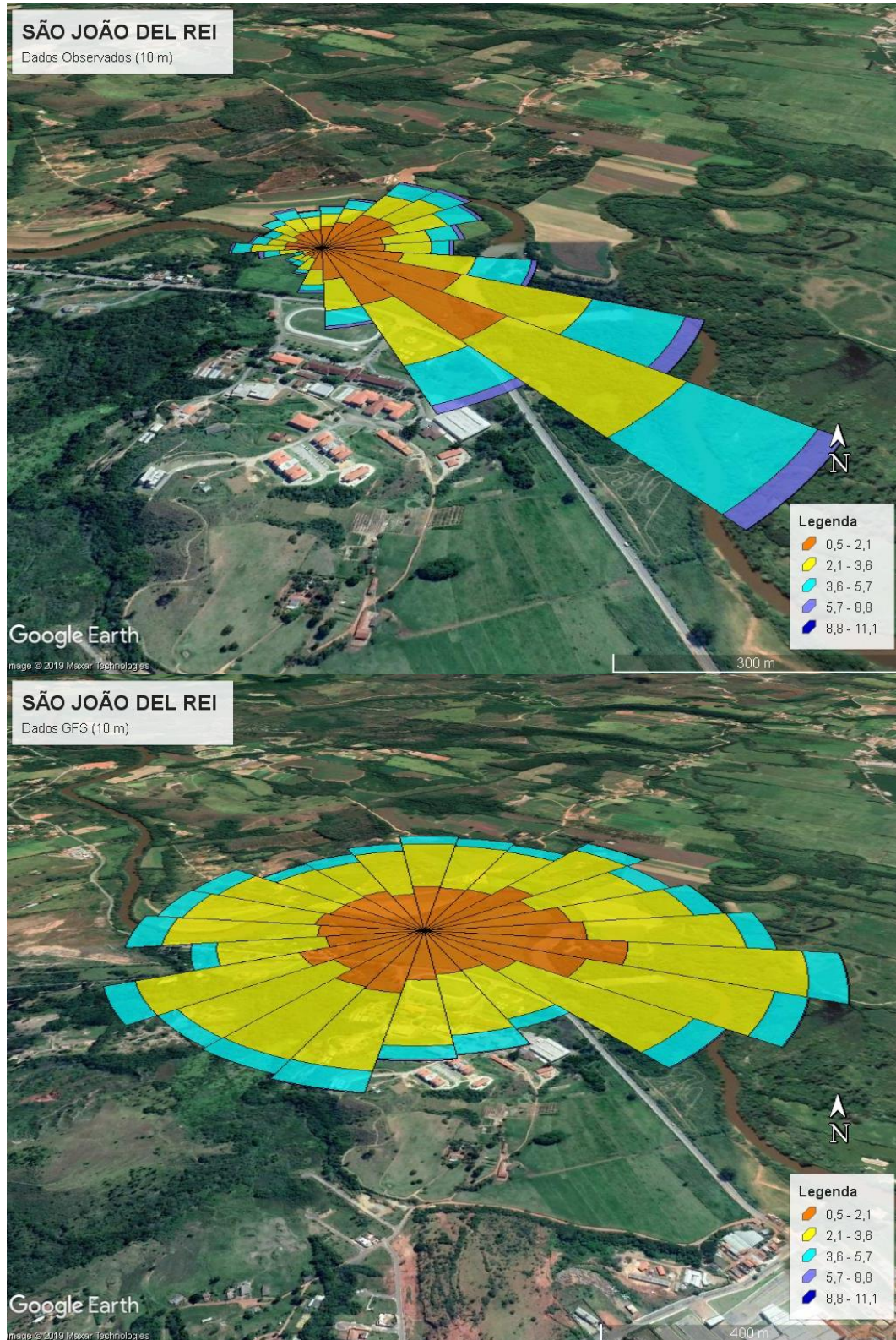


**Figura 32** - Rosas dos ventos - João Pinheiro (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .

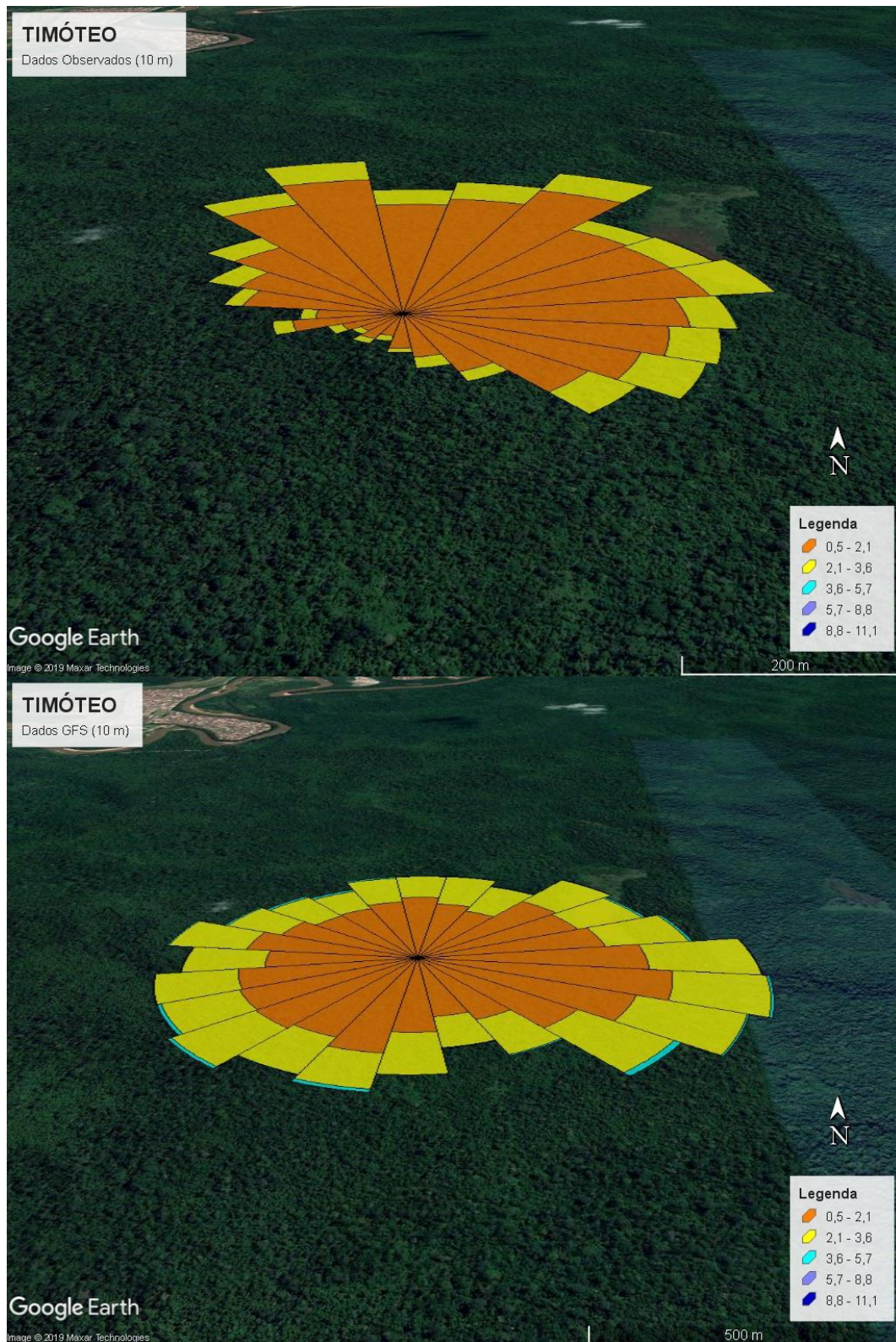




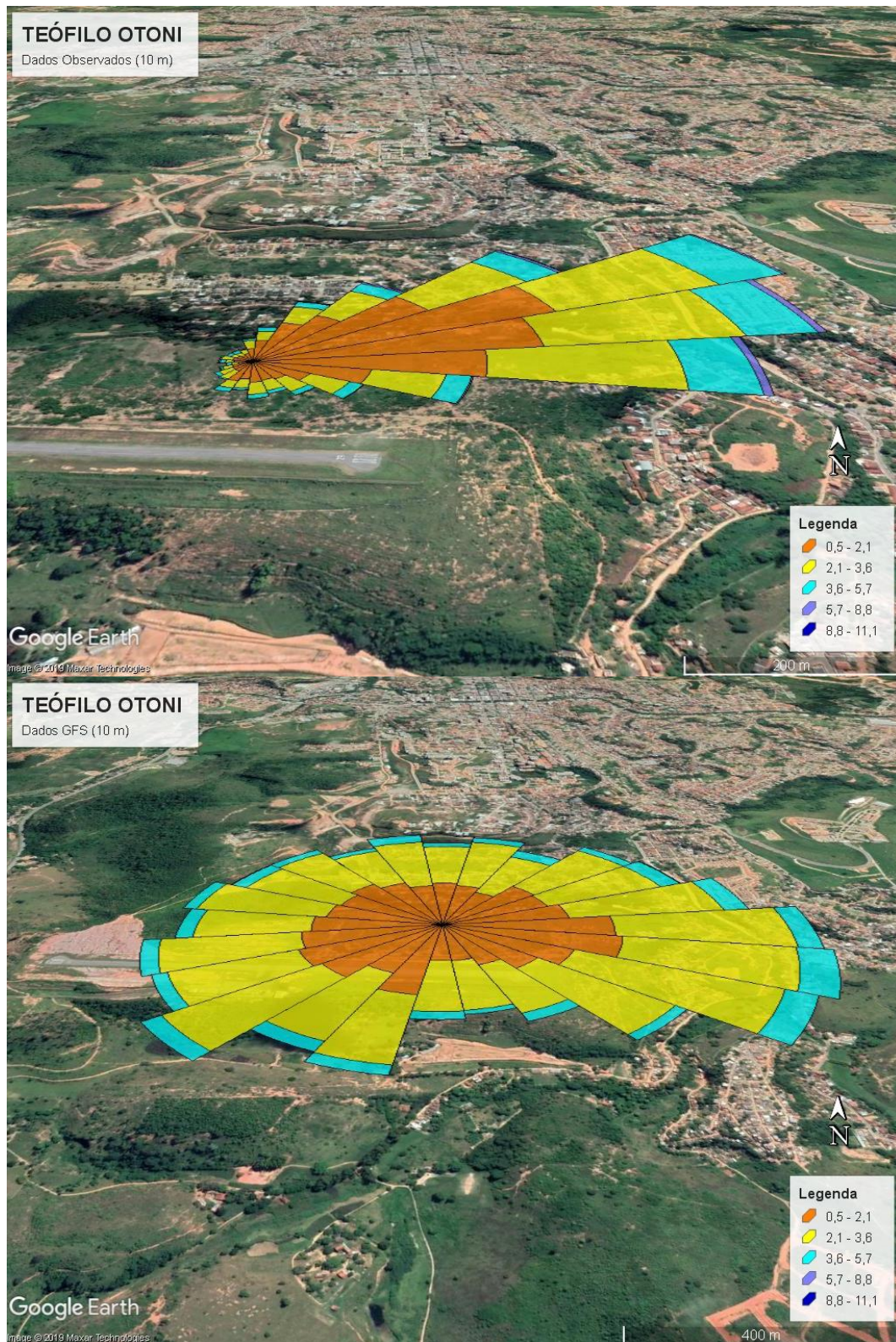
**Figura 33 - Rosas dos ventos - Montes Claros (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .**



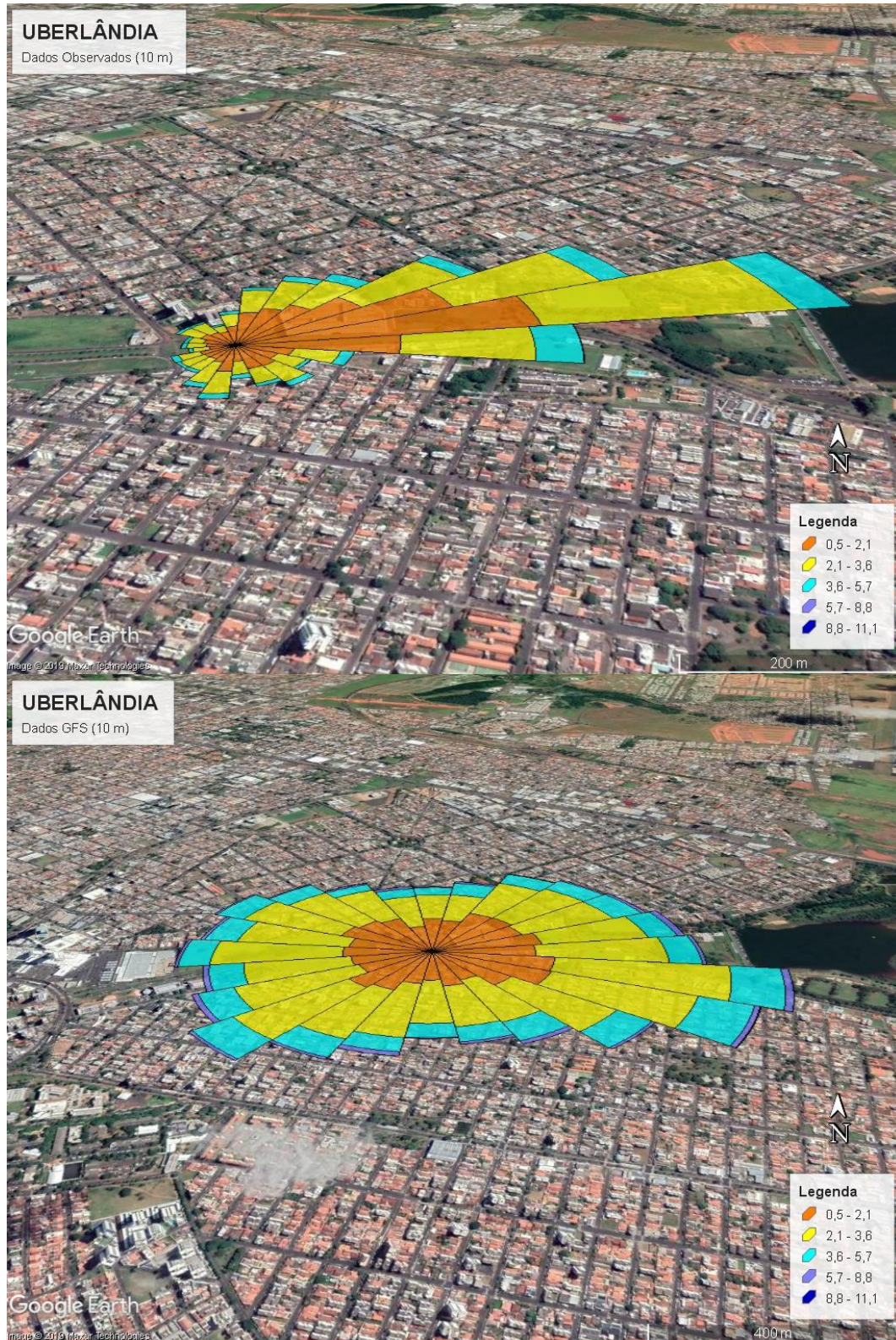
**Figura 34** – Rosas dos ventos – São João Del Rei (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



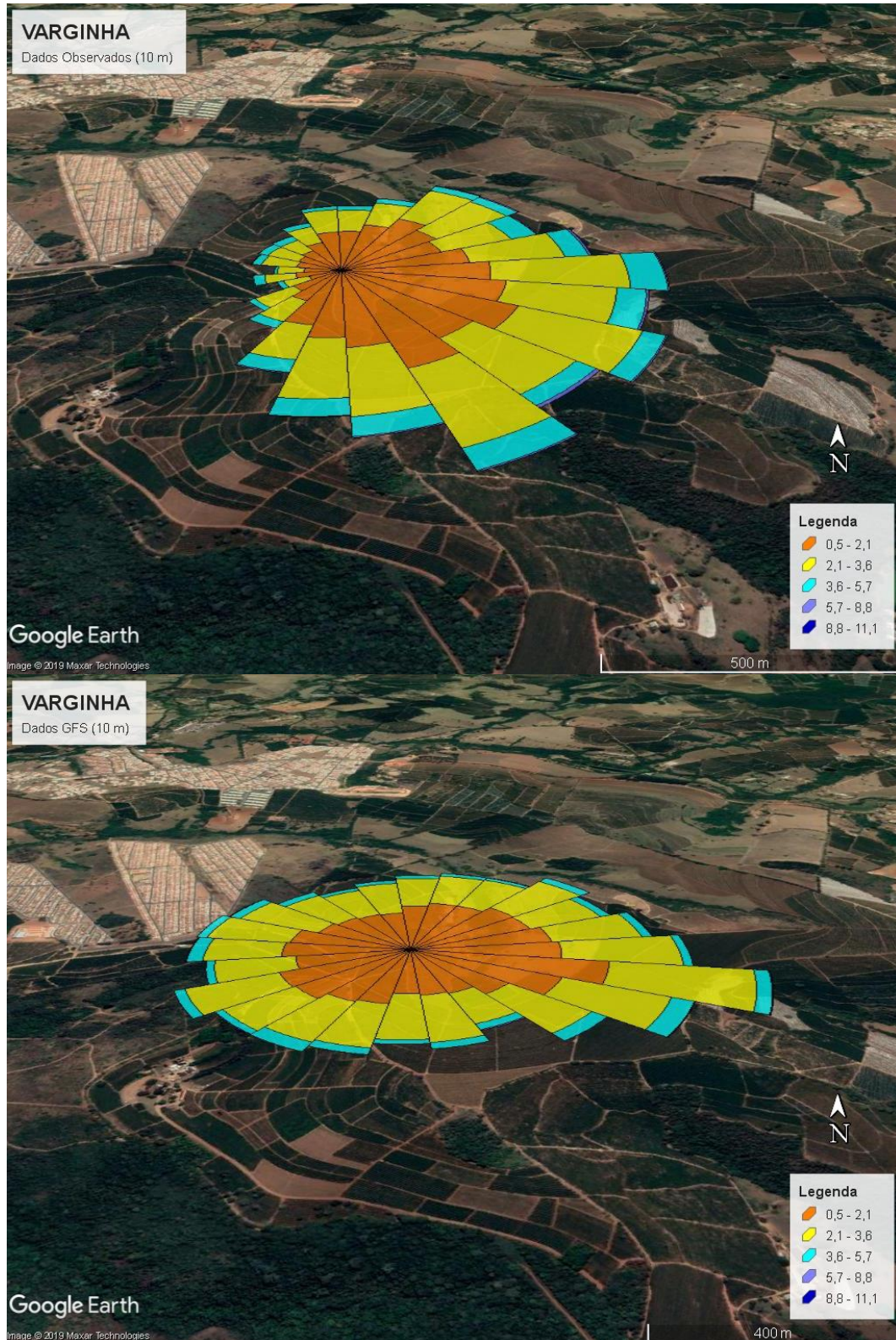
**Figura 35** - Rosas dos ventos - Timóteo (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



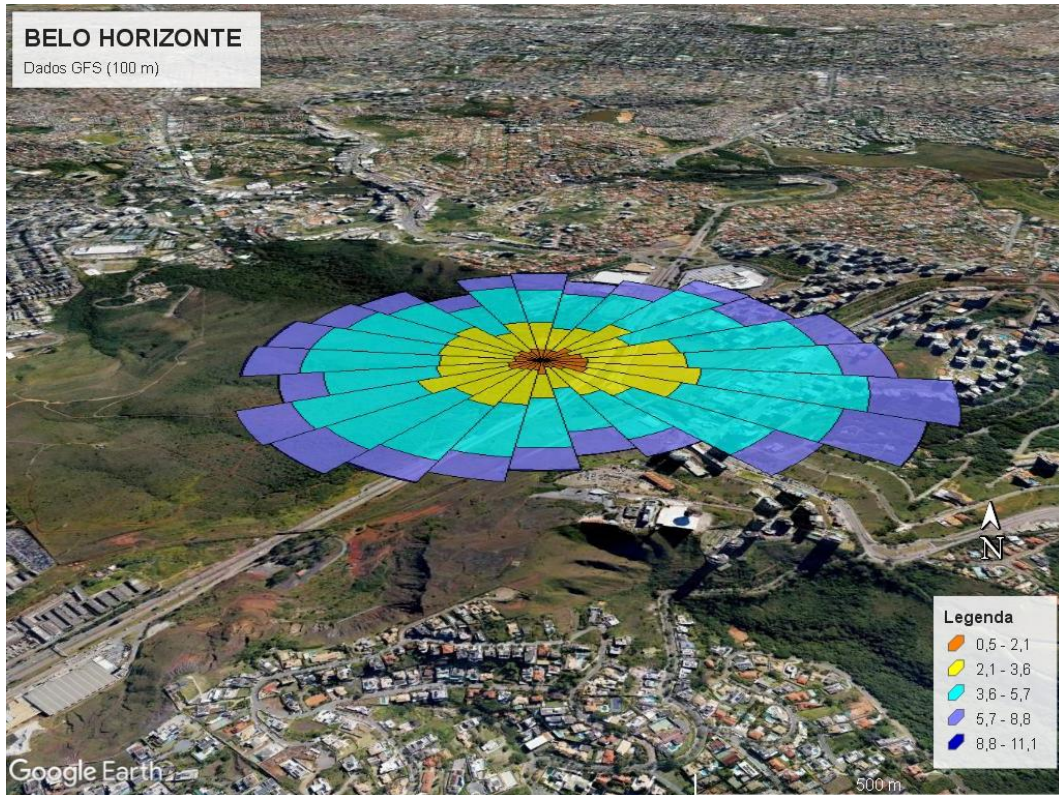
**Figura 36** – Rosas dos ventos – Teófilo Otoni (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



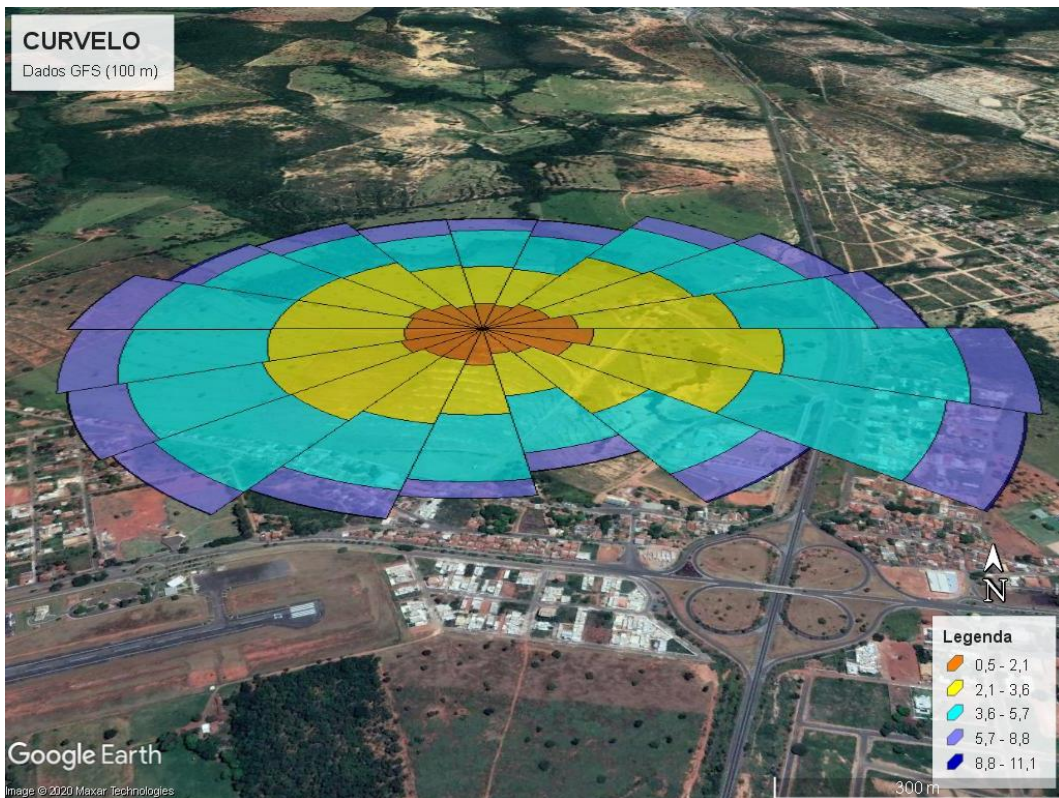
**Figura 37** – Rosas dos ventos – Uberlândia (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



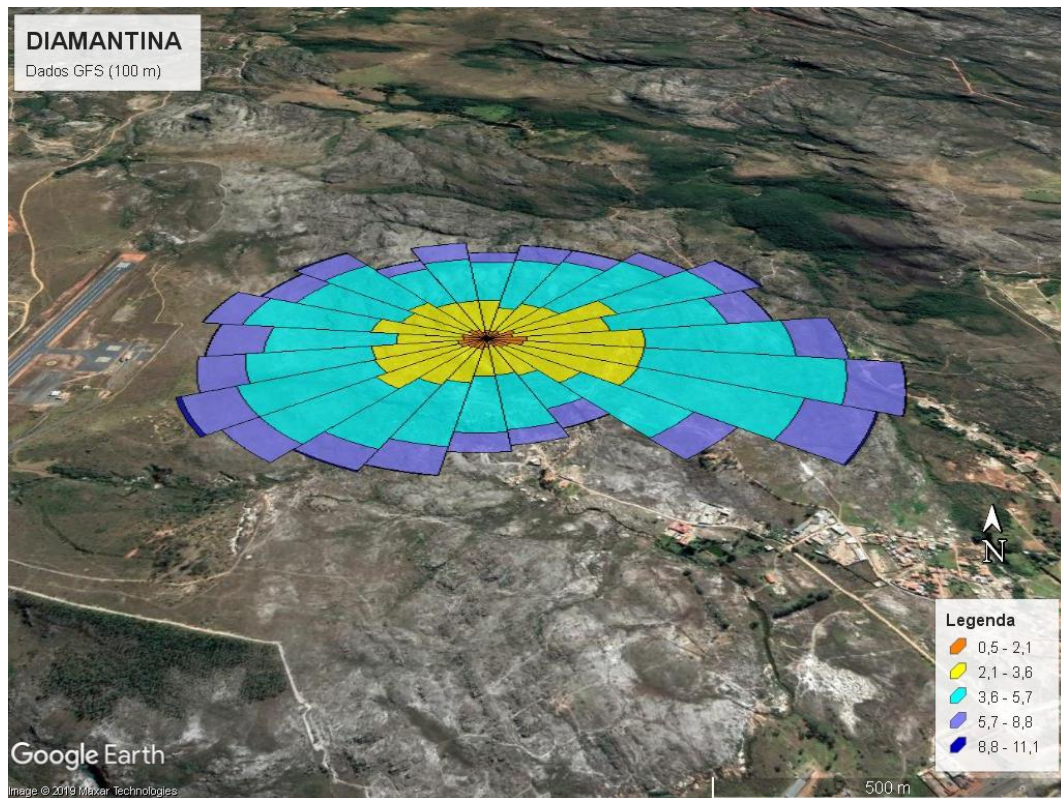
**Figura 38** - Rosas dos ventos - Varginha (10 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



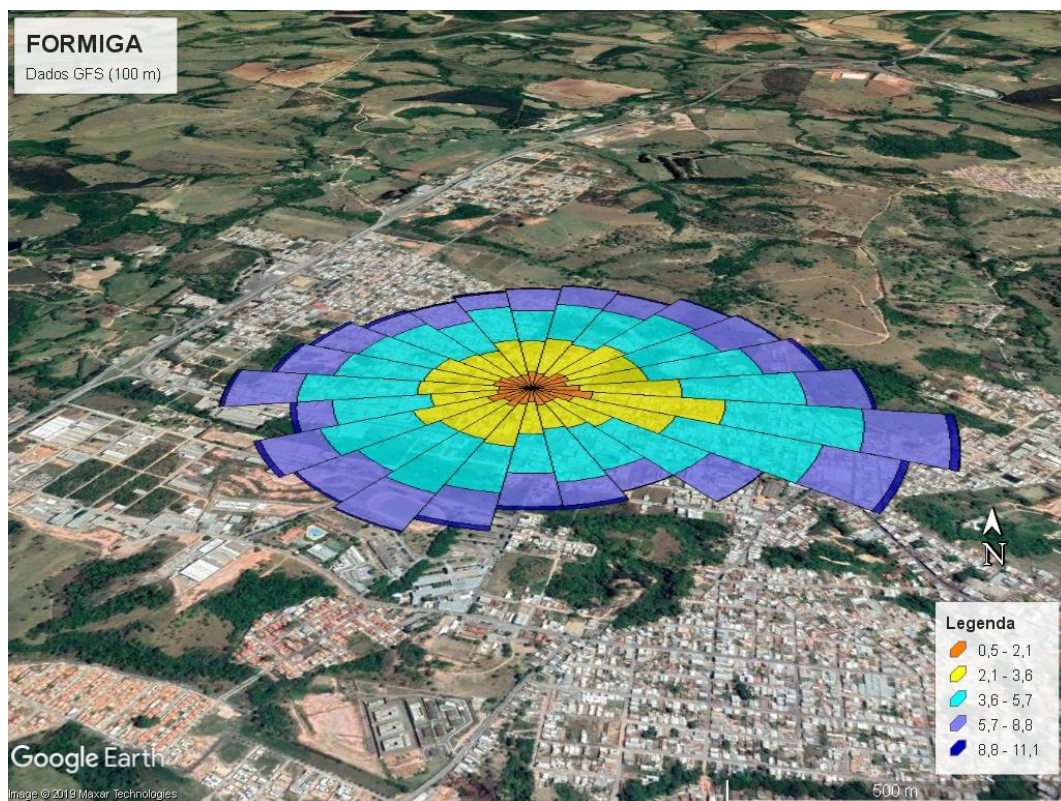
**Figura 39** – Rosa do vento – Belo Horizonte (100 metros). Legenda em  $ms^{-1}$ .



**Figura 40** - Rosa do vento – Curvelo (100 metros). Legenda em  $ms^{-1}$ .

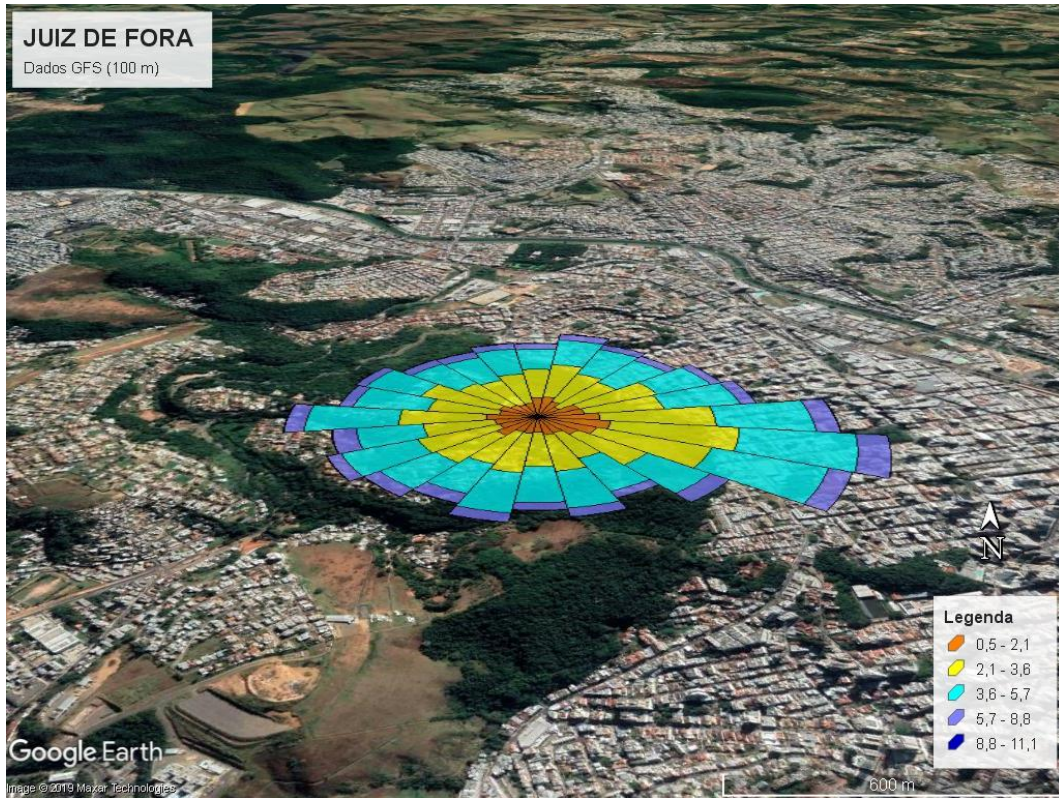


**Figura 41** - Rosa do vento – Diamantina (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .

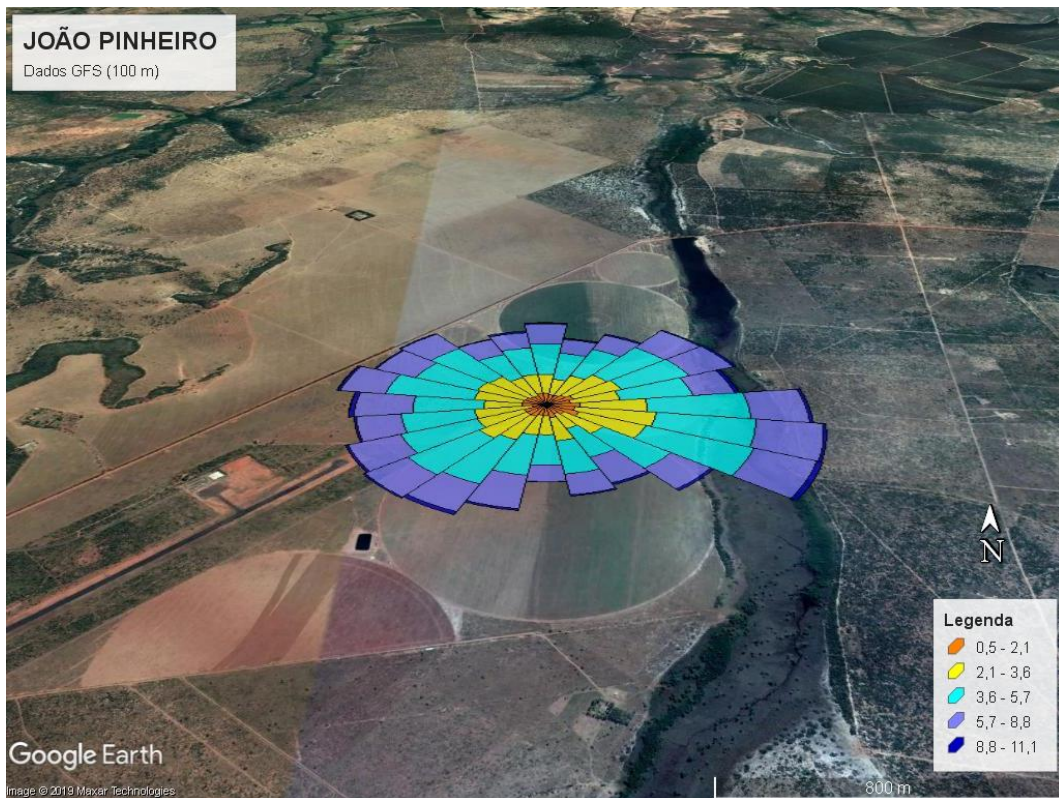


**Figura 42** - Rosa do vento – Formiga (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .





**Figura 43 - Rosa do vento – Juiz de Fora (100 metros). Legenda em ms<sup>-1</sup>.**



**Figura 44 - Rosa do vento – João Pinheiro (100 metros). Legenda em ms<sup>-1</sup>.**

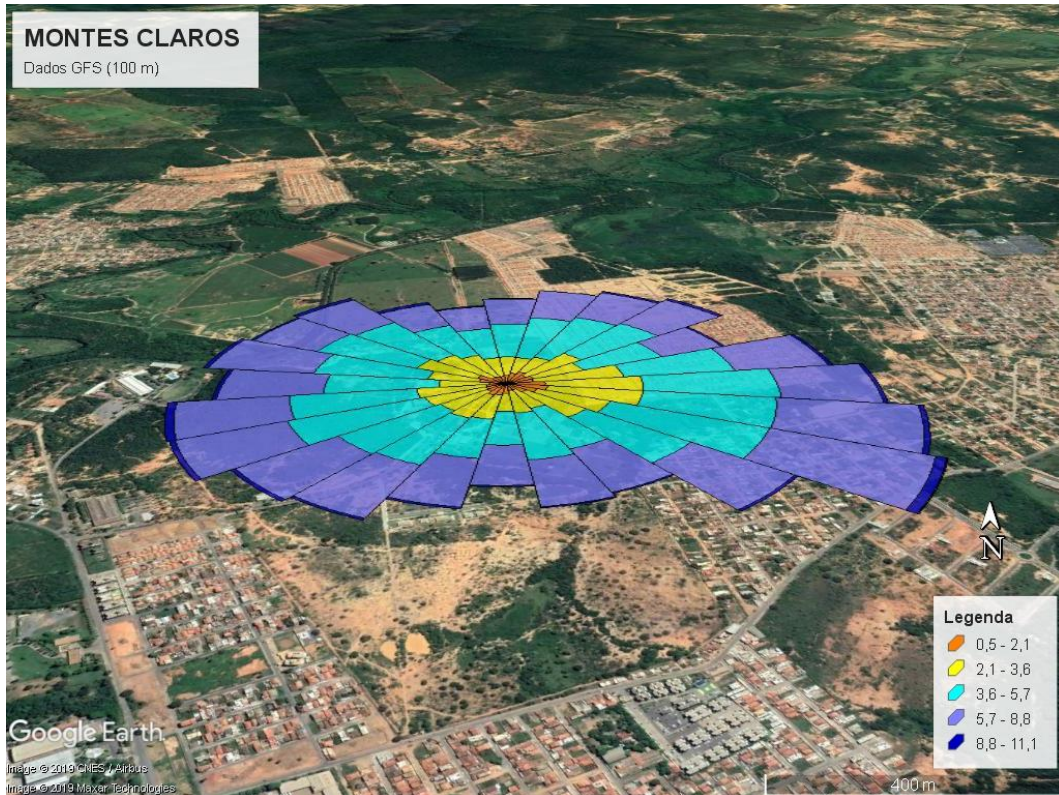


Figura 45 - Rosa do vento – Montes Claros (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .

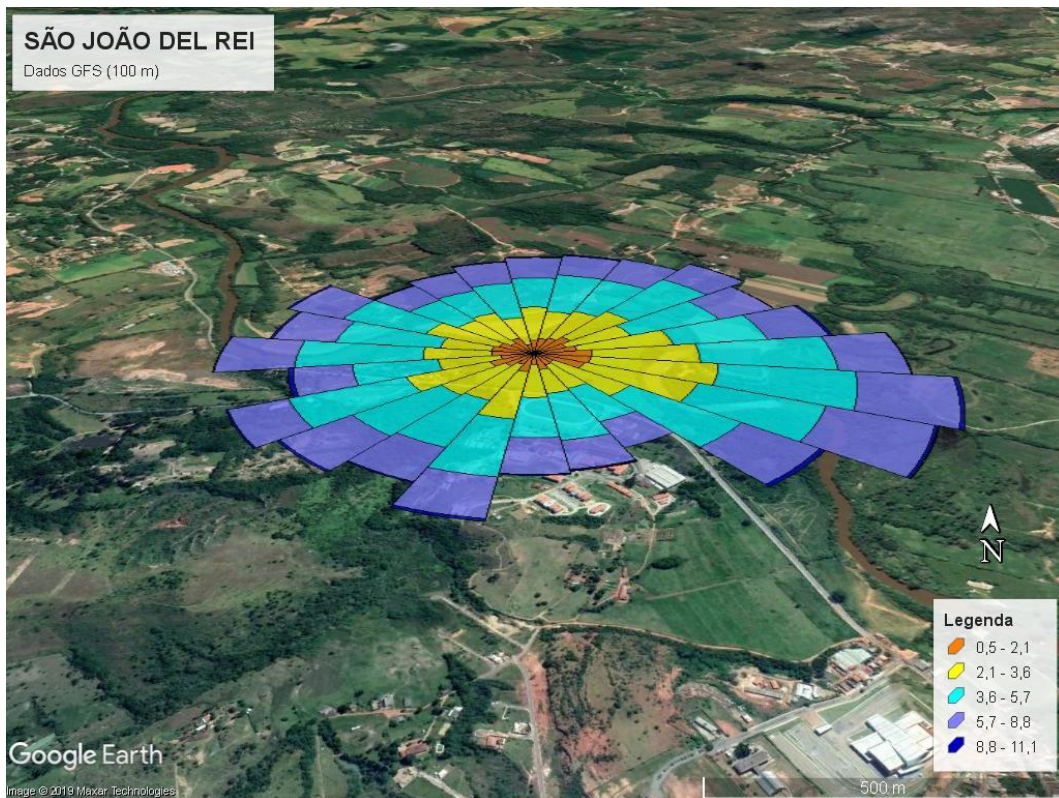


Figura 46 - Rosa do vento – São João Del Rei (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .

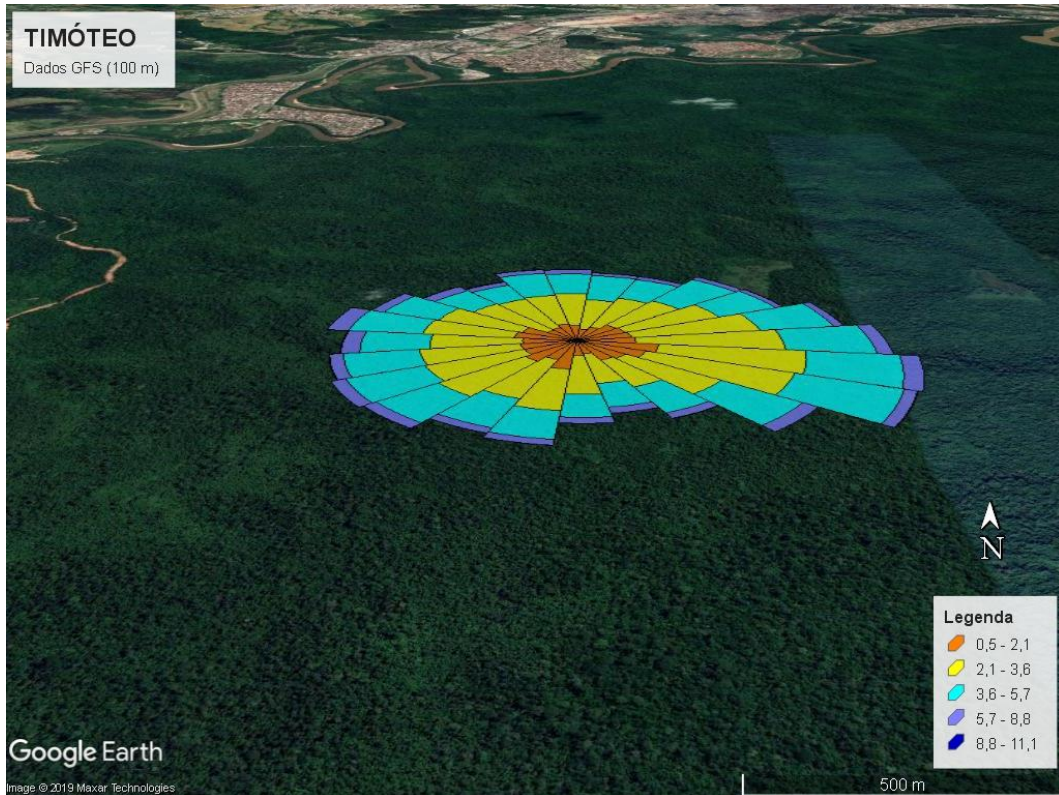


Figura 47 - Rosa do vento – Timóteo (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .

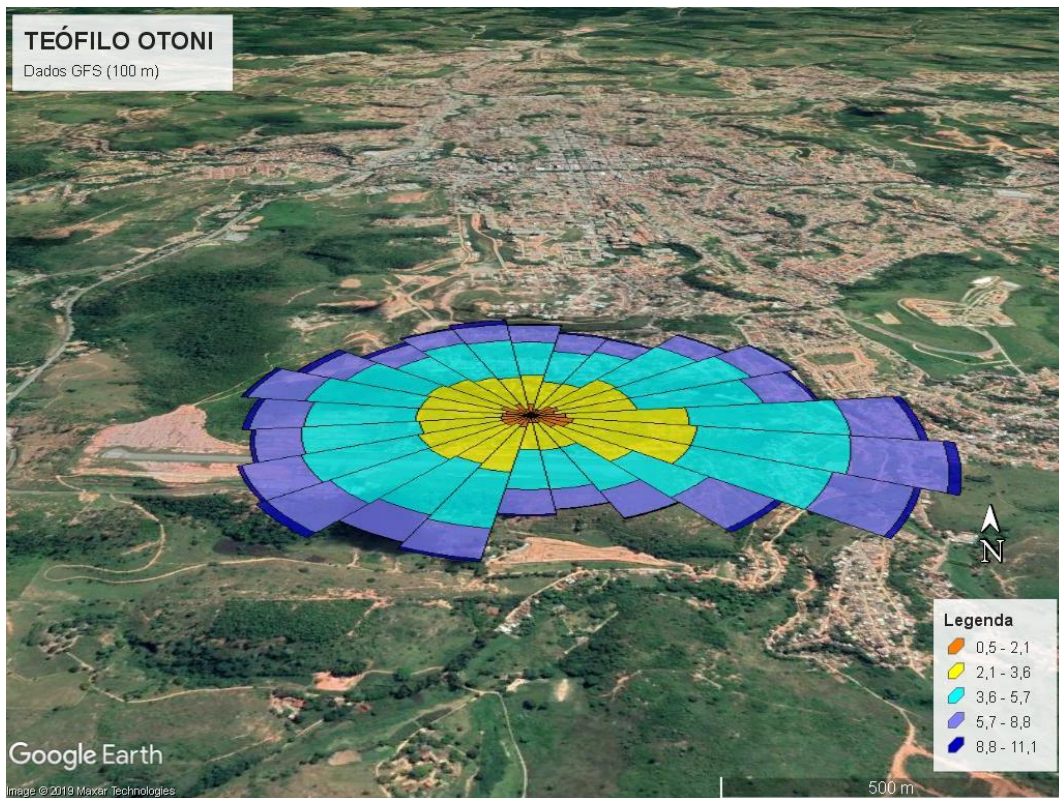
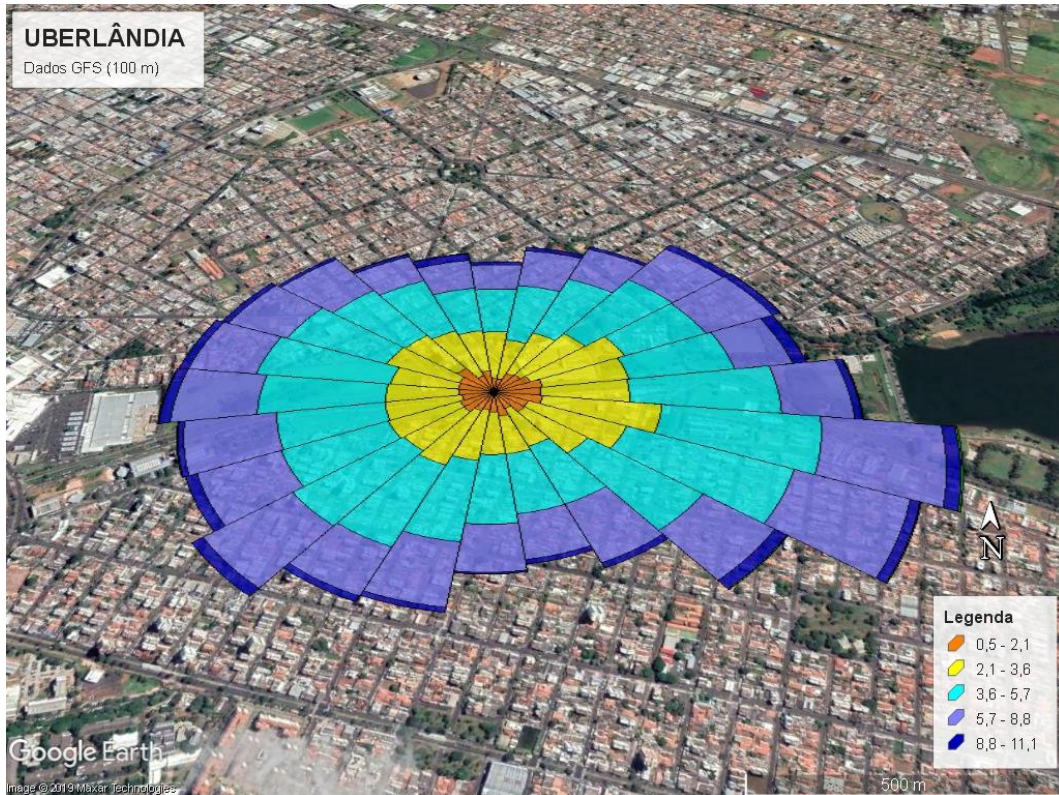
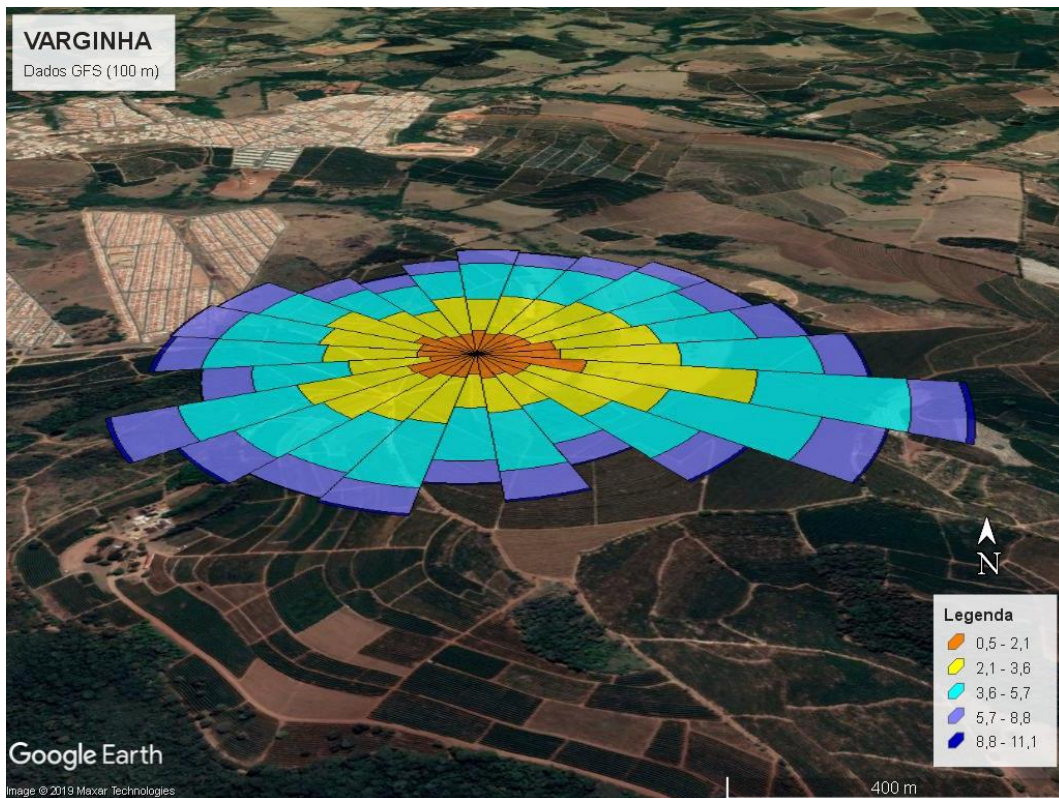


Figura 48 - Rosa do vento – Teófilo Otoni (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .



**Figura 49 - Rosa do vento – Uberlândia (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .**



**Figura 50 - Rosa do vento – Varginha (100 metros). Legenda em  $\text{ms}^{-1}$ .**

APÊNDICE C

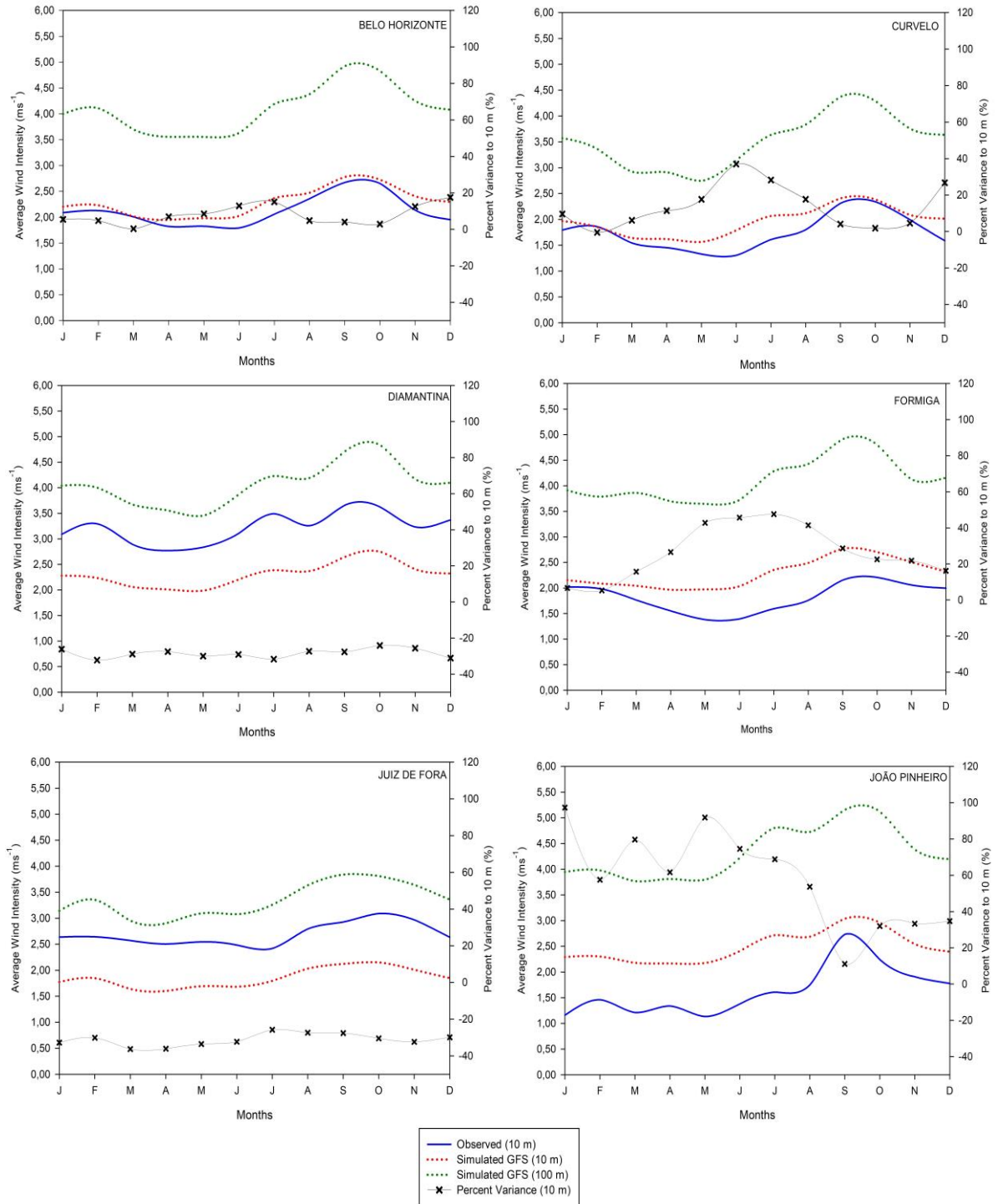


Figura 51 - Perfil médio mensal do vento.

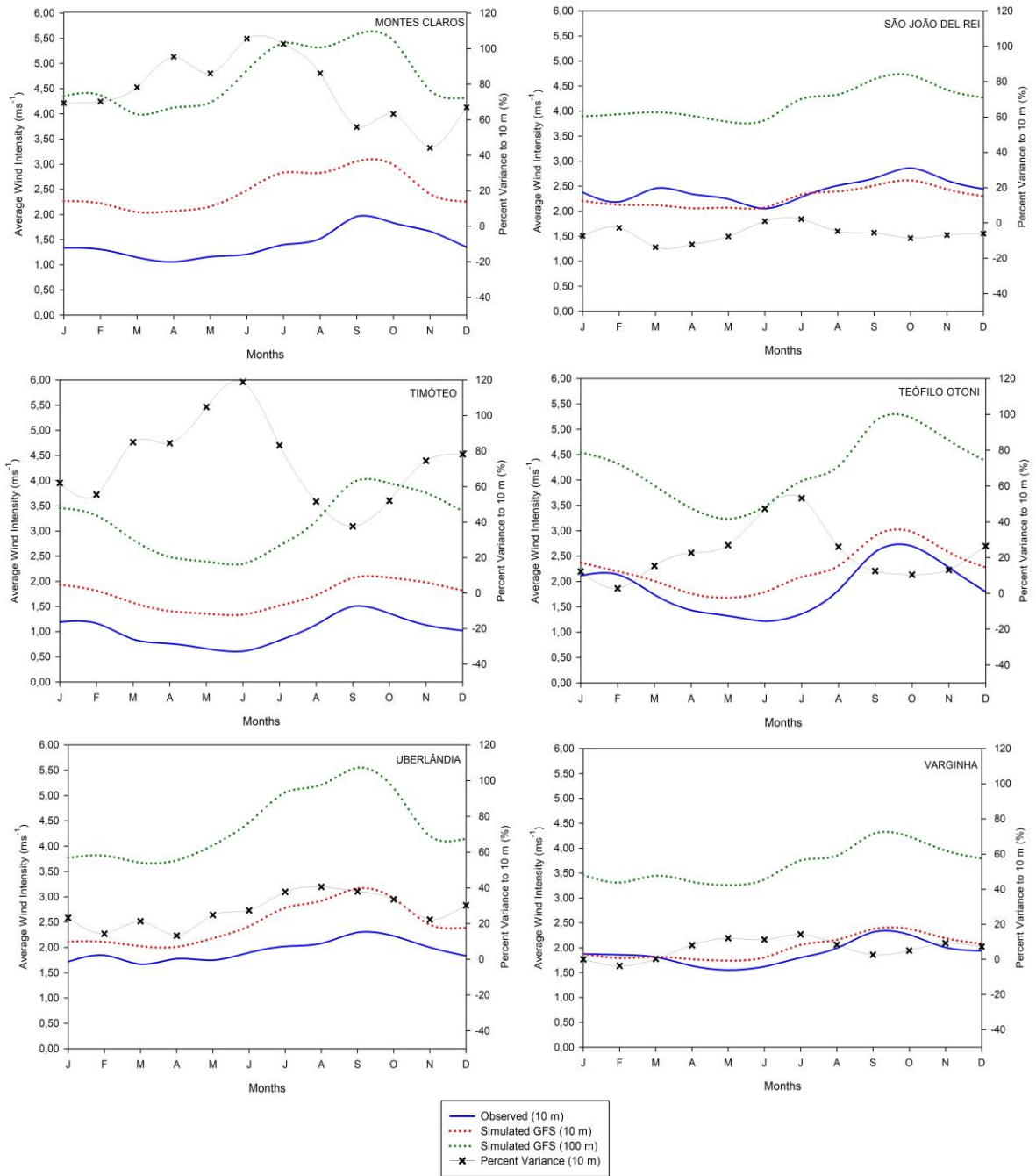


Figura 52 - Perfil médio mensal do vento.

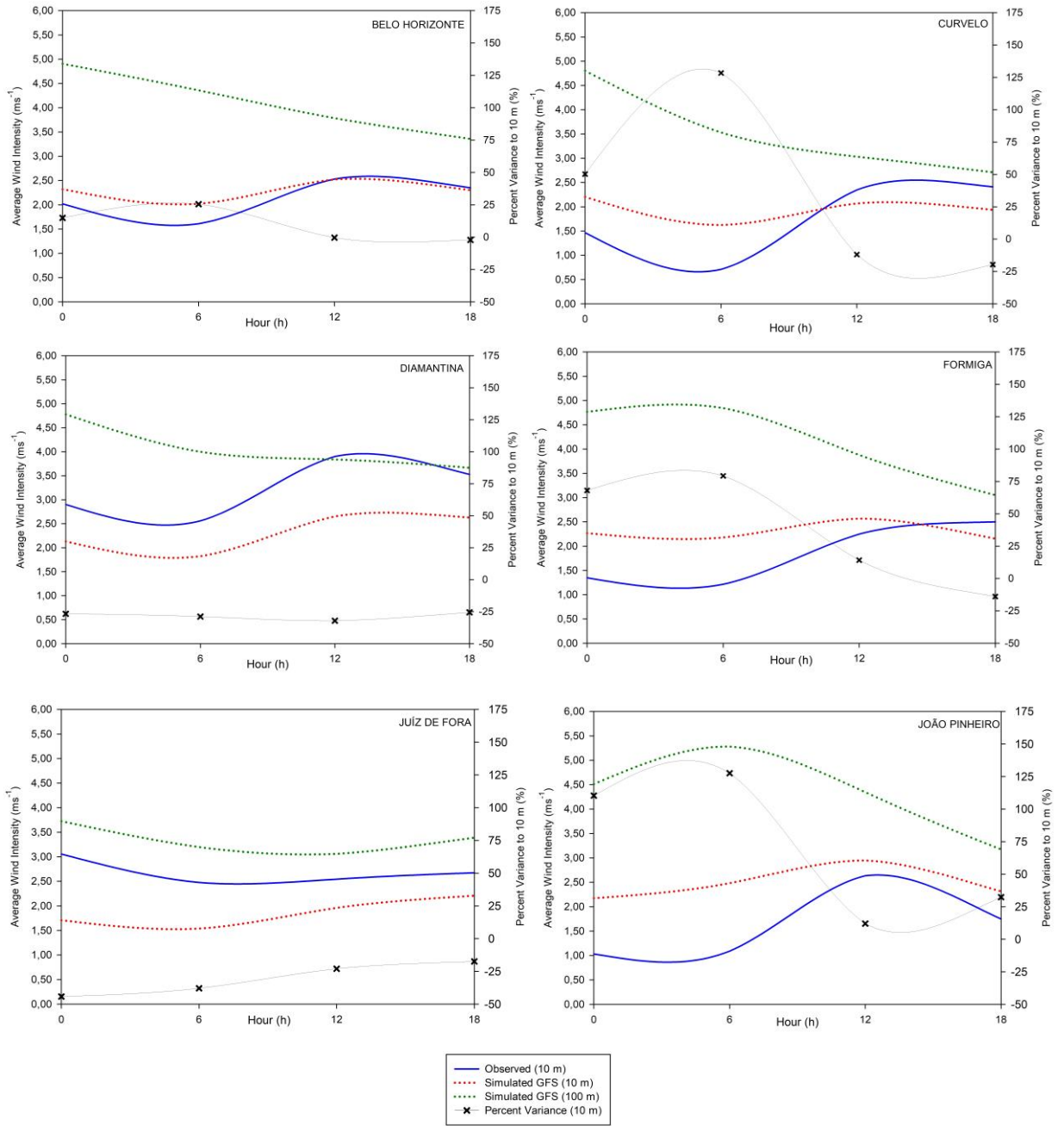


Figura 53 - Perfil médio diurno do vento.

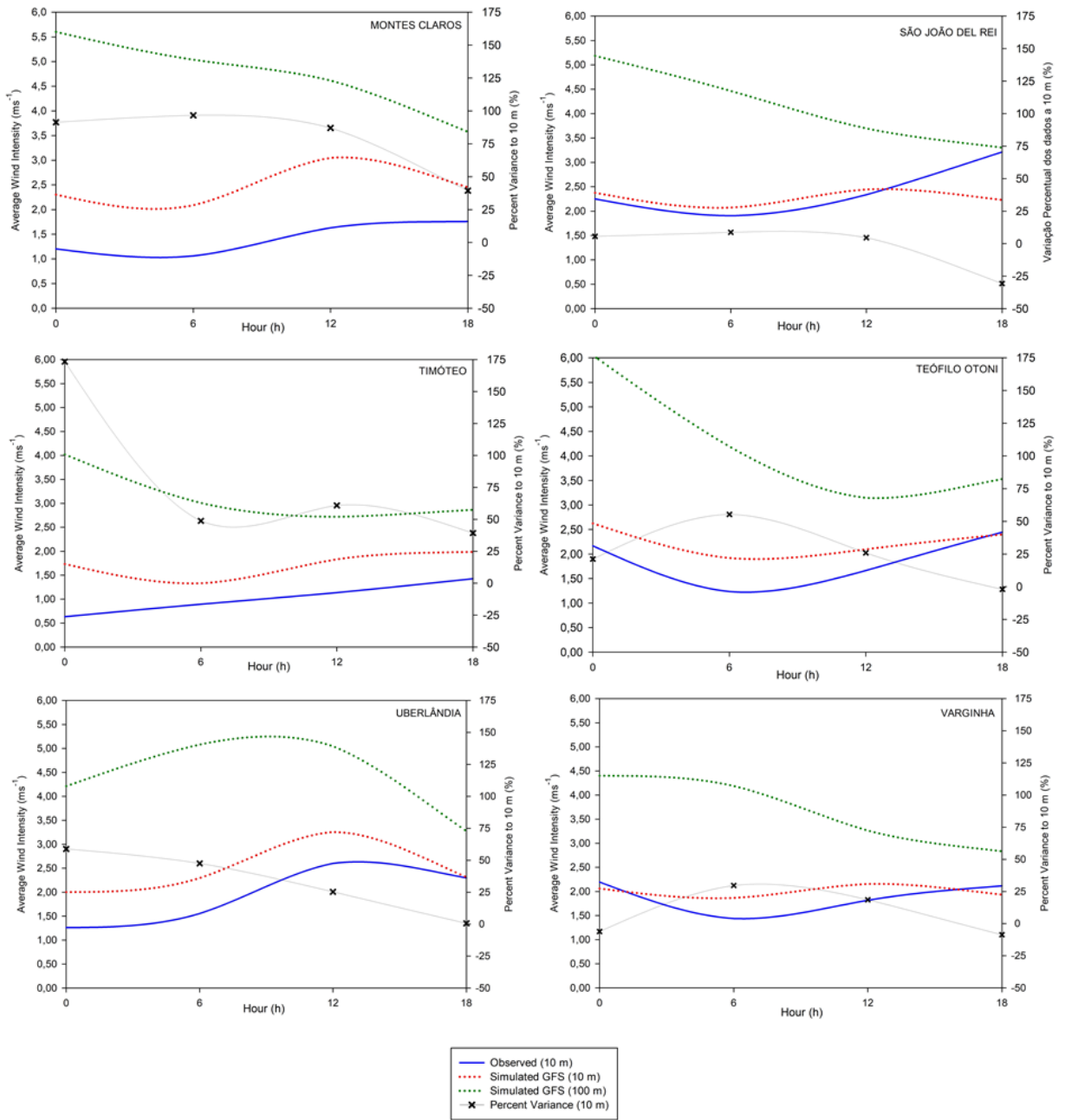


Figura 54 - Perfil médio diurno do vento.



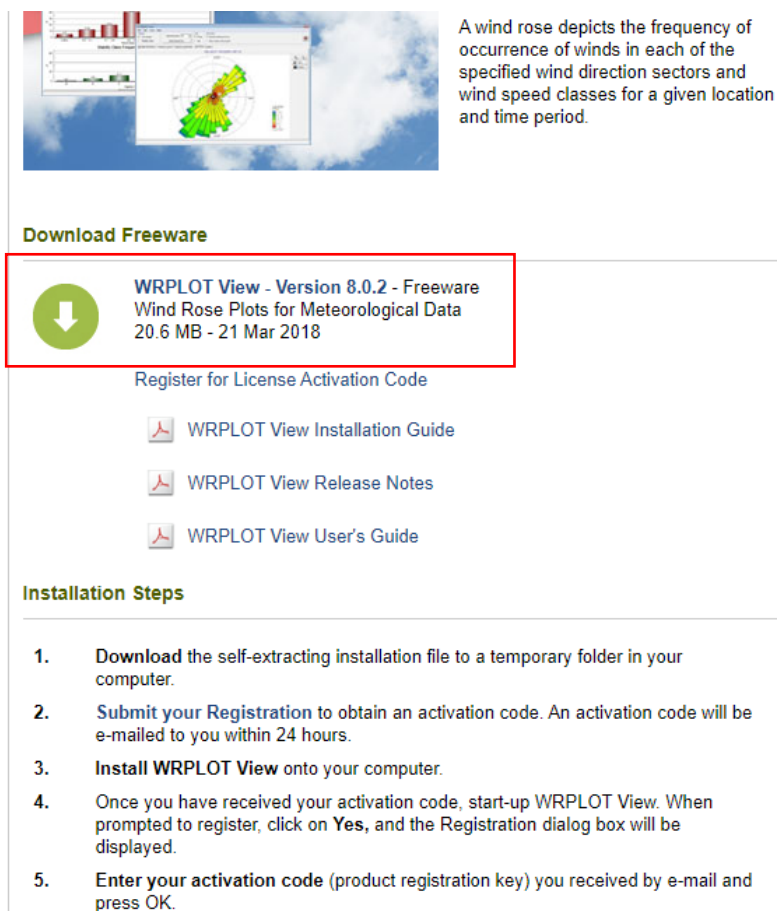
## APÊNDICE D – Tutorial: WRPLOT View x Google Earth

As rosas dos ventos apresentadas ao longo deste trabalho foram geradas a partir da associação de dois *softwares* gratuitos: WRPLOT View e Google Earth. O WRPLOT View é um programa específico e direcionado para operacionalizar rosas dos ventos, análises de frequências e gráficos a partir de dados meteorológicos. O Google Earth é um *software* que permite visualizar mapas e condições de relevo do terreno.

### D.1) Download dos softwares


Ambos os *softwares* são gratuitos e de fácil instalação. A última versão do WRPLOT View – Versão 8.0.2 está disponível no link abaixo. Ao acessá-lo será necessário fazer um cadastro para obter a chave de registro que será enviada por e-mail. Após o cadastro, basta clicar na opção destacada na imagem para iniciar seu *download*.

**Link:** <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>



A wind rose depicts the frequency of occurrence of winds in each of the specified wind direction sectors and wind speed classes for a given location and time period.

**Download Freeware**

 **WRPLOT View - Version 8.0.2 - Freeware**  
Wind Rose Plots for Meteorological Data  
20.6 MB - 21 Mar 2018

[Register for License Activation Code](#)

[WRPLOT View Installation Guide](#)

[WRPLOT View Release Notes](#)

[WRPLOT View User's Guide](#)

**Installation Steps**

1. **Download** the self-extracting installation file to a temporary folder in your computer.
2. **Submit your Registration** to obtain an activation code. An activation code will be e-mailed to you within 24 hours.
3. **Install WRPLOT View** onto your computer.
4. Once you have received your activation code, start-up WRPLOT View. When prompted to register, click on **Yes**, and the Registration dialog box will be displayed.
5. **Enter your activation code** (product registration key) you received by e-mail and press OK.

Após o *download*, clique no arquivo baixado e siga as instruções que aparecerem na tela para iniciar a instalação. Como visto na imagem acima, o próprio site disponibiliza instruções para esta operação. Ao final, será solicitada a chave de registro que anteriormente foi enviada para o e-mail cadastrado no site. Feito isso, o *WRPLOT View* estará instalado.

O download do *Google Earth Versão 7.3* pode ser feito através do link disponibilizado abaixo. Para funcionar é necessário que o computador tenha o Windows 7 ou versão posterior instalada. Para iniciar o *download*, clique na opção “Concordar e fazer download”, e na sequência clique no arquivo baixado e inicie a instalação. Não é necessário chave de registro.

**Link:** <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>

**Google Earth**

### Download do Google Earth Pro para PC, Mac ou Linux

Ao instalar, você concorda com a [Política de Privacidade do Google Earth](#).

Última modificação: 21 de janeiro de 2019

Agradecemos por usar o Google Maps e o Google Earth ("Maps/Earth").

Com o Google Maps/Google Earth, você pode visualizar e usar diversos conteúdos, incluindo dados do mapa e do terreno, imagens, fichas de empresas, trânsito, avaliações e outras informações relacionadas fornecidas pelo Google, seus licenciantes e usuários (o "Conteúdo").

Ao acessar, fazer o download ou usar o Google Maps/Google Earth, você concorda com:

1. os [Termos de Serviço do Google](#) (os "Termos universais");
2. estes [Termos de Serviço adicionais do Google Maps/Google Earth](#) (os "Termos adicionais do Maps/Earth");
3. os [Avisos Legais do Google Maps/Google Earth](#) (os "Avisos Legais"); e

Você está fazendo o download da **versão 7.3** do Google Earth Pro. Essa versão instala automaticamente as atualizações recomendadas. Para usar versões anteriores do Google Earth Pro acesse a [página de instaladores diretos](#).

Ajudar a melhorar o Google Earth enviando automaticamente estatísticas de uso e relatórios de erros de forma anônima ao Google. [Saiba mais](#).

**Concordar e fazer download**

**Requisitos do sistema:**

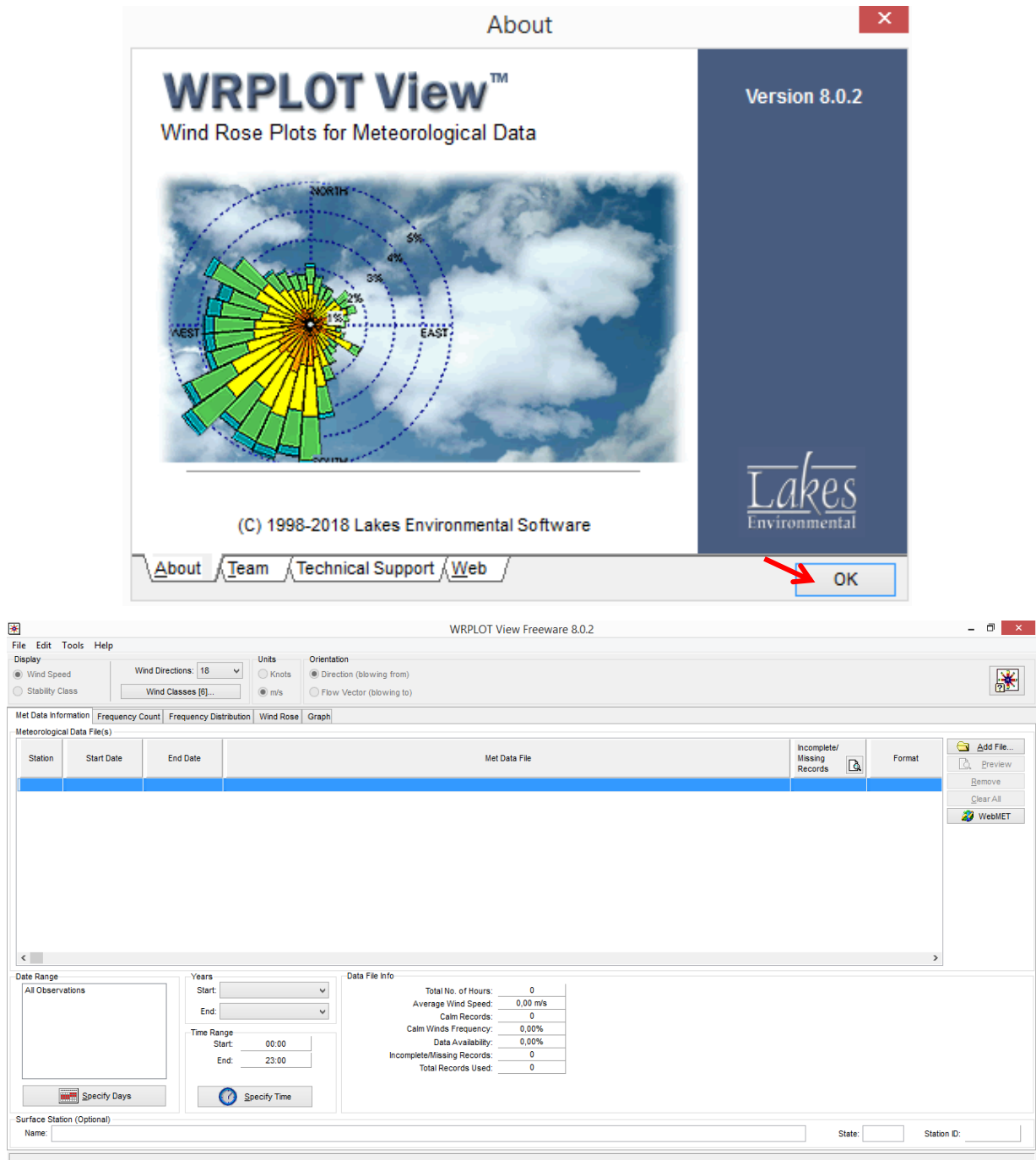
- PC: Windows 7 ou versão posterior
- Mac: Mac OS X 10.8 ou versão posterior
- Ubuntu 14/Fedora 23 (ou equivalente) ou mais recente

**Recursos do Google Earth Pro:**

- Explore as vantagens dos recursos avançados de importação de dados GIS
- Meça a área, o raio e a circunferência no terreno
- Imprima capturas de tela de alta resolução
- Crie filmes off-line atraentes para compartilhar

## D.2) Executando o *WRPLOT View*

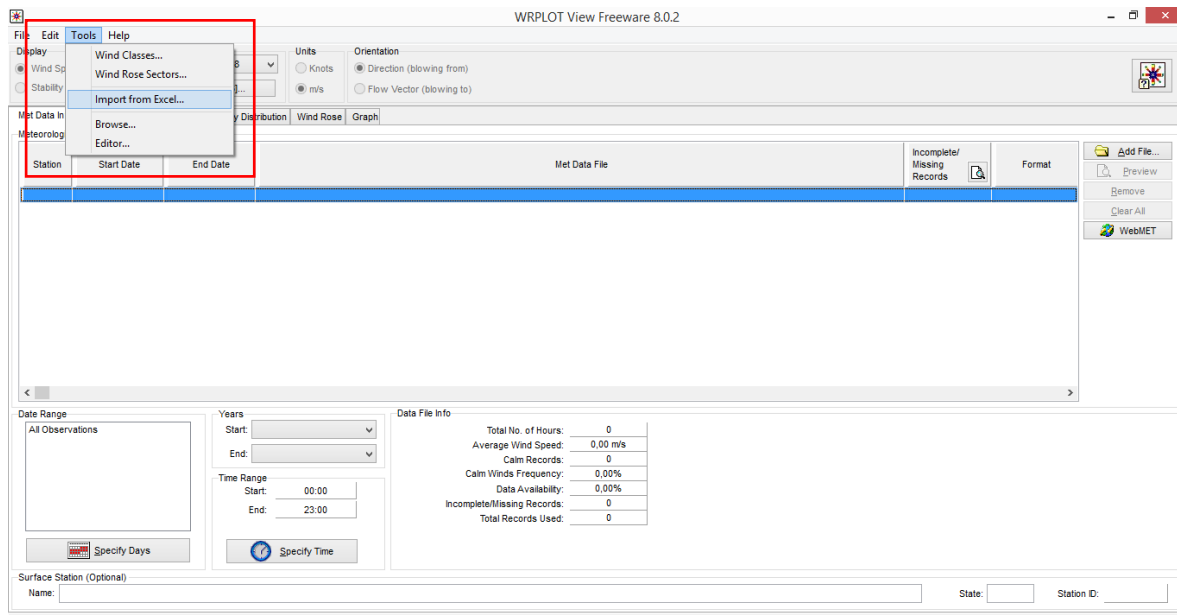
Ao executar o programa, aparecerá a tela inicial abaixo. Clique em ok para iniciar e dar acesso à área de trabalho do software (apresentada na segunda imagem na sequência).



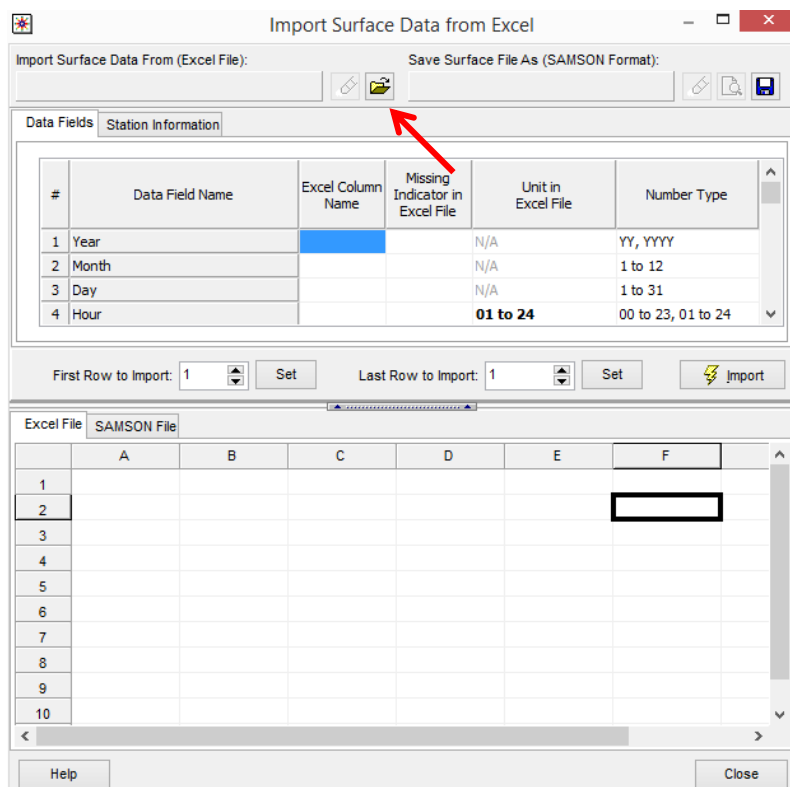
### D.3) Importando os dados

A importação dos dados depende do formato em que eles estão. Para importar dados em planilha do Excel 1997-2003 é necessário seguir os passos:

Tools > Import from Excel

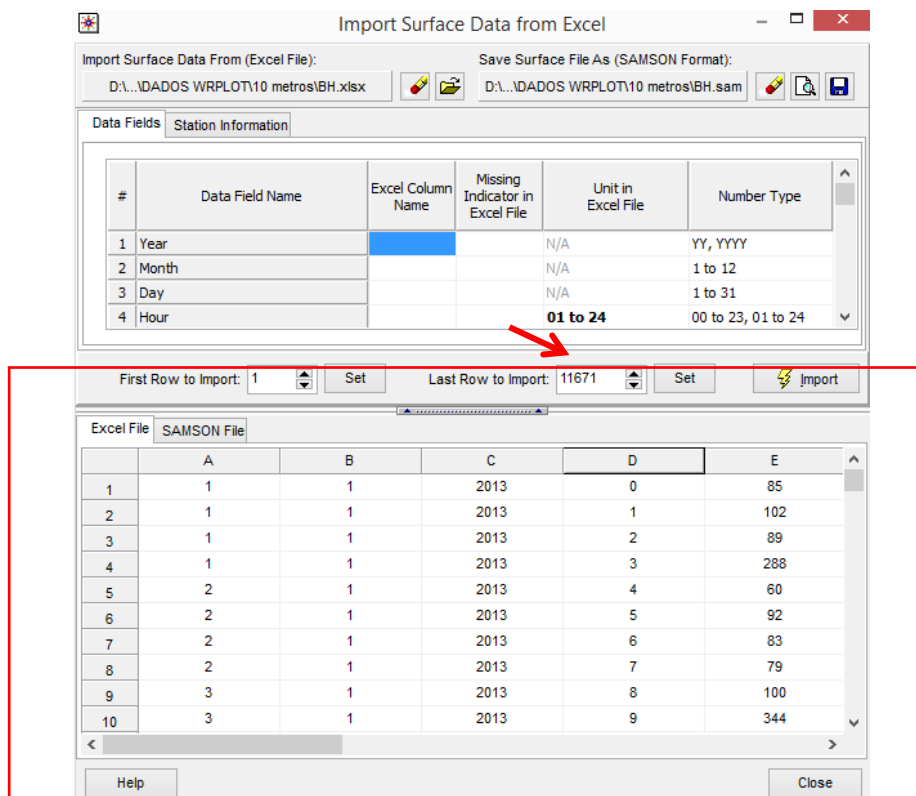


Uma nova janela abrirá para importar o arquivo. Clique na pasta amarela e selecione o arquivo desejado.

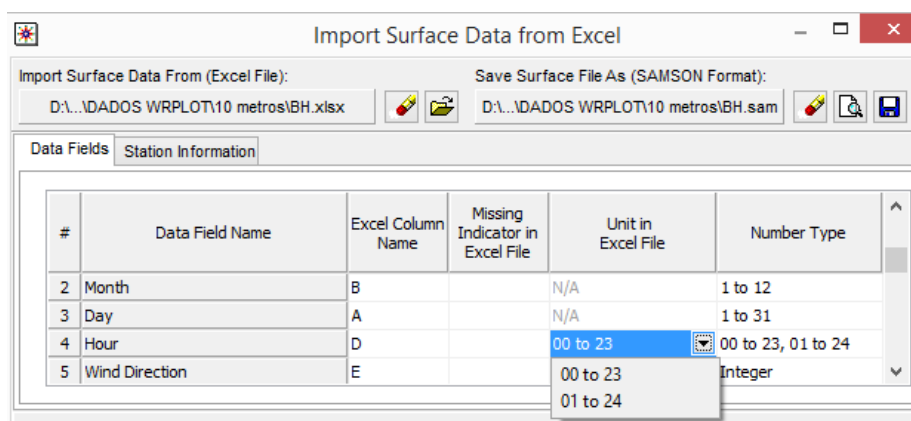


Ao abrir o arquivo, perceba que a planilha do software será preenchida com os dados do arquivo baixado na mesma ordem de linhas e colunas. Nesta etapa é importante verificar a

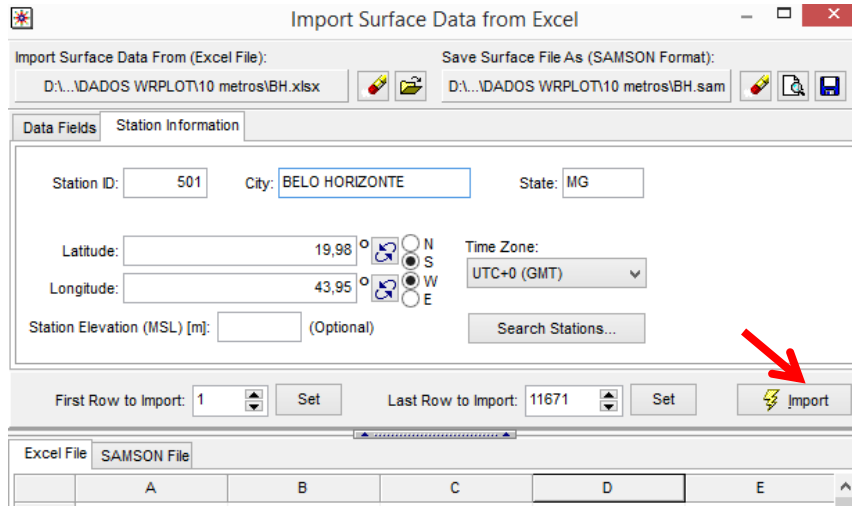
opção “Last Row to Import”: confira se a quantidade de linhas preenchidas da planilha é a mesma informada pelo *software*. Se não for, troque pela quantidade correta.



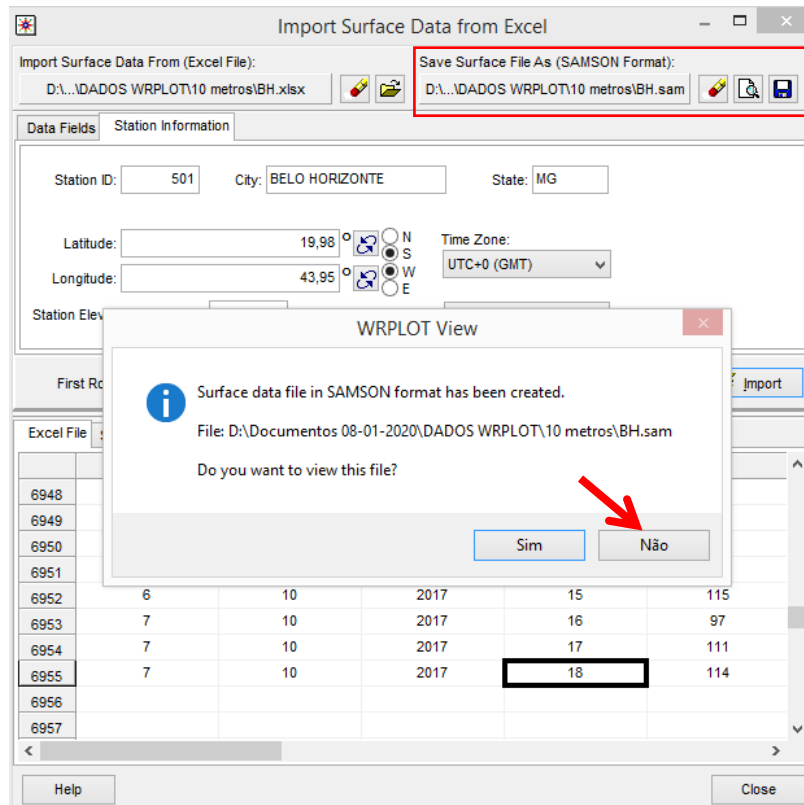
Porém, é necessário informar ao *software* o que cada coluna significa. Para isso basta preencher a coluna “Excel Column Name” no “Data Fields” com a letra correspondente a cada coluna da planilha de dados. No exemplo abaixo: na coluna B estão os meses, na A os dias, na D as horas e na E a direção do vento. Nesta etapa é importante definir a configuração dos horários da planilha (00 a 23h ou 01 a 24h).



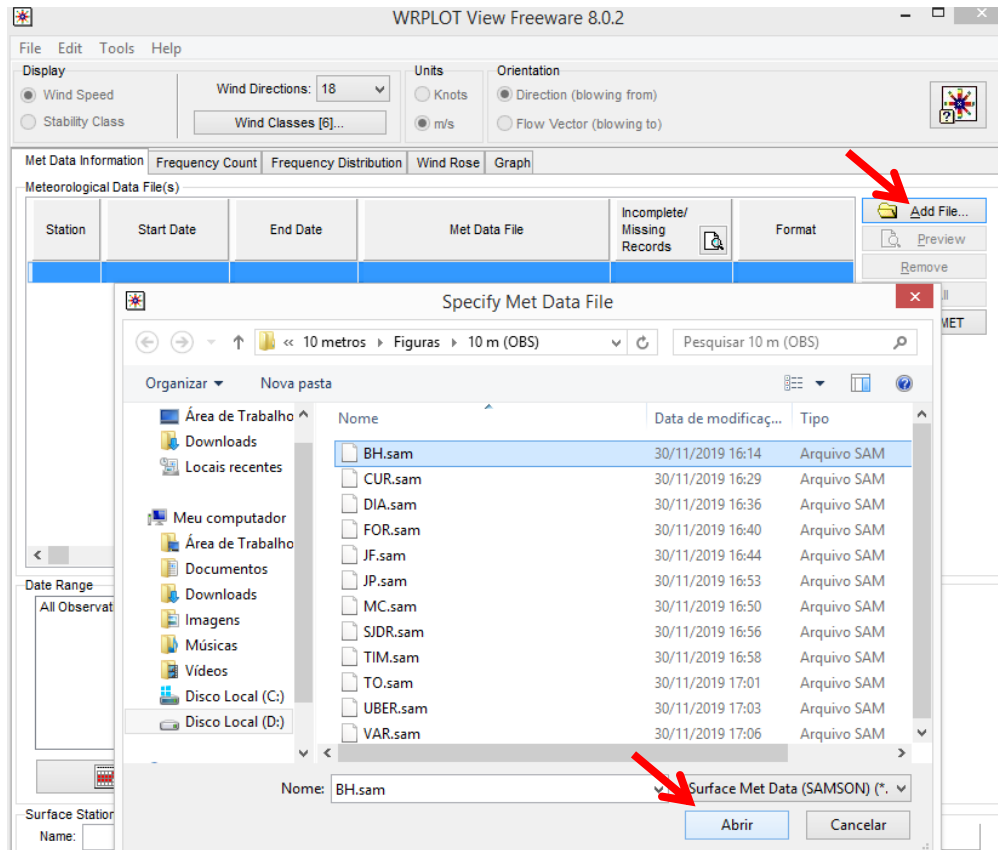
Na sequência, clique em “Station Information” e preencha os campos com as informações sobre os dados. Por fim, clique em “Import”.



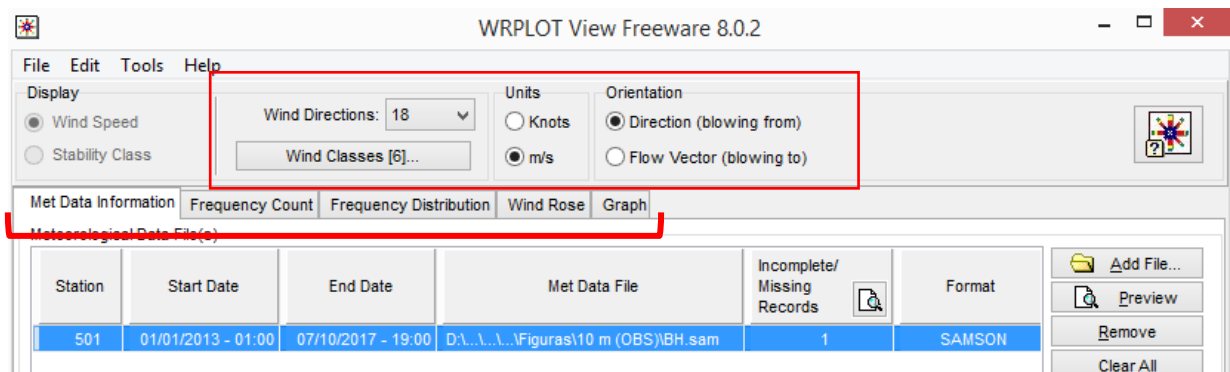
Ao clicar em “Import” aparecerá a seguinte janela. Clique em “Não”. Nesta etapa, um arquivo “.sam” será salvo na mesma pasta onde o arquivo de entrada estava. Caso queira mudar o local onde o arquivo será salvo, clique em “Save Surface File As (SAMSON Format)” e altere.



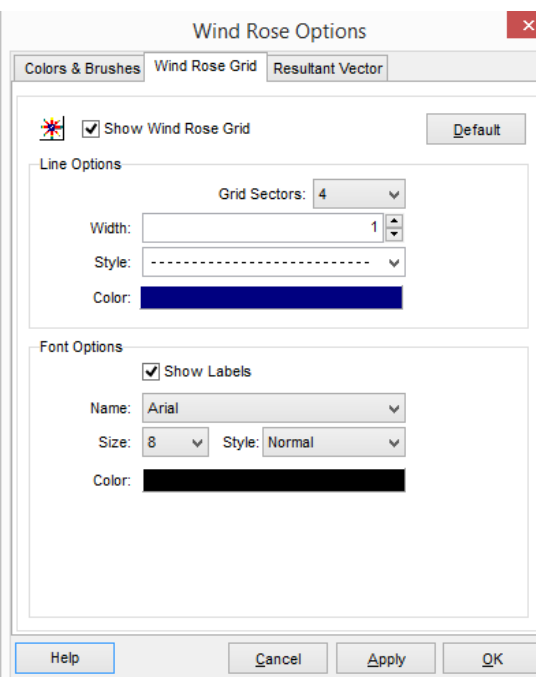
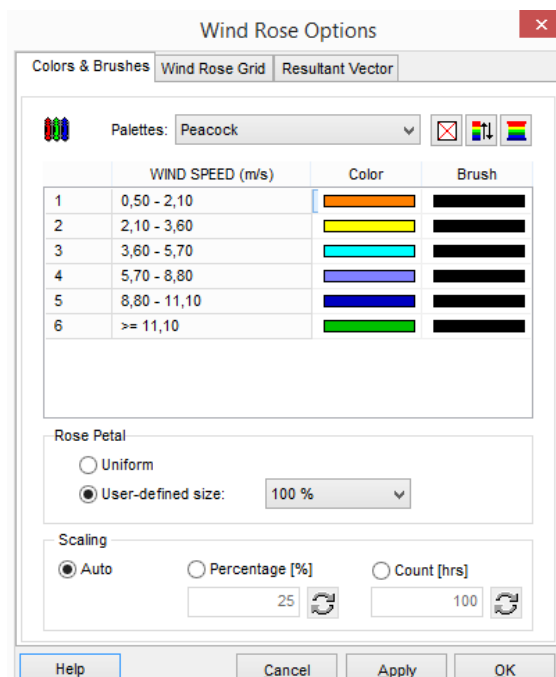
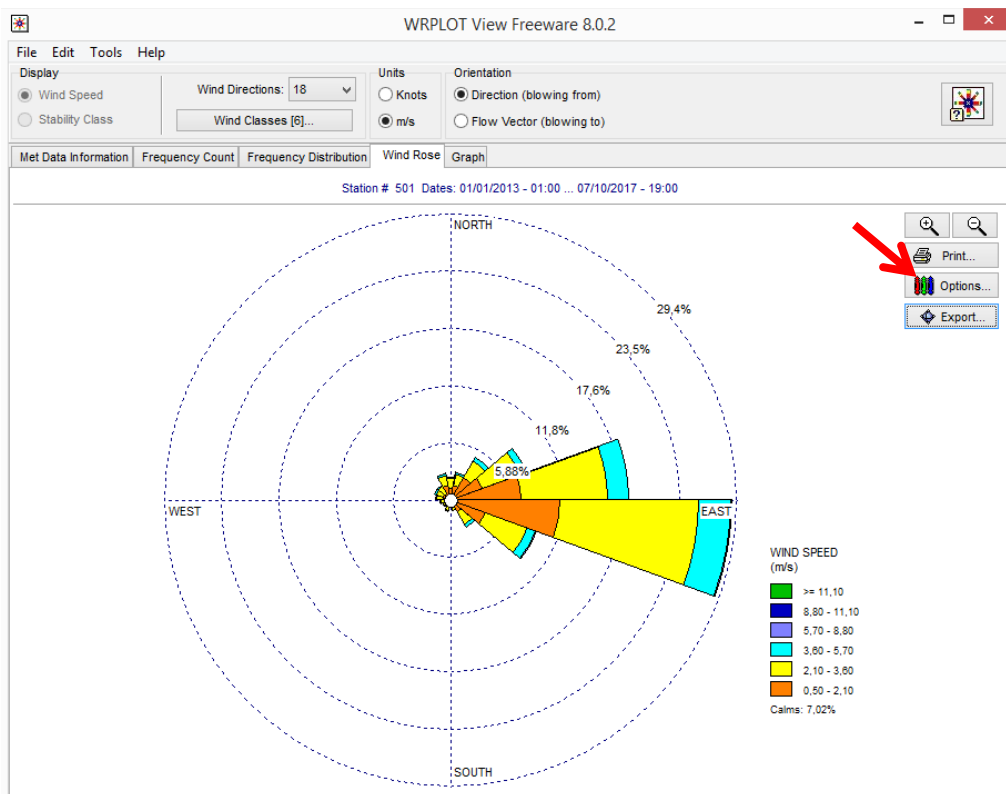
Feche a janela, e retorne para a área de trabalho do *software*, e em sequência clique em “Add File”. Procure e selecione o arquivo baixado na etapa anterior em formato “.sam”. Clique em “Abrir”.



Após a etapa anterior, os dados já estarão analisados e a rosa dos ventos já estará disponível na aba “Wind Rose”. Nas outras abas há outras informações sobre os dados, como análises estatísticas e gráficas. É possível definir a orientação, número de classes e unidades da rosa dos ventos.



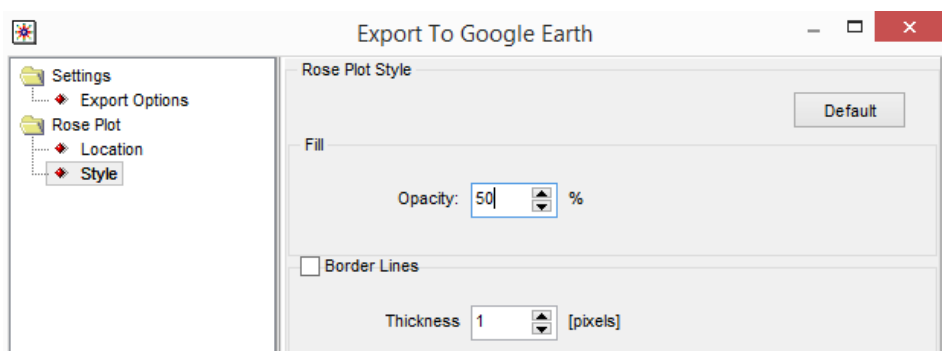
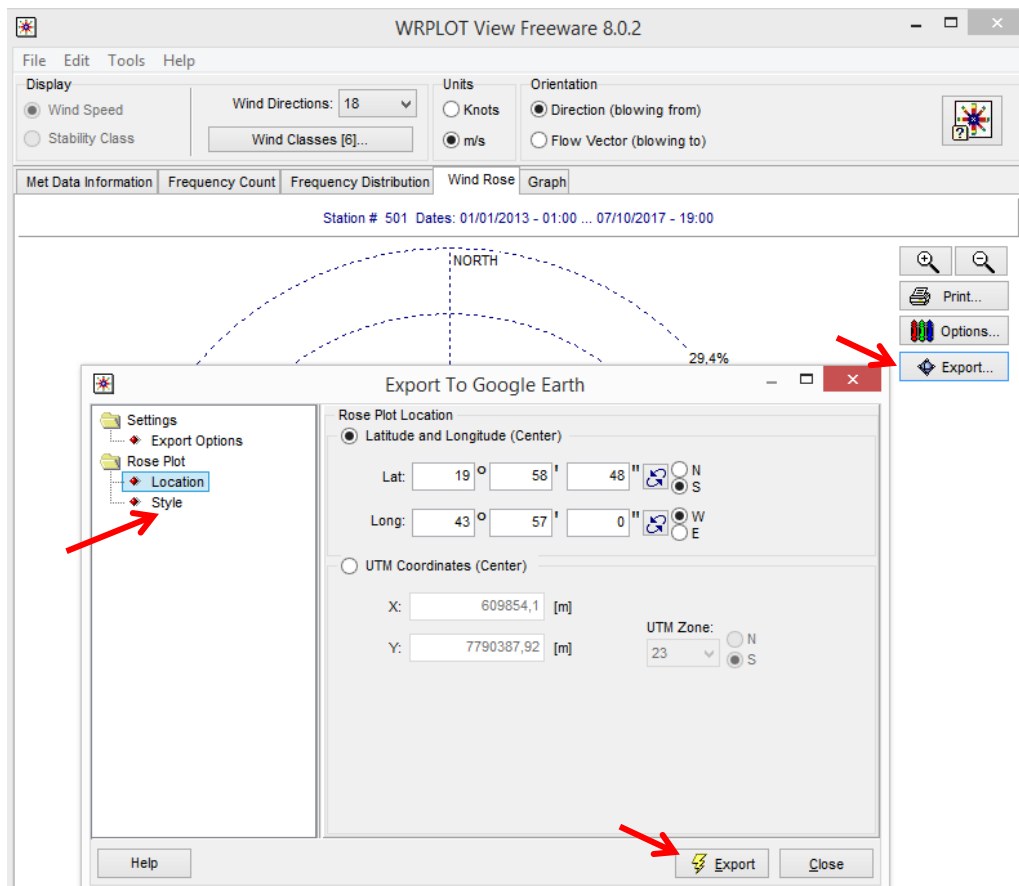
Além disso, é possível ainda alterar as cores, formatos, tracejados, tamanho das fontes, estilo etc. da rosa dos ventos. Para isso, basta clicar em “Options” e selecionar o que deseja fazer.



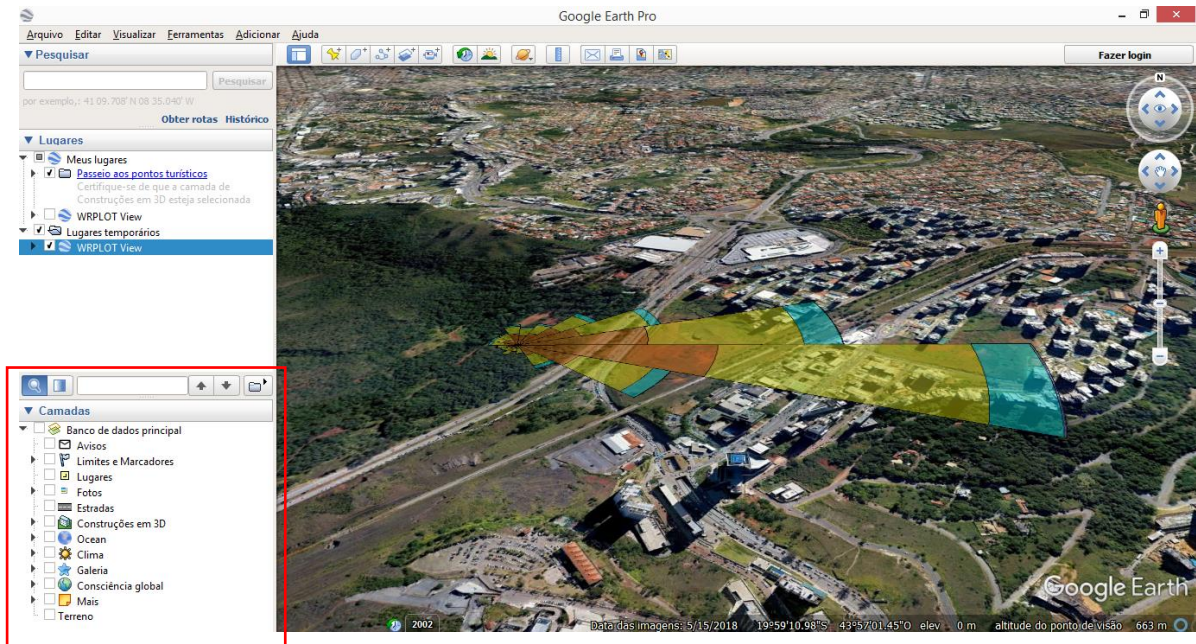


#### D.4) Exportando a rosa dos ventos para o *Google Earth*

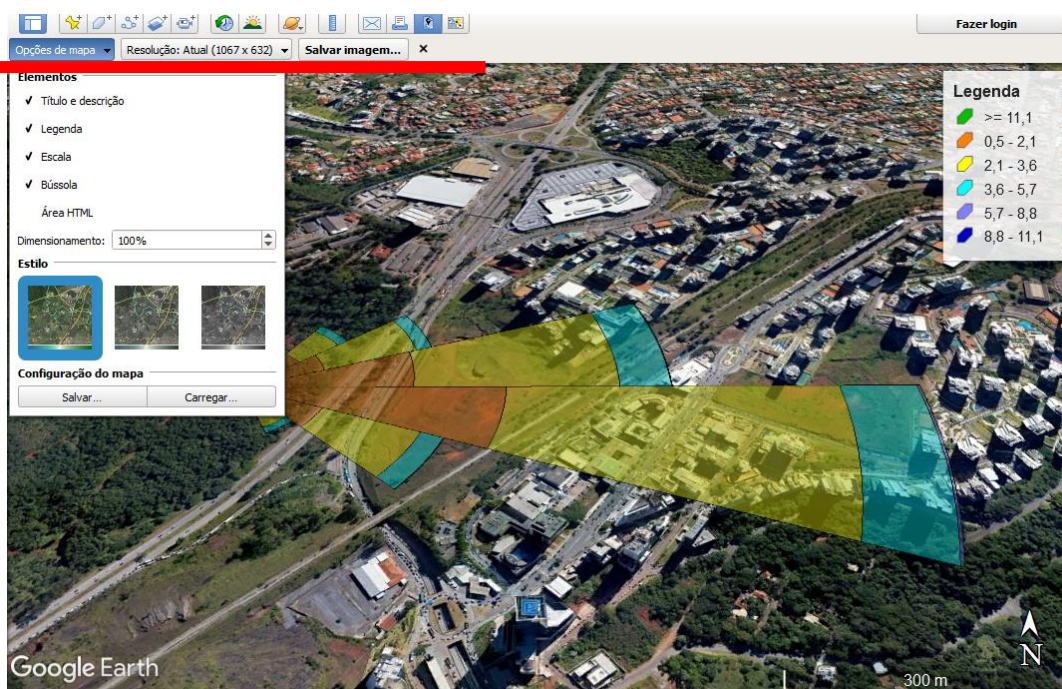
Com a rosa dos ventos finalizada na etapa anterior, é possível exportá-la diretamente do *WRPLOT View* para o *Google Earth*. Este procedimento permite uma melhor compreensão da variabilidade da intensidade do vento e direção sobreposta ao terreno analisado. Para fazer isto, é necessário clicar em “Export” e na sequência em “Location” e informe as coordenadas do local. Ainda é possível, clicando em “Style”, ajustar a transparência da rosa dos ventos. Após tudo realizado, clique em “Export” e o *Google Earth* abrirá automaticamente.



A imagem aparecerá da seguinte forma no *Google Earth*. Posicione-a da maneira que achar melhor a visualização. É interessante desabilitar as camadas (dispostas do lado esquerdo da tela) caso alguma esteja atrapalhando a sobreposição.



Após isso, antes de salvar a imagem, é possível definir os elementos que deve aparecer (“Opções de Mapa”) e a resolução da figura. Definidos estes pontos, clique em “Salvar Imagem”.



A imagem final ficará da seguinte forma:

