

Controles no desenvolvimento dos campos transgressivos de dunas da barreira costeira holocênica, litoral norte do Rio Grande do Sul

Patrícia R. PUHL¹ & Sérgio R. DILLENBURG²

¹ Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, Caixa Postal 15001, CEP 91.509-900, Porto Alegre, RS, Brasil (patricia.puhl@gmail.com).

Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av.

² Bento Gonçalves, 9.500, Caixa Postal 15001, CEP 91.509-900, Porto Alegre, RS, Brasil (sergio.dillenburg@ufrgs.br).

Puhl, P.R. & Dillenburg, S.R. 2018. Controles no desenvolvimento dos campos transgressivos de dunas da barreira costeira holocênica, litoral norte do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 45: e0652.

DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.85642>

Resumo. No litoral norte do Rio Grande do Sul, ao norte do balneário Xangri-lá, a barreira holocênica encontra-se parcialmente coberta pela fase moderna e relativamente ativa de um campo de dunas transgressivo, enquanto ao sul deste balneário, o campo de dunas cobre completamente a barreira. Este trabalho contribuiu para o conhecimento acerca desse comportamento diferenciado de desenvolvimento da fase moderna do campo de dunas transgressivo sobre a barreira holocênica. Foram utilizadas séries temporais de vento (rumo e velocidade) e precipitação de estações meteorológicas localizadas ao sul e ao norte de Xangri-lá, bem como foram realizadas medições simultâneas de vento, por meio de anemômetros portáteis, imediatamente ao norte e ao sul desse balneário. Potenciais de transporte de areia foram calculados para ambas as estações meteorológicas. Os registros históricos da estação de Tramandaí (mais ao sul) indicaram maiores velocidades de vento e menores de precipitação em relação à estação de Torres (mais ao norte). Devido à maior velocidade dos ventos em Tramandaí, o potencial de transporte de areia nessa localidade foi superior ao de Torres, indicando favorecimento da migração das dunas em suas proximidades. O comportamento desigual de desenvolvimento da fase moderna do campo de dunas transgressivo pode então estar relacionado à maior velocidade e frequência dos ventos NNE, NE, ENE e E em Tramandaí (ou seja, ao sul de Xangri-lá), além da menor precipitação, que também favorece um transporte de areia mais eficiente.

Palavras-chave. Xangri-lá, Serra Geral, potencial de transporte de areia.

Abstract. CONTROLS IN THE DEVELOPMENT OF TRANSGRESSIVE DUNE FIELDS OF THE HOLOCENE COASTAL BARRIER, NORTHERN COAST OF RIO GRANDE DO SUL. In the north coast of Rio Grande do Sul, to the north of Xangri-lá beach, the Holocene barrier is partially covered by the modern and relatively active phase of a transgressive dune field, while to the south of this balneario the dune field completely covers the barrier. This work contributed to the knowledge about this differentiated development behavior of the modern phase of the transgressive dune field on the Holocene barrier. Time series of wind (direction and speed) and precipitation from meteorological stations located to the south and north of Xangri-lá were used, as well as simultaneous wind measurements using portable anemometers, immediately to the north and to the south of this balneario. Sand transport potentials were calculated for both meteorological stations. Historical records of the Tramandaí station (further south) indicated higher wind speeds and lower precipitation relative to the Torres station (further north). Due to the greater speed of the winds in Tramandaí, the potential of sand transport in this locality was higher than Torres, indicating the favor of the dunes migration in its proximities. The uneven developmental behavior of the modern phase of the transgressive dune field can then be related to the higher speed and frequency of the NNE, NE, ENE and E winds in Tramandaí (ie, south of Xangri-lá), as well as the lower precipitation also favors more efficient sand transportation.

Keywords. Xangri-lá, Serra Geral, drift potential.

1 Introdução

Na planície costeira do Rio Grande do Sul (RS) são encontrados sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira referentes a quatro máximos transgressivos, os quais são denominados, do mais antigo para o mais recente, como laguna-barreira I, II, III e IV (Villwock, 1984; Villwock & Tomazelli, 1995). Nesses sistemas, e em particular no sistema IV, são encontrados depósitos praias e eólicos, estes na forma de cordões litorâneos do tipo dunas frontais e de campos de dunas transgressivos, além de depósitos lagunares.

A barreira holocênica (sistema IV), entre os balneários de Torres e Tramandaí, apresenta morfologia de cordões litorâneos atípicos, na forma de campos de dunas transgressivos, desenvolvidos em distintas fases durante a progradação da barreira (Hesp *et al.*, 2005, 2007).

Para o desenvolvimento de campos de dunas transgressivos é necessário haver grande estoque disponível de areia, topografia de terras baixas para acomodação do depósito e um regime de ventos apropriado (em velocidade, frequência e rumo) para mobilização e acumulação do material sedimentar (Tomazelli *et al.*, 2008). No RS, esses três fatores estão presentes, permitindo a formação de grandes depósitos eólicos.

No litoral norte do RS, a fase mais recente de formação de campos de dunas transgressivos apresenta-se pouco desenvolvida ao norte do balneário Xangri-lá, limitando-se a uma franja com cerca de 500-800 m de largura, cobrindo apenas um quarto ou um quinto da superfície emersa da barreira holocênica. Entretanto, em Xangri-lá e ao sul deste balneário, esta fase mostra um significativo avanço (desenvolvimento) e passa a cobrir toda a barreira.

Neste trabalho, buscou-se o entendimento dos fatores naturais, atuantes em uma escala temporal de longo período (séculos e milênios) responsáveis por este comportamento diferenciado no desenvolvimento da fase moderna de formação do campo de dunas transgressivo, ao norte e a sul do balneário Xangri-lá.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Área

A costa do RS, localizada entre as latitudes 29° e 34° S, apresenta aproximadamente 620 km de extensão, com seu limite norte no rio Mampituba e sul no Arroio Chuí, e possui uma orientação predominantemente NE-SW, ocorrendo segmentos levemente côncavos e convexos alternados. A costa do RS é caracterizada por apresentar praias arenosas relativamente contínuas, interrompidas apenas por quatro cursos de água: o Rio Mampituba, o canal de desembocadura da Laguna de Tramandaí, o canal de desembocadura da Laguna dos Patos e o Arroio Chuí (Calliari *et al.*, 2005) (Fig. 1A).

Entre Torres e Tramandaí, a costa é suavemente côncava e apresenta uma barreira holocênica, formada por cordões litorâneos relacionados a fases de formação de campos de dunas transgressivos e apresentando uma largura entre 2 e 5 km (Dillenburg *et al.*, 2000). A porção mais a oeste dos cordões é mais alta e foi definida como uma barreira transgressiva formada no máximo transgressivo de cerca de 5 ka AP (Villwock & Tomazelli, 1995). Todavia, mais recentemente, Dillenburg *et al.* (2006) e Hesp *et al.* (2007), através de datações por ¹⁴C e Termoluminescência, atribuíram ao cordão mais interno, com altura de até 14 m, uma idade situada entre 8 e 7 ka AP. Uma fase moderna de formação de campos de dunas transgressivos, de aproximadamente 500 a 800 m de largura, ocorre continuamente próxima à atual linha de costa, entre os balneários de Torres e Xangri-lá. A partir deste último balneário, esta fase torna-se mais larga e cobre toda a superfície da barreira (Dillenburg *et al.*, 2000) (Figs. 1B-C).

2.1.1 Caracterização meteorológica e oceanográfica

Segundo Tomazelli (1993), o vento dominante na costa do RS é o NE e, embora sobre ao longo de todo o ano, é mais ativo nos meses de primavera e verão. O vento de W-SW é secundário, sendo mais eficaz nos meses de inverno. Ao longo da costa do RS, o regime de ventos não é homogêneo (Martinho *et al.*, 2010): há um gradiente crescente de velocidade de norte para sul, entre Torres

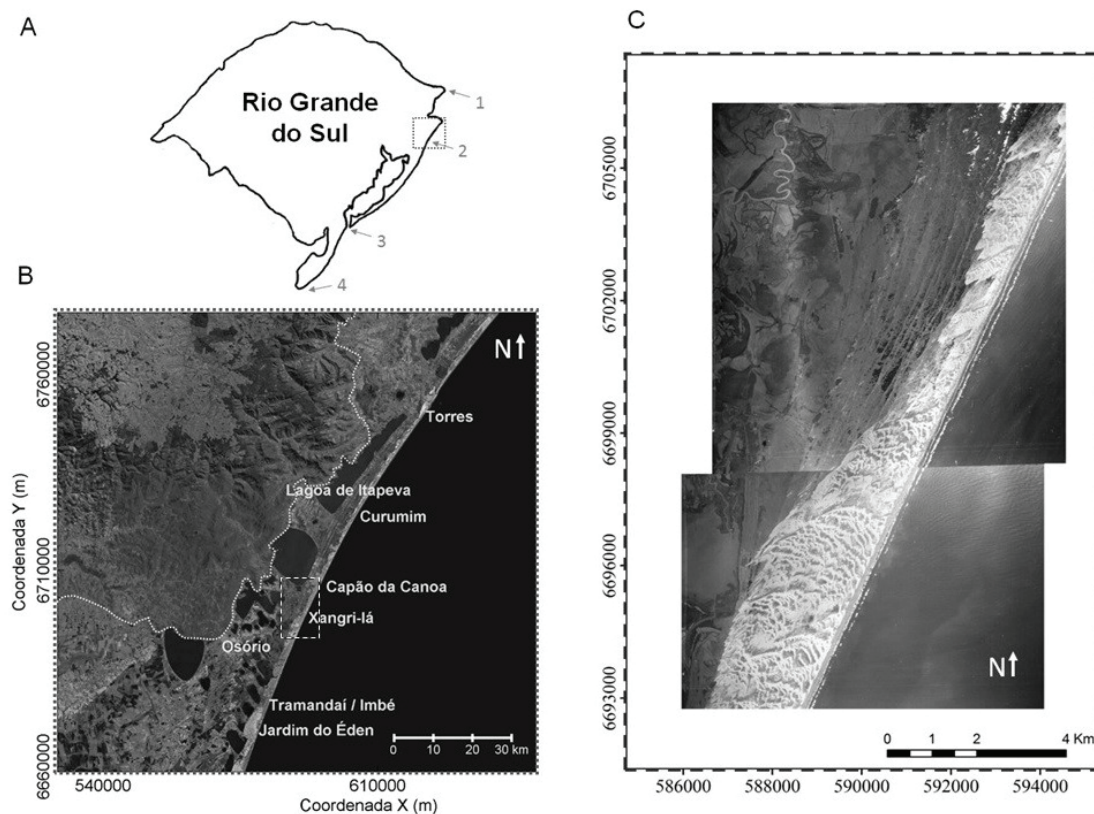


Figura 1. Área de estudo. A) Localização geral da área de estudo com as quatro irregularidades da costa do RS (1 - Rio Mampituba, 2 - desembocadura da Lagoa de Tramandaí, 3 - desembocadura da Lagoa dos Patos e 4 - Arroio Chuí); B) imagem de satélite do Basemap ESRI - ArcGIS 10.2 destacando as principais localidades e o contorno da Serra Geral (pontilhado branco); e C) Fotografias aéreas de 1948 apresentando a fase mais recente de formação de campos de dunas transgressivas, com destaque para o pequeno desenvolvimento a norte do balneário Xangri-lá, cobrindo uma pequena parcela da barreira holocênica, e com significativo avanço ao sul do balneário, cobrindo toda a barreira.

Figure 1. Studied area. A) General location of the studied area with the four irregularities of the RS coast (1 - Mampituba River, 2 - mouth of Tramandaí Lagoon, 3 - mouth of Lagoa dos Patos and 4 - Arroio Chuí); B) Basemap ESRI - ArcGIS 10.2 satellite image highlighting the main localities and outline of Serra Geral (white dotted line); and C) Aerial photographs of 1948 presenting the most recent phase of transgressive dune fields formation, especially the small development by the north of Xangri-lá beach, covering a small part of the holocene barrier, and with significant progress to the south of the balneario, covering the entire barrier.

e Mostardas. Especificamente em Torres, os rumos mais frequentes são de NE e S, e têm uma velocidade reduzida; em Imbé, os ventos de NE são mais frequentes e apresentam maior velocidade; já em Mostardas, os ventos NE e S são os mais frequentes e mais fortes, e dentre as estações analisadas por Martinho *et al.* (2010), é a que apresenta a maior frequência de ventos fortes.

O regime de chuvas é fortemente determinado pelas diferenças de altitude e os acidentes de relevo. As correntes de ar, saturadas de vapor de água, esbarrando na Serra Geral, são forçadas a subir. Como a cada 100 m de ascensão a temperatura diminui 0,5 °C, há a condensação, formação de nuvens e precipitação orográfica (Balduino Rambo, 1956). Consequentemente, a precipitação atinge o máximo nas encostas e no bordo do Planalto. Nos locais onde a orografia é inexistente, como no

litoral, as chuvas ocorrem em menor volume. Na costa do RS, o litoral norte é a porção mais quente e úmida. Isso ocorre devido à influência do elevado gradiente topográfico entre o litoral e as escarpas da Serra Geral, com elevações de 400 – 500 m, que ocorrem a cerca de 15 a 20 km de distância da linha de costa. Estas elevações produzem um aumento no contraste das temperaturas da terra e do mar. A brisa marinha (flui do mar para a terra) transporta massas de ar quentes e úmidas, gerando as já mencionadas chuvas orográficas na região (Hasenack & Ferraro, 1989; Grimm *et al.*, 1998). De forma geral, há uma tendência a índices crescentes de precipitação anual no sentido sul-norte (SEMC, 2002).

As principais ondulações que ocorrem na costa do RS são as de N-NE e as de S. As ondulações provenientes de N-NE são as mais frequentes,

porém, apresentam menor energia que as ondulações de S. As ondas de S, apesar de menos frequentes, porém mais energéticas, são as mais importantes para o transporte sedimentar ao longo da costa (Lima *et al.*, 2001), o qual corresponde a uma resultante de deriva litorânea de sul para norte.

No litoral norte, a linha de costa apresenta forma côncava e plataforma interna adjacente ampla e com baixa declividade, resultando em um processo eficiente de refração e de dissipação da energia das ondas até alcançarem à costa. O contrário ocorre em porções da costa que apresentam forma convexa: há plataformas internas mais estreitas e íngremes, não havendo uma grande área para refração e dissipação de energia das ondas, as quais alcançam a costa com grande energia e conseqüente grande transporte longitudinal de sedimentos. Nas zonas de transição (entre as porções côncavas e convexas), não há predominância de processos deposicionais ou erosivos, havendo um balanço na entrada e saída de sedimentos e produção de barreiras agradacionais (ou estacionárias). Ou seja, a energia das ondas e as taxas de transporte longitudinal de sedimento são menores no litoral norte do que em porções da costa que apresentem forma convexa ou retilínea, e conseqüentemente, na região entre Torres e Tramandaí ocorre balanço positivo de sedimentos em larga escala temporal (Martinho *et al.*, 2009)

Na costa do RS, as marés astronômicas são de pequena amplitude (média de 0,5 m) e secundárias em relação às marés meteorológicas (variações de nível associadas a ventos e pressão atmosférica) (Villwock & Tomazelli, 2007). As correntes de marés podem ser consideradas inexpressivas, não afetando diretamente a sedimentação costeira.

2.1.2 Caracterização geológica

O litoral norte do RS apresenta condicionantes geológicos variáveis: na sua porção mais ao norte, há grandes formações rochosas da Serra Geral (pertencente ao Planalto Meridional) que afloram na costa na forma de escarpas, no município de Torres, com planície costeira muito estreita (menos de 9 km de largura); e, mais ao sul, a escarpa da Serra Geral ocorre mais interiorizada

até deixar de ocorrer, com orientação NE-SW, nas proximidades de Osório, substituído por planície costeira ampla (mais de 20 km de largura).

As escarpas da Serra Geral apresentam altitudes médias de 400 – 500 m (Dillenburg *et al.*, 2001) e estão localizadas, conforme mencionado acima, em média a aproximadamente 9 km da linha de costa na região de Torres, e a cerca de 20 km da linha de costa, na região de Tramandaí/Imbé. Mais para o sul, na altura do município de Osório, deixam de postar-se frontalmente à linha de costa e infletem para o interior (Fig. 1).

Ao longo da planície costeira do RS, barreiras progradacionais, retrogradacionais e agradacionais coexistem. De Torres a Tramandaí, a barreira é progradacional (ou regressiva), sendo caracterizada pela presença de um sistema lagunar na sua retaguarda e por apresentar sua superfície ornamentada por uma sucessão de cordões de campos de dunas transgressivos (Hesp *et al.*, 2007).

Em termos de granulometria, nas praias de Torres o tamanho médio de grão se mantém entre 2,2 e 2,7 ϕ (areia fina), sendo praias bastante homogêneas com relação às características sedimentológicas. Nos balneários de Tramandaí/Imbé, os sedimentos também se apresentam homogêneos ao longo da praia, com tamanho médio de grão oscilando entre 2,1 e 2,6 ϕ (areia fina) (Figueiredo, 2005).

A costa do RS comporta um dos mais expressivos sistemas eólicos da costa brasileira. Isso ocorre, pois, a porção costeira do estado apresenta três fatores básicos para a formação de campos de dunas: topografia de planície costeira, regime de ventos apropriado em velocidade, frequência e rumo, e grande estoque de areia quartzosa fina (Tomazelli *et al.*, 2008; Martinho *et al.*, 2010). Uma caracterização mais detalhada dos diferentes campos de dunas transgressivos do litoral norte e médio do RS pode ser obtida em Martinho *et al.* (2010).

Segundo Dillenburg *et al.* (2001), na porção sul do litoral norte, entre Xangri-lá e Tramandaí, a barreira holocênica (barreira IV) apresenta uma média de 2,5 km de largura, coberta em toda sua extensão pela fase moderna (ativa) de campos de dunas transgressivos, que migram para SW,

uma vez que o vento dominante é de NE. Com a migração desses campos de dunas, o sistema lagunar sofre assoreamento. Na porção norte, entre Xangri-lá e Torres, a largura média da barreira costeira é maior (3,5 km) e apresenta reduzida cobertura de areias da fase moderna dos campos de dunas transgressivos, limitada a uma franja que não alcança 1 km de largura, a contar da linha de costa. Em ambas as porções não urbanizadas desses dois setores do litoral, ocorrem dunas frontais relativamente contínuas, com alturas entre 2 e 5 m. Dillenburg et al. (2001) levantaram a hipótese, sem testá-la, de que um aumento na velocidade média dos ventos de NE, de norte para sul ao longo do litoral norte, acompanhado por um aumento das taxas de precipitação, de sul para norte, foram determinantes de uma maior mobilidade de dunas ao sul de Xangri-lá, favorecendo um mais amplo desenvolvimento da fase moderna de formação dos campos de dunas transgressivos.

2.2 Materiais e métodos

Foram obtidas séries temporais de vento (rumo e velocidade) e de precipitação de duas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): Torres e Tramandaí, a primeira situada cerca de 70 km ao norte de Xangri-lá, e a segunda situada a 20 km ao sul. Para a primeira, as séries compreendem o período de 01/06/2006 a 15/12/2015; para a segunda, de 09/03/2008 a 25/11/2015, com dados horários em ambas. Para comparação das duas séries, foram escolhidos intervalos em comum: 09/03/2008 a 25/11/2015. Também foi obtida uma série de rumo e velocidade do vento da estação meteorológica convencional de Torres, com dados entre as datas de 01/06/1961 e 31/12/2014, apenas para os horários 00:00, 12:00 e 18:00.

A localização dessas e das demais estações utilizadas e citadas a seguir estão apresentadas na figura 2, podendo ser percebida uma diferença no local escolhido para a fixação das estações de Torres (convencional e automática).

Segundo o INMET (2011a), uma estação meteorológica automática (EMA) coleta por meio de sensores, a cada minuto, parâmetros meteorológicos. Dentre esses parâmetros podem ser citados

temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, rumo e velocidade dos ventos, e radiação solar. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados, sendo disponibilizados gratuitamente, em tempo real. Já uma estação meteorológica convencional (Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional) é composta por vários sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos, sendo esses lidos e anotados por um observador a cada intervalo e que os envia a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer (INMET, 2011b).

Potenciais de transporte de areia (DP - Drift Potential) foram calculados para essas séries das estações automáticas do INMET usando o Método de Fryberger & Dean (1979). O valor numérico obtido pela equação expressa a quantidade relativa de areia potencialmente transportada pelo vento durante determinado tempo em que o vento soprou. As unidades de DP são consideradas como unidades vetoriais (UV), pois a velocidade do vento é tratada como um vetor. O potencial de transporte de areia de uma estação meteorológica corresponde à soma dos potenciais de deriva para cada rumo de vento num determinado intervalo de tempo. O tamanho de grão utilizado nos cálculos foi 2,5 ϕ (ou 0,177 mm), de acordo com medições de Martinho (2008).

Foram também obtidos dados de velocidade e rumo do vento da estação meteorológica convencional de Imbé, cedidos pela Superintendência de Portos e Hidrovias do Governo do Estado do Rio Grande do Sul. A série apresenta 56 anos de dados (de 04/04/1948 a 31/12/2003) com três medições diárias (09:00, 15:00 e 21:00).

Séries de velocidade média do vento, rumo do vento e de precipitação foram também obtidas para a lagoa de Itapeva – a lagoa mais ao norte do sistema de lagoas costeiras de água doce interligadas no litoral norte do RS. Esse corpo aquoso apresenta orientação NE-SW, assim como a costa do RS, e estende-se das proximidades de Torres a Curumim (Fig. 2). Toda sua margem oeste coincide com a Serra Geral. O período de dados dessa

estação automática compreende de 01/12/1998 a 09/09/1999, com medições a cada trinta minutos. Maiores detalhes desse levantamento podem ser obtidos em Cardoso *et al.* (2003).

Além da aquisição das séries temporais citadas anteriormente, foram realizadas medições simultâneas de velocidade e rumo do vento em dois locais: em Capão da Canoa (situada aproximadamente 5 km a norte de Xangri-lá) e Tramandaí (situada cerca de 25 km ao sul de Xangri-lá), em uma primeira campanha (C1) no dia 28/10/2015, e denominados, respectivamente, de ponto Norte e ponto Sul. E em Capão da Canoa e Jardim do Éden (cerca de 30 km ao sul de Xangri-lá), em uma segunda campanha (C2) no dia 20/01/2016, denominados respectivamente de ponto Norte e ponto Sul (Fig. 3). O objetivo foi coletar dados de vento a norte e a sul da região de expansão (alargamento) do campo de dunas transgressivo, que ocorre no balneário de Xangri-lá.

Os instrumentos utilizados foram dois ane-

mômetros digitais portáteis da marca Kestrel 1000 fixados em tripé fotográfico com altura regulada em 1 m, para medição da velocidade instantânea do vento; duas setas, fixadas na mesma altura do tripé, para medição do rumo do vento, com o auxílio de bússolas. As medições apresentaram grande resolução temporal, com dados medidos a cada 1 min. Os rumos em relação ao norte magnético obtidos com as bússolas foram transformados em rumos em relação ao norte geográfico, utilizando o World Magnetic Model da NOAA. Os valores usados para correção foram: 17,23° W para ponto Sul e 17,4° W para ponto Norte da C1; e 17,21° W para ponto Sul e 17,45° W para ponto Norte da C2.

Por meio de regressões lineares simples e seus respectivos coeficientes de determinação (r^2), é possível definir a concordância e a precisão entre as variáveis comparadas das estações meteorológicas automática e convencional. O coeficiente de determinação obtido pode variar entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior a pre-

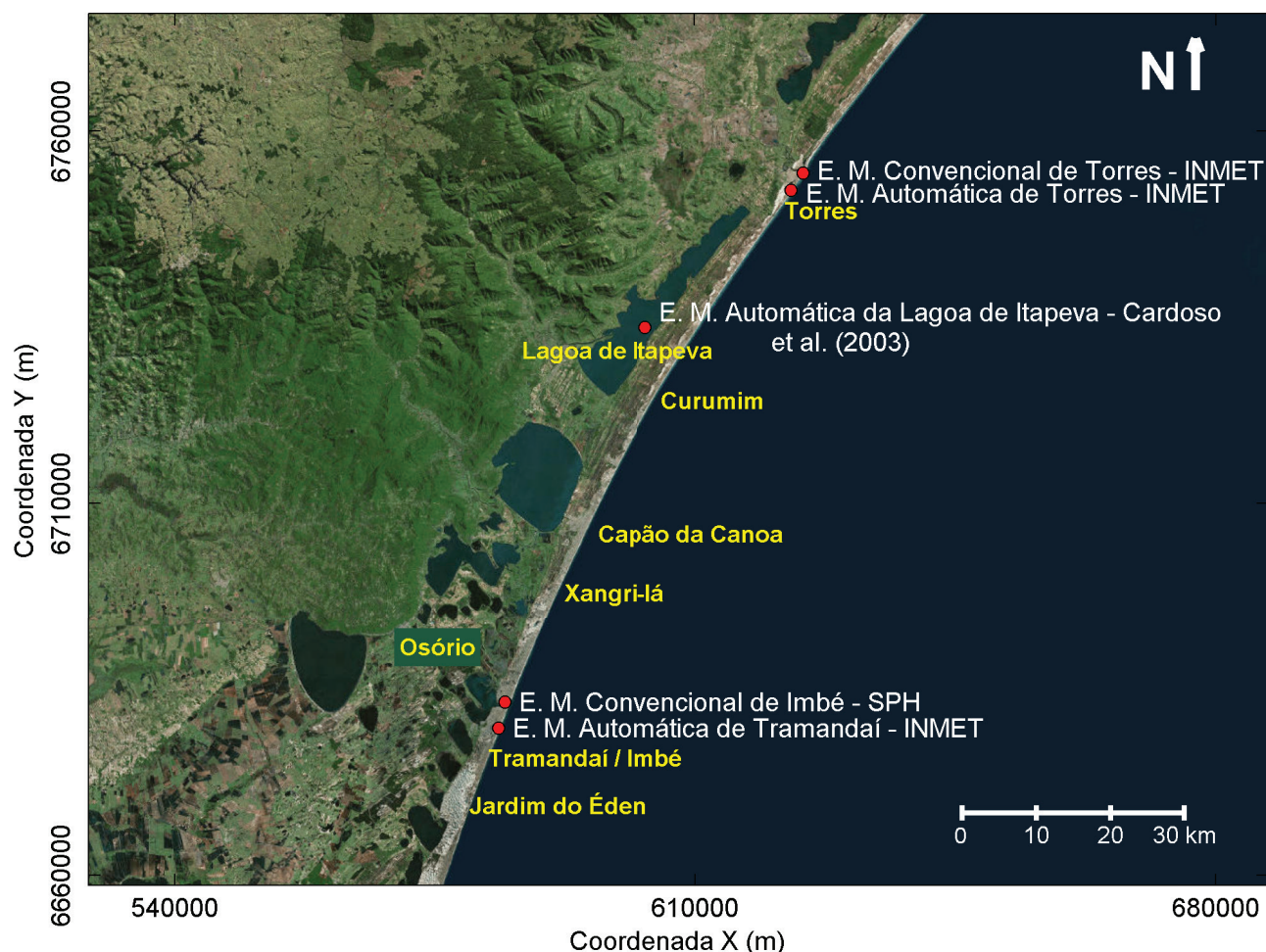


Figura 2. Localização das estações meteorológicas (E. M.) utilizadas como base de dados.
 Figure 2. Location of the weather stations (W.S.) used as a database.

cisão entre os valores obtidos nas duas estações meteorológicas (Triola, 1999).

O cálculo do erro médio quadrático ou RMSE (Root Mean Square Error) foi realizado, quando necessário, com o intuito de verificar se há diferença entre as variáveis das estações, de acordo com a fórmula 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E1_i - E2_i)^2} \quad (\text{Fórmula 1})$$

onde E1 e E2 representam a variável de cada uma das estações; quanto menor o valor de RMSE, mais semelhantes são as séries comparadas.

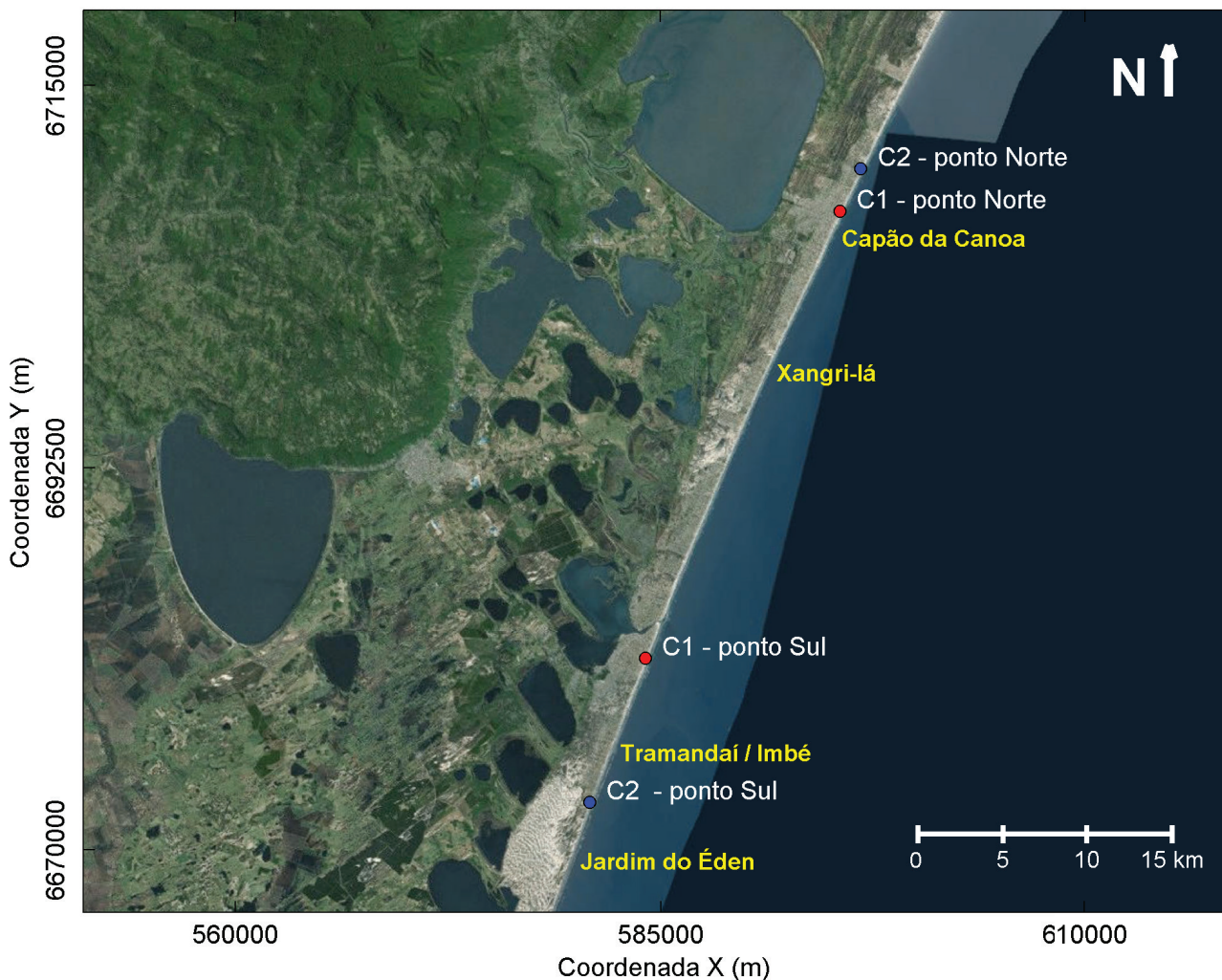


Figura 3. Mapa de localização das estações nas campanhas C1 e C2, denominadas como pontos Norte e Sul.
 Figure 3. Location map of the stations in the field campaign C1 and C2, denominadas as North and South points.

3 Resultados

3.1 Dados das Estações Convencional e Automática de Torres

Os dados dessas duas estações são horários e, para comparação das séries foi escolhido um horário em comum, como por exemplo, 00:00 (Fig. 4). As séries de velocidade de vento para as duas estações (Fig. 4A), apesar de apresentarem um padrão similar, possuem diferenças nos valores,

tendo sido obtida uma correlação (r^2) de apenas 0,7854 (num intervalo de 0 a 1) e com um RMSE calculado de 1,34 m/s (valor utilizado apenas para apontar que há diferenças entre as estações). Além disso, houve distribuição diferenciada nos rumos, com valores entre 0 e 360° na estação automática e valores arredondados para os pontos cardeais e colaterais (ex: NE ou SW) na convencional (Fig. 4B), resultando em correlação mais baixa que a obtida para velocidade do vento ($r^2 = 0,5921$).

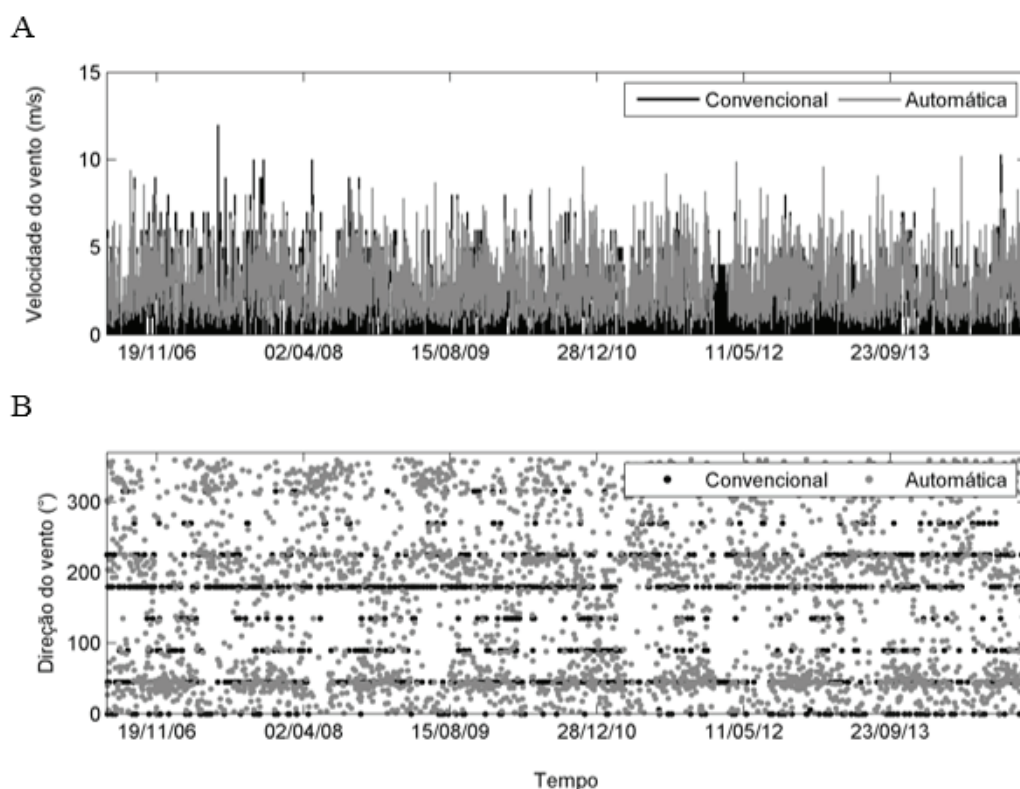


Figura 4. Comparação entre as estações convencional e automática de Torres no horário 00:00. A) Velocidade (m/s); B) Rumo ($^{\circ}$) do vento para as estações convencional (em preto) e automática (em cinza) do INMET de Torres – entre 01/06/2006 e 31/12/2014 para o horário 00:00.

Figure 4. Comparison for conventional and automatic INMET stations of Torres at 00:00 hours. A) Speed (m/s); B) Direction ($^{\circ}$) of the wind for conventional (black) and automatic (gray) stations of Torres INMET - between 06/01/2006 and 31/12/2014 for the 00:00 time.

3.2 Dados das Estações Automáticas de Torres e Tramandaí

A velocidade do vento em Tramandaí, para o período entre 09/03/2008 e 25/11/2015, foi visivelmente superior à velocidade em Torres (Figs. 5A-B). Essa diferença entre as duas as séries pode ser confirmada por meio do RMSE calculado (2,88 m/s), ou seja, há uma diferença de magnitude entre elas. Percebe-se também uma ampla variedade de direções ao longo das séries (Figs. 5C-D).

Nas duas estações, o vento mais frequente foi de NE (12,14% do tempo em Torres e 24,02% em Tramandaí). Em Torres também se destaca o vento ENE, ocorrendo em 11,55% do tempo). As máximas velocidades para Torres estão associadas aos ventos de SSE e W, com máxima de 13,0 m/s e para Tramandaí aos ventos de ENE e SE, com máxi-

mos de 20,0 e 18,8 m/s, respectivamente. A classe de velocidade predominante para Tramandaí foi de 3,0 a 4,0 m/s, e para Torres a de 1 a 2 m/s (Quadro 1 e Quadro 2, respectivamente).

Exceto para os ventos de SSW, todas as médias de velocidade por rumo foram maiores em Tramandaí. Portanto, para os ventos de interesse deste estudo (NNE, NE, ENE e E), as velocidades médias também foram maiores para Tramandaí. Ocorreram 469 registros de ventos de NNE, NE, ENE e E acima de 11,0 m/s em Tramandaí, enquanto que para Torres apenas cinco (Quadros 1 e 2, respectivamente).

Percebe-se a componente de W pouco frequente em Torres e bastante frequente em Tramandaí. Em Torres, a Serra Geral impede que os ventos vindos de W alcancem a porção costeira; já em Tramandaí, esses ventos possuem pista livre

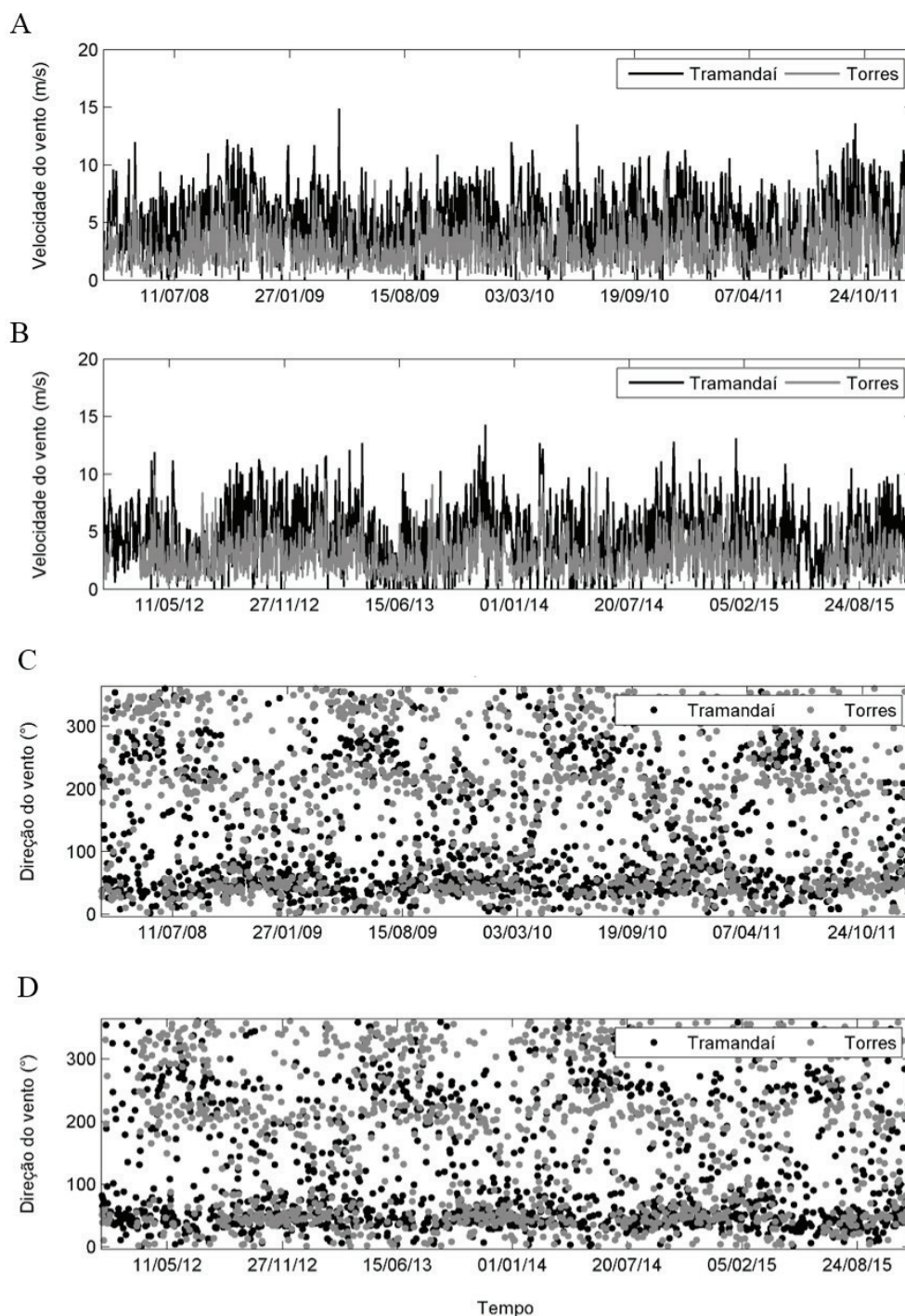


Figura 5. Comparação entre Tramandaí e Torres. A e B) Velocidade (m/s); C e D) rumo (°) do vento para as estações automáticas do INMET - Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) - entre 09/03/2008 e 25/11/2015.
Figure 5. Comparison between Tramandaí and Torres. A and B) Speed (m/s); C and D) direction (°) of wind for INMET automatic stations - Tramandaí (in black) and Torres (in gray) - between 03/03/2008 and 25/11/2015.

Quadro 1. Diagrama de distribuição conjunta de velocidade e rumo dos ventos de Torres (entre 09/03/2008 e 25/11/2015). A escala de cores, do menor para o maior valor, vai do cinza claro ao cinza escuro. Os intervalos das classes de rumo do vento são: N (348,75° a 11,25°), NNE (22,50° a 11,25°), NE (45,00° a 11,25°), ENE (67,50° a 11,25°), E (90,00° a 11,25°), ESE (112,50° a 11,25°), SE (135,00° a 11,25°), SSE (157,50° a 11,25°), S (180,00° a 11,25°), SSW (202,50° a 11,25°), SW (225,00° a 11,25°), WSW (247,50° a 11,25°), W (270,00° a 11,25°), WNW (292,50° a 11,25°), NW (315,00° a 11,25°), NNW (337,50° a 11,25°).

Chart 1. Joint distribution diagram of speed and direction of Torres' winds (between 03/09/2008 and 11/25/2015). The color scale, from lowest to highest value, ranges from light gray to dark gray. The ranges of wind direction classes are: N (348,75° to 11,25°), NNE (22,50° to 11,25°), NE (45,00° to 11,25°), ENE (67,50° to 11,25°), E (90,00° to 11,25°), ESE (112,50° to 11,25°), SE (135,00° to 11,25°), SSE (157,50° to 11,25°), S (180,00° to 11,25°), SSW (202,50° to 11,25°), SW (225,00° to 11,25°), WSW (247,50° to 11,25°), W (270,00° to 11,25°), WNW (292,50° to 11,25°), NW (315,00° to 11,25°), NNW (337,50° to 11,25°).

TORRES	Rumo													Nº de Casos	Frequência (%)			
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W			WNW	NW	NNW
0 - 1	609	411	285	277	309	240	209	183	243	290	395	458	565	812	1248	988	7522	11,12
1 - 2	2729	1389	1120	824	1154	837	580	446	566	595	987	630	612	804	2450	3604	19327	28,58
2 - 3	940	1427	1636	1309	1202	800	638	588	951	903	1112	241	170	151	362	704	13134	19,42
3 - 4	147	567	1708	1710	755	164	224	427	1033	1072	956	132	76	89	89	90	9239	13,66
4 - 5	34	143	1486	1691	418	38	90	184	906	1135	706	78	47	47	48	19	7070	10,45
5 - 6	10	38	1117	1024	185	13	39	71	583	995	431	30	44	27	14	4	4625	6,84
6 - 7	3	4	547	522	79	5	23	31	238	682	197	23	17	22	8	2	2403	3,55
7 - 8	1	2	214	301	37	6	6	6	111	366	89	4	9	11	3	1	1161	1,72
8 - 9	1	1	71	111	5	5	6	6	38	152	28	3	3	2	2	2	427	0,63
9 - 10			21	26	5	1	1	4	13	61	12	1	1	3	2	1	145	0,21
10 - 11			6	14					3	15	2		1				45	0,07
11 - 12			1	4					2	3	1						12	0,02
12 - 13									1	1			2				5	0,01
Nº de Casos	4473	3982	8212	7813	4149	2097	1815	1948	4688	6270	4916	1599	1547	1968	4226	5412		
Frequência (%)	6,61	5,89	12,14	11,55	6,13	3,10	2,68	2,88	6,93	9,27	7,27	2,36	2,29	2,91	6,25	8,00		
Velocidade Média (m/s)	1,71	2,23	3,77	3,99	2,76	2,04	2,36	2,75	3,69	4,32	3,22	1,90	1,72	1,55	1,43	1,52		
Velocidade Máxima (m/s)	7,90	8,10	11,20	11,90	9,60	6,50	9,40	13,00	12,30	12,30	11,20	8,40	12,90	9,20	9,80	7,50		

Quadro 2. Diagrama de distribuição conjunta de velocidade e rumo dos ventos de Tramandaí (entre 09/03/2008 e 25/11/2015). A escala de cores, do menor para o maior valor, vai do cinza claro ao cinza escuro. Os intervalos das classes de rumo do vento são: N (348,75° a 11,25°), NNE (22,50° a 11,25°), NE (45,00° a 11,25°), ENE (67,50° a 11,25°), E (90,00° a 11,25°), ESE (112,50° a 11,25°), SE (135,00° a 11,25°), SSE (157,50° a 11,25°), S (180,00° a 11,25°), SSW (202,50° a 11,25°), SW (225,00° a 11,25°), WSW (247,50° a 11,25°), W (270,00° a 11,25°), WNW (292,50° a 11,25°), NW (315,00° a 11,25°), NNW (337,50° a 11,25°).

Chart 2. Joint distribution diagram of speed and direction of the Tramandaí winds (between 03/09/2008 and 11/25/2015). The color scale, from lowest to highest value, ranges from light gray to dark gray. The ranges of wind direction classes are: N (348,75° to 11,25°), NNE (22,50° to 11,25°), NE (45,00° to 11,25°), ENE (67,50° to 11,25°), E (90,00° to 11,25°), ESE (112,50° to 11,25°), SE (135,00° to 11,25°), SSE (157,50° to 11,25°), S (180,00° to 11,25°), SSW (202,50° to 11,25°), SW (225,00° to 11,25°), WSW (247,50° to 11,25°), W (270,00° to 11,25°), WNW (292,50° to 11,25°), NW (315,00° to 11,25°), NNW (337,50° to 11,25°).

TRAMANDAÍ	Rumo																Nº de Casos	Frequência (%)
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		
0 - 1	366	281	169	100	95	87	101	134	108	92	164	252	472	322	278	269	3290	4,86
1 - 2	647	681	479	303	263	239	297	354	191	164	318	754	1244	638	381	436	7389	10,93
2 - 3	308	1035	1168	624	479	339	431	564	309	273	583	1172	1384	262	146	184	9261	13,69
3 - 4	116	1042	1990	865	568	468	506	460	379	327	649	1015	1015	180	54	36	9670	14,30
4 - 5	41	979	2566	1030	586	441	351	283	391	269	521	709	767	106	17	17	9074	13,42
5 - 6	24	756	2740	1027	572	370	249	152	290	197	355	449	554	64	5	2	7806	11,54
6 - 7	8	524	2393	1066	499	296	194	68	220	122	220	287	411	33	5	1	6347	9,38
7 - 8	5	333	1945	932	403	206	89	29	147	55	85	175	215	23	2	2	4646	6,87
8 - 9	188	1360	1360	693	320	144	46	17	84	27	31	85	123	18	3	1	3140	4,64
9 - 10	59	836	470	223	72	25	7	7	31	14	21	32	77	9	1	1	1877	2,78
10 - 11	18	383	256	113	39	18	5	5	9	2	6	6	28	13	1	1	896	1,32
11 - 12	5	151	121	41	16	10	6	6	7	5	1	2	16	4	1	1	385	0,57
12 - 13	3	48	40	9	8	7	4	4	1	1	1	1	7	1	1	1	129	0,19
13 - 14	1	12	11	3	5	5	2	2	4	1	1	1	2	3	3	3	49	0,07
14 - 15																	23	0,03
15 - 16																	6	0,01
16 - 17																	3	0,00
17 - 18																	1	0,00
18 - 19																	1	0,00
19 - 20																	2	0,00
Nº de Casos	1515	5905	16243	7552	4181	2732	2333	2086	2172	1548	2956	4938	6318	1676	891	949		
Frequência (%)	2,24	8,73	24,02	11,17	6,18	4,04	3,45	3,08	3,21	2,29	4,37	7,30	9,34	2,48	1,32	1,40		
Velocidade Média (m/s)	1,82	4,15	5,77	5,92	5,38	4,80	4,05	3,28	4,43	3,96	3,82	3,61	3,55	2,46	1,63	1,60		
Velocidade Máxima (m/s)	7,80	13,80	15,90	20,00	16,40	14,70	18,80	14,60	15,60	14,20	13,10	11,40	14,70	13,70	8,50	9,90		

para a costa. Essa interferência da Serra Geral também pode ser observada quanto aos ventos de N, NW e NNW: ao norte de Torres, a serra se afasta da costa, permitindo a passagem dos ventos vindos desses rumos, o que não ocorre em Tramandaí, pois ao norte dessa localidade, a serra se aproxima da costa, barrando os ventos desses rumos (Fig. 6).

Nas análises das séries por horário, a velocidade do vento de Tramandaí foi superior a Torres para todas as horas. Do meio dia às 21:00, a diferença entre as velocidades diminuiu, pois Torres apresentou acréscimo de velocidade nesse intervalo de horas, e os rumos se concentram em 60 e 200°. Já para os demais horários, os rumos se concentram entre 0° e 50° e entre 200° e 360°. Portanto, os ventos NE e E parecem ter predominância entre meio dia e 21:00, já os de NNE e ENE de 22:00 a 11:00. Nas figuras 7 e 8 estão apresentados os gráficos para as 08:00 e 17:00, respectivamente, exemplificando os dois padrões citados acima.

Quanto à precipitação, Tramandaí apre-

sentou menores valores. Torres apresentou o total de 12.708 mm de chuva ao longo de todo o período (média anual de 1.815 mm), enquanto Tramandaí apresentou 11.991 mm (média anual de 1.713 mm). Portanto em Torres houve 71,8 cm a mais em aproximadamente sete anos, equivalendo a 10,3 cm a mais que Tramandaí por ano. Essa diferença nas médias anuais das duas estações representa 5,65% a mais de precipitação (em mm) em Torres. Em 30,8% do tempo (867 dias), precipitou mais em Torres; em 28,0% do tempo (789 dias), choveu mais em Tramandaí; já em 41,2% (1.162 dias) os valores para ambas as localidades foram iguais ou não houve precipitação (Fig. 9). A diferença entre as séries foi obtida numericamente por meio do RMSE, e foi de 9,91 mm.

Os potenciais de transporte de areia calculados para as duas estações, relativos à soma dos valores obtidos para cada rumo de vento, no período de 09/03/2008 a 25/11/2015, foram 50,85 UV para Tramandaí e 4,65 UV para Torres.

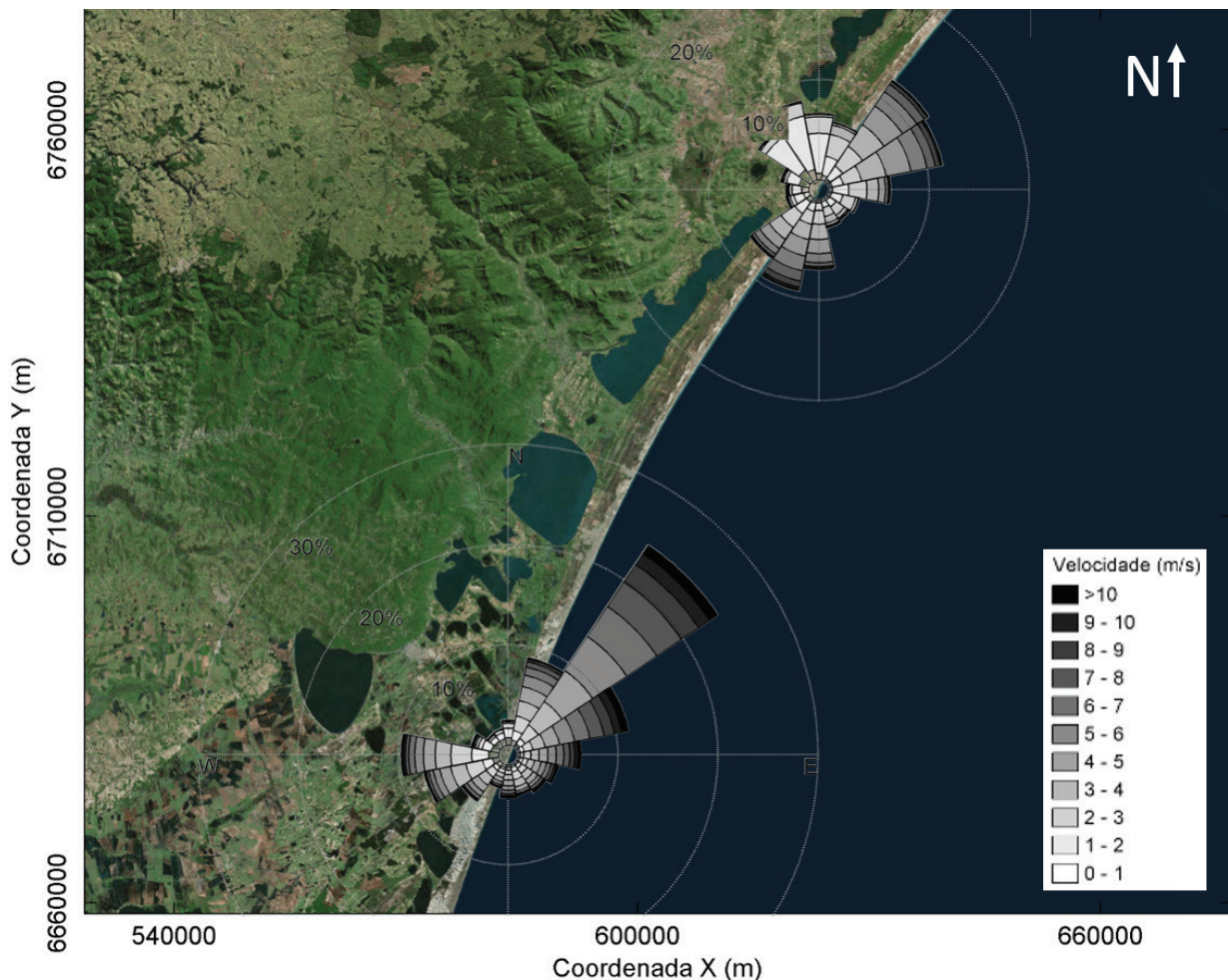


Figura 6. Rosa de ventos das estações Torres e Tramandaí para o período entre 09/03/2008 e 25/11/2015.
 Figure 6. Wind rose of Torres and Tramandaí stations for the period between 09/03/2008 and 11/25/2015.

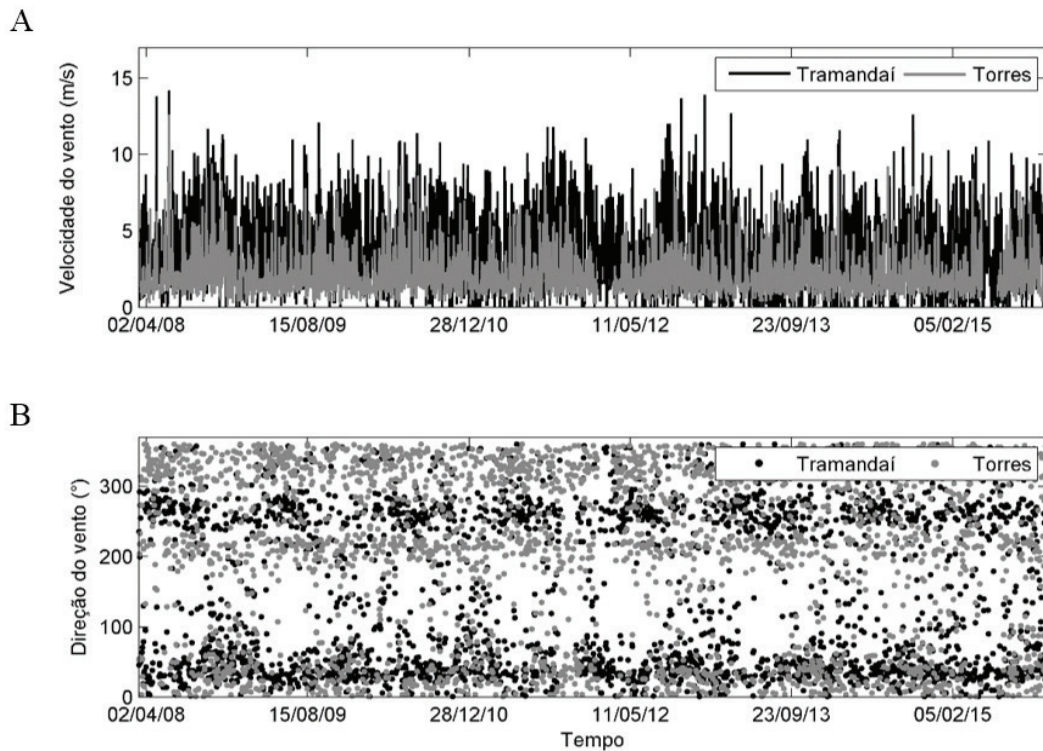


Figura 7. Comparação entre Tramandaí e Torres no horário 08:00. A) Velocidade (m/s); B) Rumo (°) do vento para as estações automáticas do INMET – Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) – entre 09/03/2008 e 25/11/2015 para o horário 08:00. *Figure 7. Comparison between Tramandaí and Torres at 08:00 h. A) Speed (m/s); B) Direction (°) of wind for INMET automatic stations - Tramandaí (in black) and Torres (in gray) - between 03/09/2008 and 25/11/2015 to 08:00 h.*

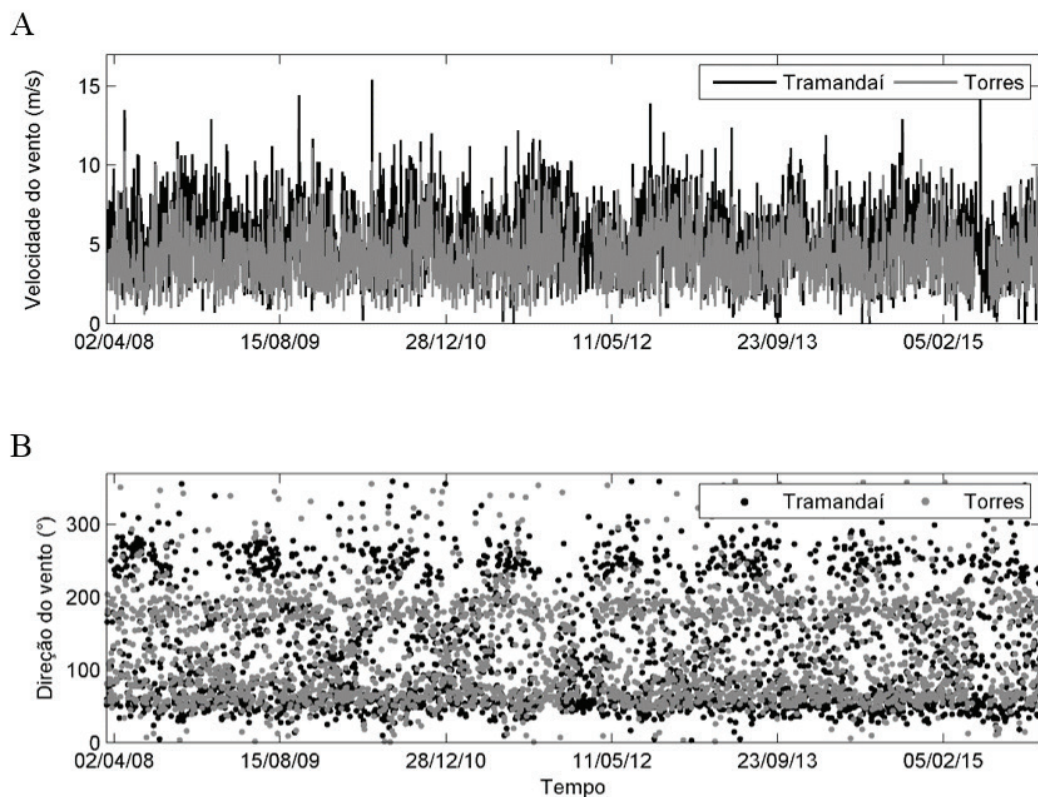


Figura 8. Comparação entre Tramandaí e Torres no horário 17:00. A) Velocidade (m/s); B) Rumo (°) do vento para as estações automáticas do INMET – Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) – entre 09/03/2008 e 25/11/2015 para o horário 17:00. *Figure 8. Comparison between Tramandaí and Torres at 17:00 h. A) Speed (m/s) and B) direction (°) of the wind for the automatic stations of INMET - Tramandaí (in black) and Torres (in gray) - between 03/09/2008 and 25/11/2015 to 17:00 clock.*

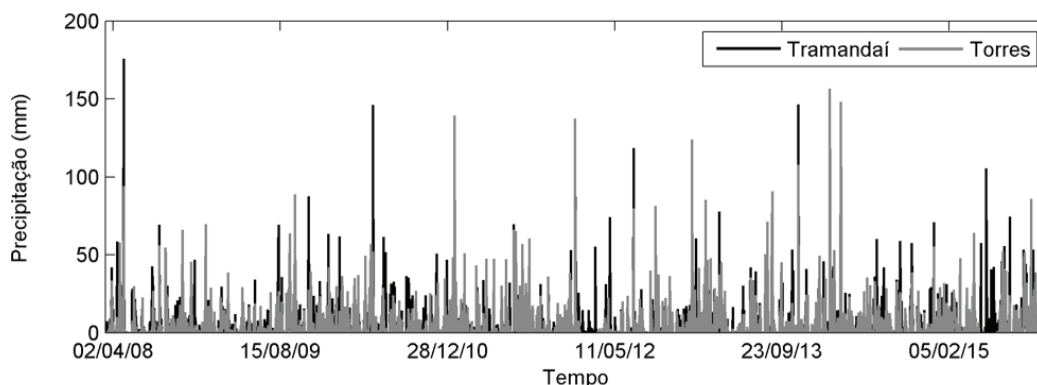


Figura 9. Precipitação (mm) para as estações automáticas do INMET - Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) - entre 09/03/2008 e 25/11/2015.

Figure 9. Precipitation (mm) for the automatic stations of INMET - Tramandaí (in black) and Torres (in gray) - between 03/09/2008 and 11/25/2015.

3.3 Dados da Estação Meteorológica de Imbé, dados da Estação Convencional de Torres e dados da Lagoa de Itapeva

Imbé apresentou velocidades semelhantes a Itapeva ao longo da maior parte do tempo,

porém ocorreram alguns picos de velocidade em Imbé (Fig. 10A). Como não se observou um padrão constante de dominância de uma estação em relação a outra, realizou-se um filtro para os rumos de 22,5° a 90°, isolando, portanto, os ventos de interesse desse estudo (NNE, NE, ENE e E). Ao filtrar a série, percebe-se que dois desses picos referem-se

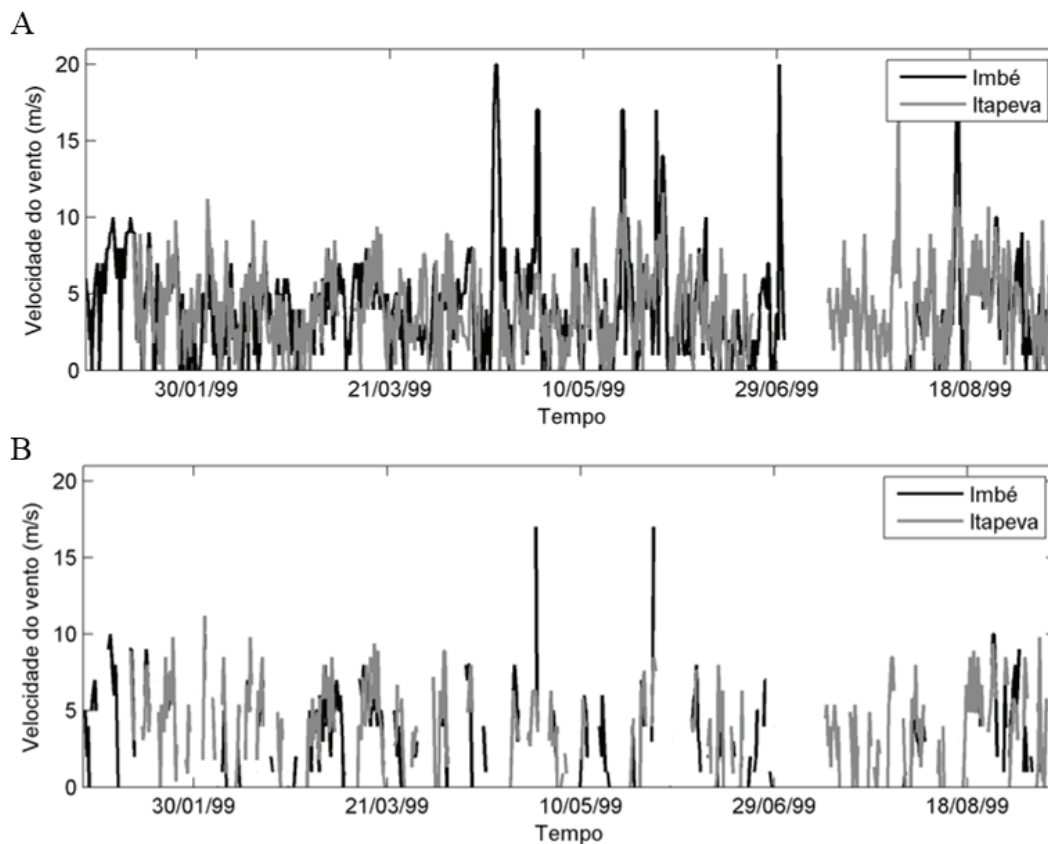


Figura 10. Velocidade do vento (m/s) para as séries obtidas dos dados da Superintendência de Portos do RS para Imbé (em preto) e dos dados da Lagoa de Itapeva (em cinza), entre 01/01/1999 e 09/09/1999, nos horários 09:00, 15:00 e 21:00. A) Séries brutas; B) Séries referentes apenas às direções de NNE a E (de 22,5° a 90°).

Figure 10. Wind speed (m/s) for the series obtained from the Superintendency of Ports of RS for Imbé (in black) and from the data of the Lagoa de Itapeva (in gray), between January 1, 09/09/1999, at 09:00, 15:00 and 21:00 hours. A) Gross series; B) Series referring only NNE to E directions (22.5° to 90°).

a esses ventos, com mais de 15 m/s (Fig. 10B).

Itapeva e Torres apresentaram padrão similar de velocidade do vento, porém há maiores velocidades em Itapeva (Fig. 11A). Considerando apenas os rumos de 22,5° a 90°, é possível notar que nenhuma das localidades se destacou com picos de velocidade (Fig. 11B).

3.4 Medições simultâneas de campo a norte e a sul de Xangri-lá

Os resultados das medições de campo podem ser observados nas figuras 12 e 13 (a localização dos pontos está na fig. 2). As duas estações apresentaram comportamento semelhante em termos de velocidade do vento, para as duas campanhas. O valor de RMSE calculado para as duas séries de velocidade foi 1,19 m/s na primeira atividade de campo (C1) e 0,43 m/s na segunda (C2), havendo, portanto, maiores diferenças entre as séries da primeira campanha. Essa relação também foi observada para o rumo do vento.

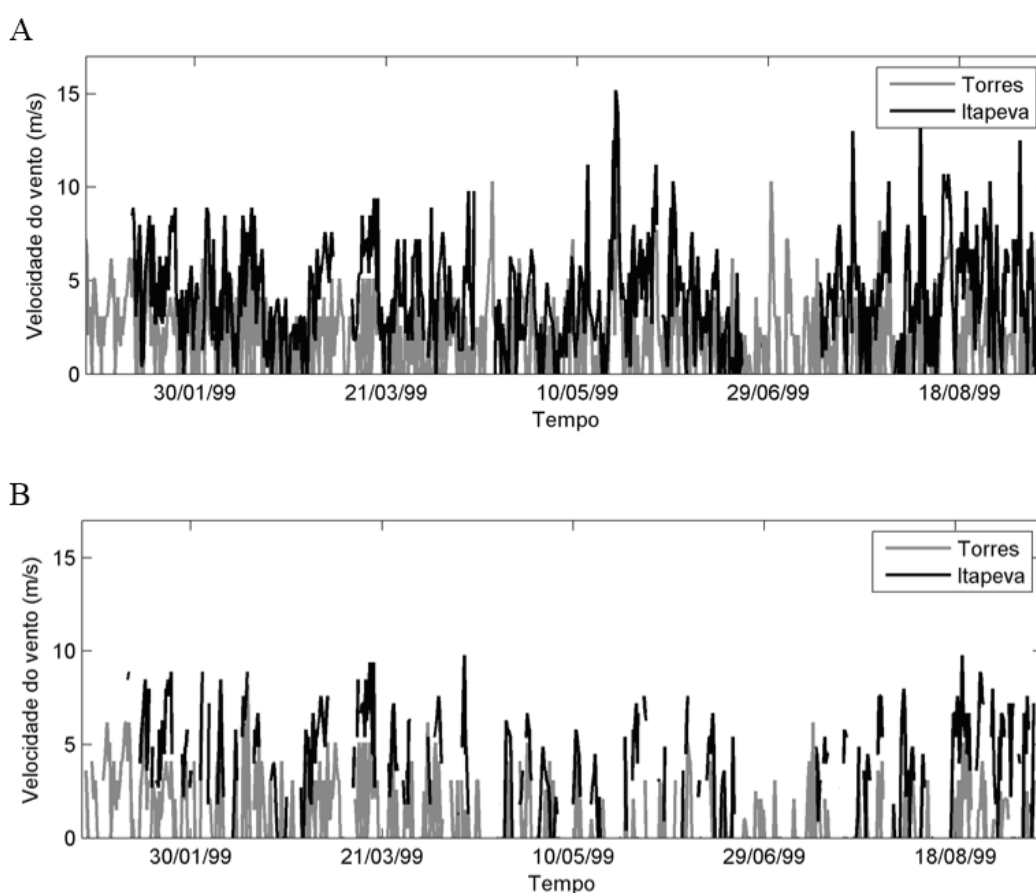


Figura 11. Velocidade do vento (m/s) para as séries obtidas dos dados da Estação Convencional do INMET para Torres (em cinza) e dos dados da Lagoa de Itapeva (em preto), entre 01/01/1999 e 09/09/1999, nos horários 00:00, 12:00 e 18:00. A) Séries brutas; B) Séries referentes apenas aos rumos de NNE a E (de 22,5° a 90°).

Figure 11. Wind speed (m/s) for the series obtained from the INMET Conventional Station data for Torres (in gray) and from the Itapeva Lagoon data (in black), between 01/01/1999 and 09/09/1999, at 00:00, 12:00 and 18:00 hours. A) Gross series; B) Series referring only NNE to E directions (22.5° to 90°).

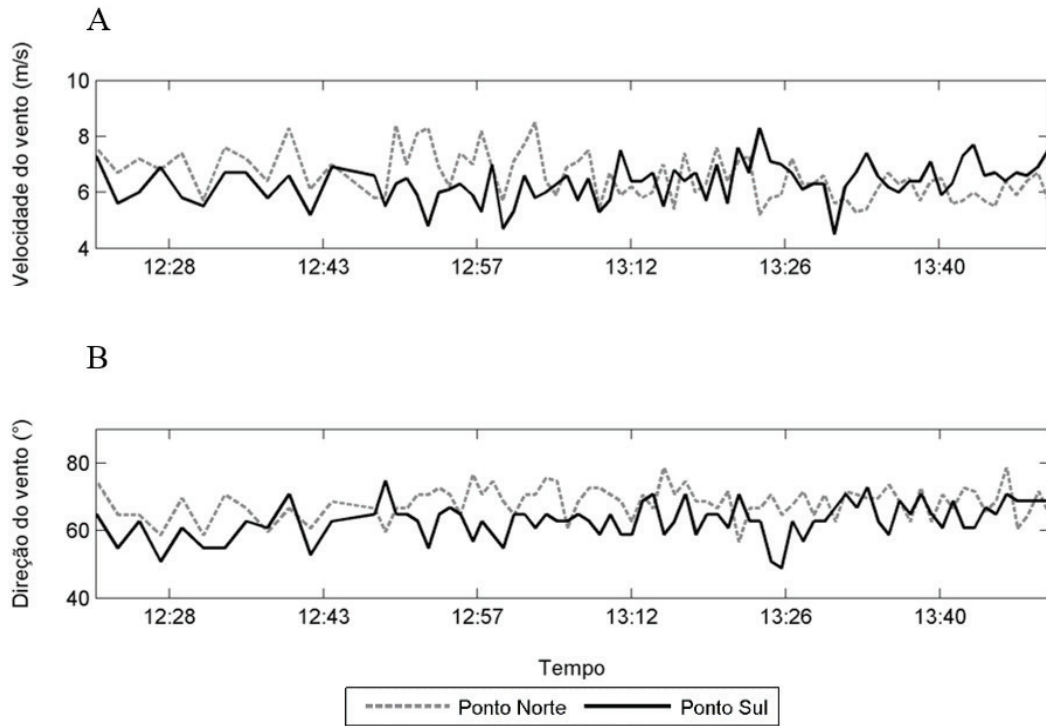


Figura 12. Comparação entre o Ponto Norte e o Ponto Sul na C1. A) Velocidade (m/s); B) Rumo do vento para os dados medidos na C1, em 28/10/2015, para os pontos Norte e Sul.
Figure 12. Comparison between the North Point and the South Point in C1. A) Speed (m/s); B) Wind direction for the data measured at C1 on 10/28/2015, for North and South points.

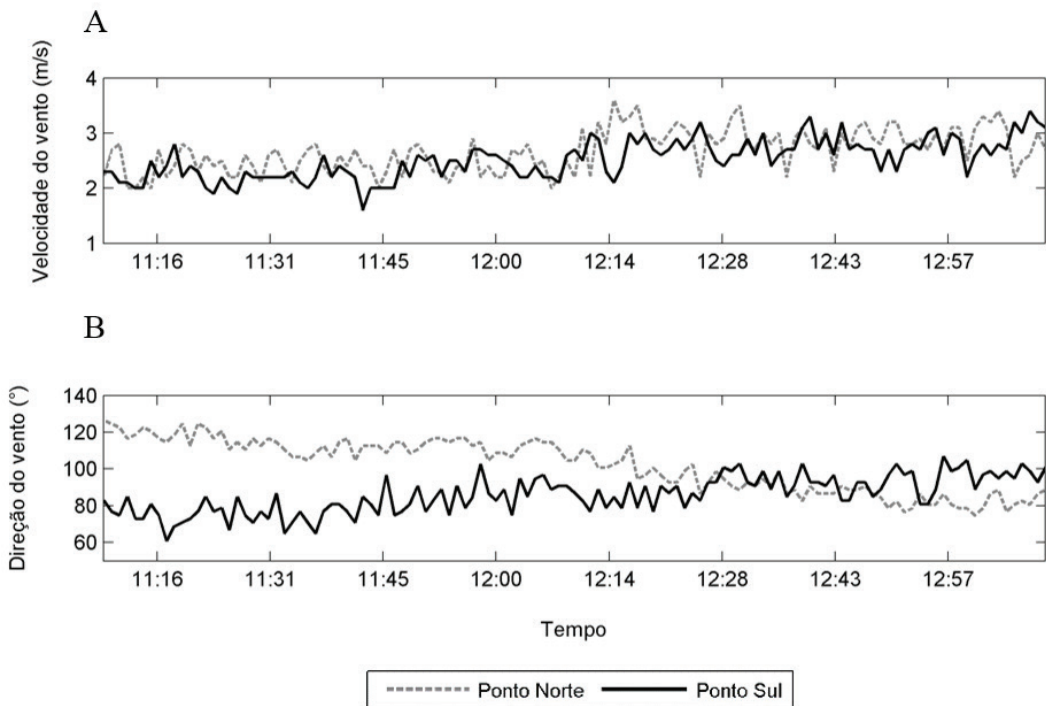


Figura 13. Comparação entre o Ponto Norte e o Ponto Sul na C2. A) Velocidade (m/s) e B) rumo do vento para os dados medidos na C2, em 20/01/2016, para os pontos Norte Sul.
Figure 13. Comparison between the North Point and the South Point in C2. A) Speed (m/s) and B) wind direction for the data measured at C2 on 20/01/2016, for North and South points.

4 Discussão

4.1 Dados das Estações Convencional e Automática de Torres

Entre as estações convencional e automática de Torres, apesar de apresentarem localização próxima, houve diferenças entre as séries de dados (valores de correlação abaixo de 0,95, sendo 0,79 para velocidade e 0,59 para rumo do vento), possivelmente associadas à diferente altura das estações, método de obtenção e armazenamento dos dados. Trabalhos anteriores (Sentelhas *et al.*, 1997; Teixeira *et al.*, 2003; Rubert *et al.*, 2006) também identificaram diferenças entre os elementos das estações automáticas e convencionais.

Portanto, devido à baixa correlação e precisão entre as duas estações meteorológicas, utilizou-se apenas uma das estações para as análises nesse trabalho – a estação meteorológica automática de Torres – uma vez que, por utilizar mesmo método de aquisição de dados, pode ser melhor comparada à estação meteorológica automática de Tramandaí.

4.2 Dados das Estações Automáticas de Torres e Tramandaí

As menores velocidades de vento para Torres, em comparação com Tramandaí, devem-se à maior proximidade e influência da Serra Geral. Para tentar explicar essa influência, é possível considerar a Serra Geral como uma grande estrutura contínua e aplicar os princípios da NBR-6123, intitulada como “Forças devidas ao vento em edificações” (ABNT, 1988). Por meio dessa, estima-se a pressão dinâmica (ou carga de vento) exercida pelo vento sobre edificações civis (no caso desse trabalho, sobre a estrutura contínua da Serra Geral), e conseqüentemente sobre o meio onde sopra. Essa carga de vento é diretamente proporcional à velocidade do vento que atua sobre determinada parte da estrutura, a qual depende, entre outros fatores, da topografia e da rugosidade do terreno. Quanto maior a pressão dinâmica, portanto, maior a força de arrasto no rumo do vento, ou seja, maior a força do vento para mobilização de partículas.

Por exemplo, em termos de topografia, ter-

renos planos apresentam um valor de índice maior que vales profundos, permitindo uma carga maior de vento; em termos de rugosidade, superfícies lisas de grandes dimensões (com mais de 5 km de extensão) medidas no rumo e sentido do vento incidente apresentam maiores valores que terrenos cobertos por obstáculos grandes e altos (com altura média de 25 m ou mais), gerando maiores cargas de vento (ABNT, 1988).

Dessa forma, a proximidade das escarpas da Serra Geral em Torres pode gerar uma redução da carga de vento em relação a Tramandaí, onde a Serra Geral passa a se distanciar da costa (essa distância é de aproximadamente 4 km em Torres e de 20 km em Tramandaí). Esse princípio também pode ser utilizado para tentar explicar o comportamento diferenciado da formação da fase moderna do campo de dunas transgressivo presente sobre a barreira holocênica no litoral norte do RS. A norte de Xangri-lá, onde a Serra Geral ainda está próxima à costa, pode haver uma perda de carga de vento devido ao atrito com esse obstáculo. Conseqüentemente, haveria uma perda de energia para o transporte dos sedimentos. Já ao sul de Xangri-lá, onde a Serra Geral está mais interiorizada, haveria diminuição da perda de carga de vento, permitindo maior transporte sedimentar e conseqüente avanço do campo de dunas. Essas hipóteses poderão ser testadas em trabalhos posteriores, utilizando simulações com túneis de vento, por exemplo, a fim de avaliar se há alteração da carga do vento devido ao obstáculo Serra Geral. Bigarella (1975), ao estudar os campos de dunas transgressivos da Ilha de Santa Catarina, também defendeu que obstáculos topográficos locais são fortemente responsáveis por mudanças no regime de ventos e no sentido de migração de alguns desses campos.

Tomazelli (1993) analisou o regime de ventos regional com base nos dados de duas estações meteorológicas: a estação de Imbé, situada próximo ao campo de dunas de Cidreira, e a estação de Torres, posicionada próximo ao campo de dunas de Itapeva. A série de dados apresenta 13 anos de duração (de 01/1970 a 12/1982). Nas duas estações meteorológicas, o vento mais frequente foi de NE, assim como encontrado nesse estudo. Segundo aquele autor, embora exista uma boa consistência nos registros das duas estações (Imbé e Torres), observam-se algumas diferenças

significativas que podem ser atribuídas principalmente a efeitos topográficos locais e a posição das estações com relação ao Planalto da Serra Geral; ou seja, sua imponente topografia exerce influência no padrão de circulação dos ventos.

Segundo Martinho *et al.* (2010), os ventos incidentes no litoral norte são de forma geral fracos, gerando baixos valores de DP. Os ventos de NE, que são os mais fortes, se deslocam paralelos à costa, tendo sua pista de vento limitada devido às escarpas da Serra Geral. Já no litoral médio, os ventos são mais fortes e apresentam DPs maiores, alcançando a costa de forma oblíqua e possuindo uma pista de vento muito maior devido à topografia suave da planície costeira. Martinho *et al.* (2008, 2010) também observaram que o DP em Mostardas (ponto estudado mais ao sul do litoral do RS) é o mais forte dentre os avaliados, seguido pelo DP em Imbé e, por fim, em Torres, ou seja, há uma diminuição em direção ao norte. Esse mesmo padrão foi observado nesse trabalho: maiores valores de DP para Tramandaí em relação à Torres.

Considerando apenas as classes acima de 5,6 m/s para os cálculos de DP, uma vez que abaixo desse valor a velocidade do vento é menor que a tensão de cisalhamento do vento para o tamanho de grão médio de 2,5 ϕ (0,177 mm), 65,3% dos dados de Tramandaí foram desconsiderados; e 93,1% dos dados de Torres, o que resulta em um valor reduzido de DP.

Os valores de DP, referentes à soma dos potenciais de deriva para cada rumo de vento, indicam que Tramandaí apresenta potencial de transporte de areia superior a Torres (50,85 UV para o primeiro e 4,65 UV para segundo) e, portanto, há favorecimento da migração das dunas nas proximidades de Tramandaí, provavelmente com influência até Xangri-lá. Essa migração também é favorecida em locais com menor precipitação, uma vez que menor umidade gera menor coesão dos grãos arenosos e menor propensão ao desenvolvimento de vegetação fixadora de dunas. Ou seja, por apresentar maior DP e menor precipitação, em Tramandaí há o favorecimento do desenvolvimento de campos de dunas transgressivos.

Tomazelli (1993) também calculou os DP pelo método de Fryberger & Dean (1979), porém para as localidades de Torres, Imbé e Rio Grande durante o período de 1970 e 1982. Os valores en-

contrados foram superiores aos encontrados nesse trabalho: 1.441,7 UV para Imbé, localizado próximo a Tramandaí, e 800,5 UV para Torres. Essas diferentes magnitudes encontradas nos dois trabalhos podem estar relacionadas ao uso de séries temporais de intervalos e bases diferentes.

É importante salientar que os valores encontrados de DP não são, necessariamente, iguais à deriva real, visto que as características locais inerentes à superfície do terreno (variações topográficas da superfície, grau de umidade, tamanho dos grãos e presença de vegetação) sobre o qual o vento sopra podem afetar a quantidade de areia efetivamente transportada. Portanto, os valores de DP devem ser interpretados como representativos do índice da energia de vento disponível na região de interesse, cuja eficiência no transporte efetivo da areia vai depender das características locais da superfície sobre a qual o vento atua (Fryberger & Dean, 1979; Tomazelli, 1993).

4.3 Dados da Estação Meteorológica de Imbé, dados da Estação Convencional de Torres e dados da Lagoa de Itapeva

Ao considerar apenas as direções 22,5 a 90° das séries de Imbé e Itapeva, percebe-se que há dois picos de velocidade (acima de 15 m/s) apenas em Imbé, indicando que há diferenças de velocidade nessas localidades quando ocorrem os ventos de NNE a E, chegando com maior velocidade, portanto, em Imbé (Fig. 10B). Já para Itapeva e Torres, é possível notar que nenhuma das localidades se destacou com picos de velocidade (Fig. 11B), indicando que os ventos de NNE a E alcançam ambas as localidades de forma similar, possivelmente associada à proximidade geográfica delas e, consequentemente, características em comum, como a presença da Serra Geral imediatamente a oeste.

4.4 Medições de campo a norte e a sul de Xangri-lá

A maior diferença entre as duas séries do C1 em relação a C2 pode estar relacionada a escolha dos pontos de medição: na C1, o ponto mais ao sul (em Tramandaí) apresentava edificações em suas proximidades (edifícios de 3 a 4 andares, ou seja, cerca de 9 a 12 m de altura, há uma distância aproximada de 80 m do ponto de coleta), as quais

podem ter interferido na velocidade e rumo do vento, enquanto o ponto mais ao norte (em Capão da Canoa) não apresentava tais obstáculos. Segundo Lopes (1992), ao entrar em contato com a superfície de qualquer objeto, o vento tende a forçá-lo ao movimento juntamente com ele, e reciprocamente, este corpo com o qual o vento contata, também introduz alterações nas condições do escoamento, tornando-as diferentes das verificadas inicialmente. Então, para a C2, foram escolhidos dois pontos de medição com características do entorno mais semelhantes, sem edificações expressivas, resultando em séries com comportamento mais similar.

Outra possível explicação para a maior diferença entre as duas séries do C1 em relação a C2 pode estar relacionada ao fato de terem sido realizadas em estações do ano diferentes: C1 foi realizada na primavera e C2 no verão. Silva *et al.* (1997), ao analisar uma série de mais de 40 anos de dados de velocidade de vento de Pelotas (RS), constatou que a estação do ano que apresentou ventos mais intensos foi a primavera, resultado encontrado também por Munhoz & Garcia (2008) ao estudar os ventos de Ituverava (SP). Dessa forma, as séries medidas em C1 podem ter apresentado maiores diferenças entre si devido ao fato de ter ocorrido durante a primavera e conseqüentemente ter apresentado ventos mais intensos que em C2, e assim, as diferenças entre as localidades foram mais expressivas.

O regime de vento obtido em medições simultâneas de curta duração (2 h) nas proximidades de Capão da Canoa e Tramandaí se apresentou semelhante, especialmente em termos de velocidade, com valor de RMSE calculado de 1,19 m/s em C1 e 0,43 m/s em C2, ao comparar as duas localidades. Como observado nas análises das séries do INMET para Torres e Tramandaí, a diferença entre as séries de velocidades diminuiu no período entre 12:00 e 21:00, quando comparada aos outros horários. As medições de campo foram realizadas entre 12:20 e 13:50 na C1 e entre 11:10 e 13:10 na C2, ou seja, praticamente inseridas nesse período em que as diferenças entre as estações foram menores. Portanto, essa diferença reduzida observada entre os pontos de medição pode estar associada ao horário em que as medições foram realizadas. Por motivos de logística, necessidade do deslocamento até os locais de medições e da

instalação dos materiais, não foi possível realizar novas medições iniciando no período da manhã.

Outra possível explicação para não terem sido observadas velocidades maiores no ponto a sul de Xangri-lá em relação ao ponto mais ao norte seria a curta duração das medições, com séries de até duas horas, podendo as medições terem coincido com intervalos de tempo em que a velocidade do vento nas duas localidades se igualou. Esses curtos intervalos de horas, com valores mais semelhantes entre as estações, tendem a ser menos percebidos nas séries históricas do INMET, uma vez que essas têm uma escala temporal muito maior, de vários anos (neste trabalho, por exemplo, as séries são de 2008 a 2015).

5 Conclusões

As estações meteorológicas convencional e automática de Torres, apesar de possuírem localização próxima, apresentaram diferenças significativas entre seus dados de velocidade e rumo do vento. Na comparação entre os registros automáticos para o período entre 09/03/2008 e 25/11/2015, Tramandaí apresentou maiores velocidades de vento e menores de precipitação em relação a Torres. A diferença entre as séries de velocidades diminuiu no período entre 12:00 e 21:00, podendo explicar a semelhança dos resultados dos pontos Norte e Sul das campanhas C1 e C2, que foram levantados próximo entre 11:10 e 13:50. Medições de campo mais longas e em períodos entre 21:00 e 12:00 podem apresentar maiores diferenças entre os pontos de campo. Ainda comparando os registros automáticos de Tramandaí e Torres, o vento mais frequente foi de NE, ocorrendo em 12,14% do tempo em Torres e 24,02% em Tramandaí. Anualmente, em Torres, choveu aproximadamente 10,3 cm a mais que Tramandaí.

Há a possibilidade de que a proximidade das escarpas da Serra Geral em Torres gere redução da carga de vento, que é diretamente proporcional à velocidade do vento, em relação a Tramandaí, onde a Serra Geral se distancia da costa. A norte de Xangri-lá, onde a Serra Geral ainda está próxima à costa, pode haver perda de carga de vento (percebida pela redução da velocidade) devido ao atrito com esse obstáculo. Conseqüentemente, haveria perda de energia para o transporte dos

sedimentos. Já ao sul de Xangri-lá, onde a Serra Geral ocorre interiorizada, pode haver diminuição da perda de carga de vento (pois as velocidades do vento são maiores), permitindo maior transporte sedimentar e conseqüente avanço do campo de dunas. Essas hipóteses poderão ser testadas, utilizando simulações com túneis de vento, por exemplo.

Devido a maior velocidade dos ventos em Tramandaí, o potencial de transporte de areia (DP) nessa localidade foi superior a Torres, indicando o favorecimento da migração das dunas nas proximidades de Tramandaí. O comportamento desigual da migração das dunas pode estar relacionado a maior velocidade e frequência dos ventos NNE, NE, ENE e E em Tramandaí (ou seja, ao sul de Xangri-lá). A menor precipitação também favorece transporte de areia mais eficiente ao sul de Xangri-lá.

Ficam assim testadas e confirmadas as hipóteses que motivaram a realização deste trabalho: a inexistência das terras altas (ou da escarpa) ao sul da cidade de Osório criou condições para uma livre passagem do fluxo de ar relacionado aos ventos NNE, NE, ENE e E, devido à ausência de barreiras físicas naturais, favorecendo assim o maior avanço do campo de dunas transgressivo ao sul de Xangri-lá. A precipitação e a velocidade do vento apresentam gradientes no litoral norte do RS, sendo observadas uma diminuição na precipitação e aumento na velocidade do vento de Torres para Tramandaí. A presença da escarpa da Serra Geral favorece a precipitação orográfica, aumentando a umidade das areias e conseqüentemente diminuindo sua mobilidade. Essa mobilidade tende a ser diminuída quando na presença de vegetação, cujo desenvolvimento é favorecido pela maior precipitação. Dessa forma, os campos de dunas da porção que está sob influência da Serra Geral (a norte de Xangri-lá) tendem a apresentar menor deslocamento sobre a barreira holocênica em comparação aos campos de dunas a sul dessa localidade.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de suas Bolsas de Mestrado e de Produtividade em Pesquisa, respectivamente.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1988. NBR-6123 - *Forças Devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, ABNT, 66p.
- Balduino Rambo, S.J. 1956. *A Fisionomia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Selbach, 510p.
- Bigarella, J.J. 1975. Lagoa dune fields (State of Santa Catarina, Brazil), a model of eolian and pluvial activity. *Boletim Paranaense de Geociências*, 33: 133-167.
- Calliari, L.R., Pereira, P.S., de Oliveira, A.O. & Figueiredo, S.A. 2005. Variabilidade das Dunas Frontais no Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. *Gravel*, 3:15-30.
- Cardoso, L.S., Silveira, A.L.L. & Motta Marques, D.M.L. 2003. A ação do vento como gestor da hidrodinâmica na lagoa Itapeva (Litoral Norte do Rio Grande do Sul-Brasil). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(3): 5-15.
- Dillenburg, S.R., Roy, P.S., Cowell, P.J. & Tomazelli, L.J. 2000. Influence of Antecedent Topography on Coastal Evolution as Tested by the Shoreface Translation Barrier Model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16(1): 71-81.
- Dillenburg, S.R., Tabajara, L.L., Dillenburg, L.R. & Tomazelli, L.J. 2001. Fatores controladores da formação das dunas frontais e dos campos de dunas transgressivas do Litoral Norte do Rio Grande do Sul: uma introdução ao problema. In: CONGRESSO DA ABEQUA: Global Changes and the Quaternary, 8., 2001, Imbé. *Anais... Imbé, ABEQUA*, p. 145-147.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P. & Silva, D.B. 2006. Stratigraphy and evolution of a prograded transgressive dunefield barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39: 132-135.
- Figueiredo, S.A. 2005. *Sedimentologia e suas implicações na morfodinâmica das praias adjacentes às desembocaduras lagunares e fluviais da costa do Rio Grande do Sul*. Rio Grande, 177p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.
- Fryberger, S.G. & Dean, G. 1979. Dune forms and wind regime. In: Mckee, E.D. (Ed.). *A Study of*

- Global Sand Seas*, Washington, U.S. Government Printing Office, p. 137-169.
- Grimm, A.M., Ferraz, S.E.T. & Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11(11): 2863-2880.
- Hasenack, H. & Ferraro, L.W. 1989. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. *Pesquisas*, 22: 53-70.
- Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N., Esteves, L.S., Gruber, N.L.S., Toldo Junior, E.E., Tabajara, L.L.C. de A. & Clerot, L.C.P. 2005. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(3): 493-508.
- Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P., Tomazelli, L.J. & Ayup-Zouain, R.N. 2007. Morphology of the Itapeva to Tramandai transgressive dunefield barrier system and mid- to late Holocene sea level change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(3): 407-414.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2011a. *Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET*. Brasília, INMET, 11p. (Nota Técnica n. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET).
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2011b. Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 13 jan. 2016.
- Lima, S.F., Almeida, L.E.S.B. & Toldo Junior, E.E. 2001. Estimativa da Capacidade do Transporte Longitudinal de Sedimentos a partir de Dados de Ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28(2): 99-107.
- Lopes, A.V. 1992. *A ação do vento e a resposta dinâmica de edifícios altos*. Porto, 247p. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
- Martinho, C.T. 2008. *Morfodinâmica e evolução de campos de dunas transgressivos quaternários do litoral do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 241p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Martinho, C.T., Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. 2008. Mid to late Holocene evolution of transgressive dunefields from Rio Grande do Sul coast, southern Brazil. *Marine Geology*, 256: 49-64.
- Martinho, C.T., Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. 2009. Wave Energy and Longshore Sediment Transport Gradients Controlling Barrier Evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 25(2): 285-293.
- Martinho, C.T., Hesp, P.A. & Dillenburg, S.R. 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, 117: 14-32.
- Munhoz, F.C. & Garcia, A. 2008. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava-SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(1): 30-34.
- Rubert, J., dos Santos, M.B. & Krusche, N. 2006. Comparação entre medidas de velocidade do vento em Rio Grande, RS, de 2001 a 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis, *Anais...* Florianópolis, XIV CBMET, p. 3730.
- SEMC. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. 2002. Atlas Eólico: Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br>> Acesso em: 20 fev. 2016.
- Sentelhas, P.C., Moraes, S.O., Piedade, S.M.S., Pereira, A.R., Angelocci, L.R. & Marin, F.R. 1997. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(2): 215-221.
- Silva, J.B., Zanusso, J.T., Silveira, D.L.M., Schons, R.L. & Larroza, E.G. 1997. Estudo da velocidade e direção dos ventos em Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(2): 227-235.
- SSGP. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. 2016. Hipsometria e unidades geomorfológicas. Disponível em: <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br>> Acesso em: 01 mar. 2016.
- Teixeira, A.H.C., Bassoi, L.H., Reis, V.C.S, Silva, T.G.F., Ferreira, M.N.L. & Maia, J.L.T. 2003. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações agrometeorológicas automática e convencional. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(3): 457-460.

- Tomazelli, L.J. 1993. O regime de ventos e taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, 20(1): 18-26.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G. & Rosa, M.L.C.C. 2008. Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 35(2): 47-55.
- Triola, M.F. 1999. *Introdução à estatística*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos Científicos, 410p.
- Villwock, J.A. 1984. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil: A Synthesis. *Pesquisas*, 16: 5-49.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*, 8: 1-45.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 2007. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem natural. In: Becker, F.G., Ramos, R.A. & Moura, L.A. (Eds.). *Biodiversidade: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, Planície Costeira do Rio Grande do Sul*. Brasília, Editora SCAN, p. 20-33.