

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**O CAMPO DE DUNAS TRANSGRESSIVO DA BARREIRA COSTEIRA
HOLOCÊNICA NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL: POSSÍVEIS
CONTROLES DO SEU DESENVOLVIMENTO**

PATRICIA ROBERTA PUHL

ORIENTADOR – Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

Volume I

Porto Alegre – 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**O CAMPO DE DUNAS TRANSGRESSIVO DA BARREIRA COSTEIRA
HOLOCÊNICA NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL: POSSÍVEIS
CONTROLES DO SEU DESENVOLVIMENTO**

PATRICIA ROBERTA PUHL

ORIENTADOR – Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

BANCA EXAMINADORA

Profª. Drª. Caroline Thaís Martinho Pozocco – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

Profª. Drª. Maria Luiza Correa da Camara Rosa – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini – Universidade de São Paulo (USP).

Dissertação de mestrado apresentada como requisito básico para obtenção do Título de mestre em Geociências

Porto Alegre – 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Puhl, Patrícia Roberta

O campo de dunas transgressivo da barreira costeira holocênica no Litoral Norte do Rio Grande do Sul: possíveis controles do seu desenvolvimento / Patrícia Roberta Puhl. -- 2017.
62 f.

Orientador: Sérgio Rebello Dillenburg.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Campo de dunas transgressivo. 2. Barreira costeira holocênica. 3. Velocidade e direção do vento. 4. Precipitação. 5. Potencial de transporte de areia. I. Rebello Dillenburg, Sérgio, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Dillenburg, pelos ensinamentos, suporte, confiança e pela atenção desde o momento que manifestei meu interesse em participar desse programa de pós-graduação até a conclusão do mestrado.

Aos colegas e amigos Ina, Ana, Mauro, Cris, Giu, Naty, Ander, Rafa, Edu, Fernando, Erick, Renatinho, Há, Boris pelas conversas, trocas de ideias, campos e momentos de descontração e de comemoração. Todos vocês me remetem a bons sentimentos e lembranças de uma época feliz, num ambiente em que os colegas se ajudam sem esperar nada em troca. Profissionais assim são incríveis. Um agradecimento especial ao Volney, amigo desde o tempo da graduação e que me ajudou muito nas diferentes etapas do mestrado.

Agradeço a todos os professores da instituição que participaram da minha formação, não apenas pelo conhecimento, mas também por serem exemplos de pesquisadores dedicados e apaixonados pela Geologia Marinha e Costeira; ao CNPq pela bolsa de mestrado, a UFRGS, em especial ao CECO, pela estrutura fornecida, e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências pela oportunidade e suporte.

O maior agradecimento é para minha família. Meus pais Isaura e Roberto, que sempre acreditaram em mim, incentivaram meus estudos e apoiaram minhas decisões, e minha irmã Georgea que sempre esteve por perto, pronta para me ajudar em qualquer situação.

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 que, 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 (direção 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 a maior velocidade dos ventos em Tramandaí, o potencial de transporte de areia nessa localidade foi superior a Torres, indicando o 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 a 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 ao sul de Xangri-lá.

Palavras-chaves: Velocidade e direção do vento, precipitação, desenvolvimento desigual do campo de dunas, avanço da franja, potencial de transporte de areia.

ABSTRACT

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 of 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 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 migration of the dunes 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 south of Xangri-lá.

Keywords: Speed and direction of the wind, precipitation, uneven development of the dune field, fringe advance, sand transport potential.

SUMÁRIO

1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.1	Introdução	9
1.2	Objetivos	10
1.3	Hipóteses de trabalho	11
1.4	Descrição e localização da área de estudo.....	12
1.5	Caracterização meteo-oceanográfica	14
	Vento	14
	Precipitação	14
	Ondas	15
	Marés.....	16
1.6	Caracterização geológica.....	16
1.7	Materiais e métodos.....	19
1.8	Referências.....	23
2.	ARTIGO SUBMETIDO.....	27
3	CONSIDERACOES FINAIS.....	61

Sobre a estrutura da Dissertação:

Esta Dissertação de Mestrado está estruturada da seguinte forma:

a) Considerações iniciais, englobando *Introdução, Objetivos, Hipóteses de trabalho, Descrição e localização da área de estudo, Caracterização meteo-oceanográfica, Caracterização geológica, Materiais e métodos e Referências*. Na *Introdução* há uma breve contextualização sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de Mestrado; em seguida estão sumarizados os objetivos, as hipóteses de trabalho e uma breve apresentação da área de estudo. Na *Caracterização meteo-oceanográfica* foram descritos os principais fenômenos meteo-oceanográficos que atingem a planície costeira do Rio Grande do Sul; e na *Caracterização geológica*, foram descritas a barreira holocênica e as escarpas da Serra Geral. Os *Materiais e Métodos* contêm uma breve descrição das atividades empregadas para a realização do presente trabalho. Nas *Referências* encontram-se os trabalhos citados nas considerações Iniciais.

b) Manuscrito submetido à revista *Pesquisas em Geociências*, intitulado: “O campo de dunas transgressivo da barreira costeira holocênica no Litoral Norte do Rio Grande do Sul: possíveis controles do seu desenvolvimento”.

c) Considerações Finais e um anexo contendo a carta de submissão do artigo.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Planície costeira é uma extensa área de terras baixas e planas, situada ao longo do litoral, que apresenta depósitos sedimentares relacionados a inúmeros sistemas e ambientes influenciados por fatores marinhos e continentais, associados principalmente ao período Quaternário.

Na planície costeira do Rio Grande do Sul (RS) (Figura 1A) são encontrados sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira referentes a quatro máximos transgressivos. Esses sistemas são denominados, do mais antigo para o mais recente, como laguna-barreira I, II, III e IV. Nesses sistemas, e em particular no sistema IV, são encontrados depósitos praias e eólicos nas formas 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 (Figura 1B), apresenta sua morfologia na forma de cordões litorâneos atípicos, na forma de campos de dunas transgressivos, desenvolvidos em distintas fases durante a progradação da barreira (HESP *et al.*, 2005; HESP *et al.*, 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 direção) 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 1/4 ou 1/5 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 (Figura 1C).

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.

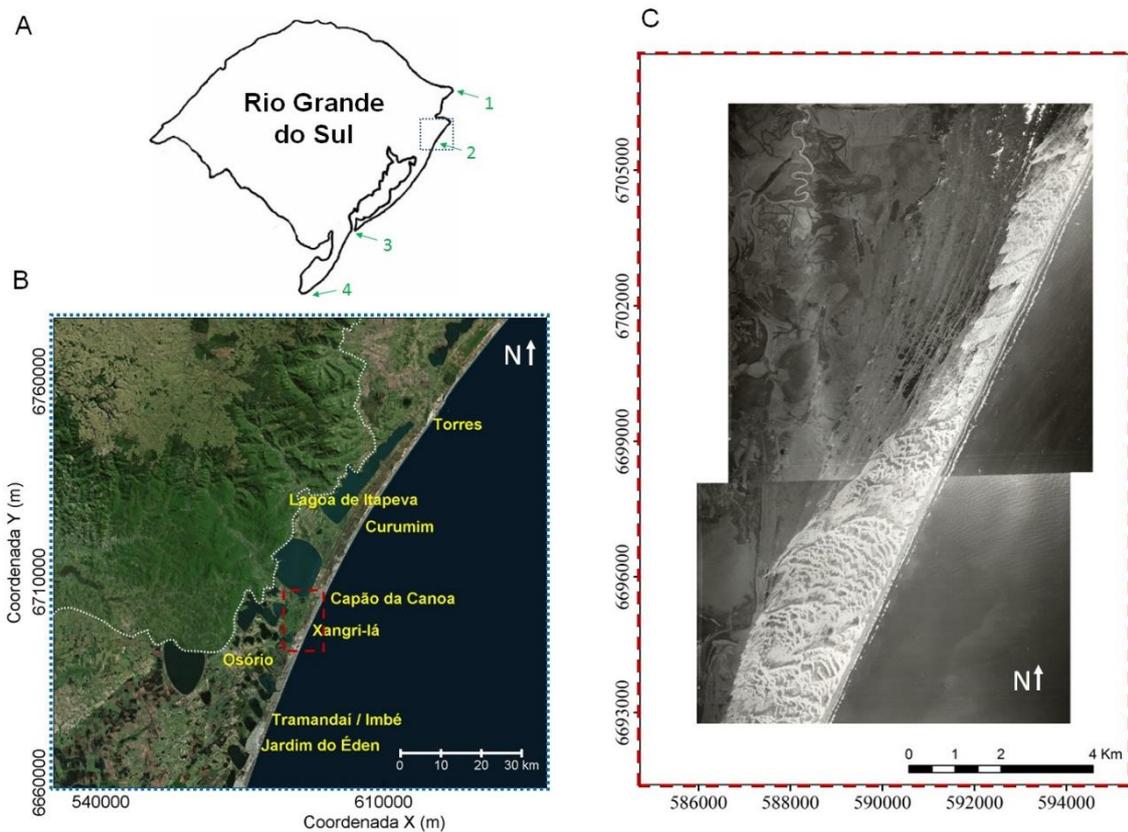


Figura 1: Área de Estudo. A) Localização geral da área de estudo com as quatro irregularidades da costa do RS (1 - rio Mampituba, 2 - desembocadura da Lagoa de Tramandaí, 3 - desembocadura da Lagoa dos Patos e 4 - Arroio Chuí); B) imagem de satélite do *Google Earth* destacando as principais localidades e o contorno da Serra Geral (pontilhado branco); e C) fotografias aéreas apresentando a fase mais recente de formação de campos de dunas transgressivos, 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.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem como principal objetivo investigar as causas do comportamento diferenciado da formação da fase moderna do campo de dunas transgressivo, presente sobre a barreira holocênica, no Litoral Norte do RS.

A partir do objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e comparar séries históricas de vento (direção e velocidade) e precipitação de duas estações meteorológicas do Litoral Norte do RS: uma situada adjacente à escarpa da Serra Geral, no limite norte do estado (Torres), e outra a sul, relativamente afastada da escarpa da serra (Tramandaí);

- Avaliar possível influência da escarpa da serra sobre os ventos Nortenordeste, Nordeste, Leste-nordeste e Leste (NNE, NE, ENE e E, respectivamente) através de medidas de vento simultâneas em dois locais: um ao norte de Xangri-lá, em área próxima à escarpa, e outro ao sul de Xangri-lá, em área mais afastada da escarpa.

1.3 Hipóteses de trabalho

A barreira holocênica, no trecho Torres-Tramandaí, diferentemente de outras regiões da costa do RS, apresenta sua morfologia superficial dominada por cordões muito espaçados (80 a 600 metros) relacionados a fases de formação de campos de dunas transgressivos. Grande parte desses campos de dunas está vegetada e a fase moderna, ainda relativamente ativa, é apenas a última fase de um conjunto de fases, cuja formação foi iniciada junto com o início da progradação da barreira, aproximadamente 7000 anos AP (HESP *et al.*, 2005; HESP *et al.*, 2007).

A barreira holocênica, nesse trecho do litoral, não se apresenta de forma uniforme, havendo diferenças significativas em sua morfologia, entre as porções a norte e a sul da localidade de Xangri-lá. A norte de Xangri-lá, a fase moderna de transgressão de dunas ocorre apenas como uma franja de cerca de 500-800 metros (a partir das dunas frontais) avançando sobre a barreira holocênica, com o campo de dunas transgressivo aparentemente migrando para W-SW. Já ao sul de Xangri-lá, há o completo avanço da fase moderna de transgressão de dunas, cobrindo toda a barreira holocênica, com o campo de dunas apresentando migração mais deslocada para SW.

Para a definição das hipóteses de trabalho, deve-se salientar que o avanço das dunas obedece a três principais fatores: disponibilidade de areia, direção e velocidade do vento, e precipitação.

A influência da velocidade e direção do vento pode ser observada ao se analisar o avanço da franja da duna. O avanço dessa franja se inicia nas proximidades de Osório (onde a Serra Geral se afasta da costa) e apresenta mesma direção que o vento dominante na região – o vento NE. Esse limite, no qual a Serra Geral se afasta da costa, é marcado pela forma de uma escarpa. Ao sul dessa feição, há um campo de geradores eólicos bastante expressivo, indicando o grande

potencial da região em termos de velocidade do vento. Tem-se como primeira hipótese que 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 ao vento NE, 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 intensidade 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 consequentemente diminuindo sua mobilidade. Essa mobilidade tende a ser diminuída quando na presença de vegetação, cujo desenvolvimento é favorecido pela maior precipitação. Dessa forma, a segunda hipótese considera que 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 planície costeira, que os campos de dunas a sul dessa localidade. Além da menor precipitação, maiores velocidades de vento a sul de Xangri-lá favorecem o transporte eólico e o consequente maior avanço dos campos de dunas transgressivos sobre a barreira holocênica.

1.4 Descrição e localização da área de estudo

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) (Figura 1A).

Caracteriza-se também pela presença de sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, os quais são dominados por ondas geradas em latitudes mais ao sul e por ondas vindas de nordeste. O transporte sedimentar e a deposição ao longo da costa são dominados basicamente pela ação das ondas (TOMAZELLI & VILLWOCK, 1992). Todo o litoral, a exceção de Torres, não apresenta elevações acima de 20

metros de altitude e está sobre um esporão da escarpa, alcançando 60 metros de altitude (BALDUÍNO RAMBO, 1956).

Segundo o Programa de Gerenciamento Costeiro do RS (GERCO/RS), a região costeira do Estado pode ser dividida em quatro setores, utilizando como critérios sua formação geológica, relevo e bacia de drenagem. Os quatro setores são: Litoral Norte (de Torres a Cidreira), Litoral Médio Leste (de Palmares do Sul até São José do Norte, a leste da Laguna dos Patos), Litoral Médio Oeste (de Barra do Ribeiro até o de Pelotas, a oeste da Laguna dos Patos) e Litoral Sul (de Rio Grande até o de Santa Vitória do Palmar) (FEPAM, 2015a). A área de estudo desse trabalho está inserida no Litoral Norte (Figura 2).



Figura 2: Setorização da região costeira do RS. Extraída de FEPAM (2015b).

Especificamente 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 5 ka AP (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995). Todavia, mais recentemente, DILLENBURG *et al.* (2006) e HESP *et al.* (2007), através de datações

por ^{14}C 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) (Figura 1B e Figura 1C).

1.5 Caracterização meteo-oceanográfica

Vento

Segundo TOMAZELLI (1993), o vento dominante na costa do RS é o NE e, embora sopra 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 e Mostardas. Especificamente em Torres, as direções mais frequentes são de NE e S, e tem 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.

Precipitação

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 (BALDUÍNO 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 a 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) (Figura 3).

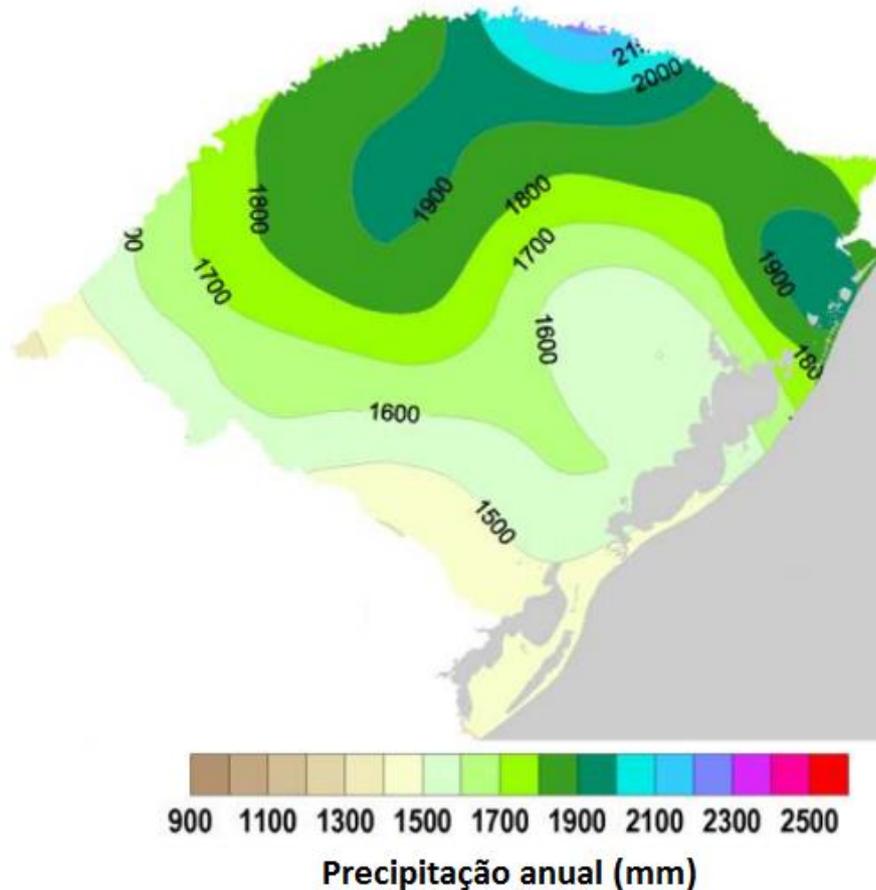


Figura 3: Mapa de precipitação anual. Modificado de SEMC (2002).

Ondas

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 uma 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, alcançando 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 erosionais, 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 um balanço positivo de sedimentos em uma larga escala temporal (MARTINHO *et al.*, 2009).

Marés

Na costa do Rio Grande do Sul, as marés astronômicas são de pequena amplitude (média de 0,5 m) e secundárias em relação às marés meteorológicas (variações de nível associadas aos agentes meteorológicos, como ventos e pressão atmosférica) (VILLWOCK & TOMAZELLI, 2007). As correntes de marés podem ser consideradas inexpressivas, não afetando diretamente a sedimentação costeira.

1.6 Caracterização geológica

O Litoral Norte do RS apresenta uma costa com 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 uma muito estreita planície costeira; e, mais ao sul, a escarpa da Serra Geral ocorre mais interiorizada até deixar de ocorrer, com orientação NE-SW, nas proximidades de Osório, sendo substituído por uma ampla planície costeira.

As escarpas da Serra Geral apresentam altitudes médias de 400 – 500 m (DILLENBURG *et al.*, 2001) e está localizada, 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, deixa de postar-se frontalmente à linha de costa e inflete para o interior.

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 Rio Grande do Sul 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 direção, e grande estoque de areia quartzosa fina (TOMAZELLI *et al.* 2008; MARTINHO *et al.* 2010). Esses três fatores são melhor descritos abaixo, conforme TOMAZELLI *et al.* (2008). 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).

a) Topografia de planície costeira

É necessária a presença de um terreno de baixo relevo que propicie espaço para o avanço das dunas transgressivas. A ocorrência de barreiras naturais, como escarpas de serras, falésias e outras feições topográficas, próximo à linha de costa, inibe o pleno desenvolvimento desses campos de dunas. Com a evolução geológica da costa do Rio Grande do Sul, especialmente com a justaposição lateral dos quatro sistemas do tipo laguna-barreira durante o Quaternário, houve a geração de uma planície costeira bastante larga (superior a 100 km em alguns locais) e com baixa topografia, apropriada ao processo de transgressão das dunas. A Barreira IV, a mais recente das barreiras, apresenta dunas transgressivas ativas ao longo de praticamente toda sua extensão.

b) Disponibilidade de sedimentos arenosos

Para a formação de campos de dunas expressivos é necessária uma fonte de areia com grande estoque. A principal fonte de sedimentos para as dunas da barreira holocênica do RS são as praias oceânicas adjacentes, as quais são constituídas basicamente por areias quartzosas finas a muito finas (TOMAZELLI & VILLWOCK, 1992) e que resultam do retrabalhamento das barreiras arenosas mais antigas, sob condições hidrodinâmicas marinhas controladas pela ação das ondas.

c) O regime de ventos

Além dos dois fatores acima citados, o regime regional de ventos (englobando a velocidade e o sentido em que o vento sopra) tem fundamental importância para a formação e desenvolvimento dos campos de dunas do tipo transgressivos. Para que o transporte eólico ocorra e se mantenha, o vento deve apresentar velocidade superior à velocidade crítica necessária para colocar os grãos de areia em movimento. Conforme cálculos realizados por TOMAZELLI (1993), as areias das praias da área de estudo são colocadas em transporte pelo vento por saltação quando este atinge uma velocidade de 5 m/s, valor este observado a 10 m acima da superfície do terreno. O sentido do vento controla o rumo de migração das dunas transgressivas.

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 uma 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 adequadamente, 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.

1.7 Materiais e métodos

Foram obtidas séries temporais de vento (direção e velocidade) e de precipitação de duas estações meteorológicas automáticas do 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 direção 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 4, podendo ser percebida uma diferença no local escolhido para a fixação das estações de Torres (convencional e automática). A altitude e início de operação das estações Torres e Tramandaí estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Altitude e início da operação das estações meteorológicas do INMET - Torres e Tramandaí.

	Altitude (m)	Início de operação
Convencional de Torres	4,66	01/06/1961
Automática de Torres	8	01/06/2006
Automática de Tramandaí	5	09/03/2008

Segundo 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, direção 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 a soma dos potenciais de deriva para cada direção de vento num determinado intervalo de tempo.

Foram também obtidos dados de velocidade e direção 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, direção 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 (Figura 4). 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).

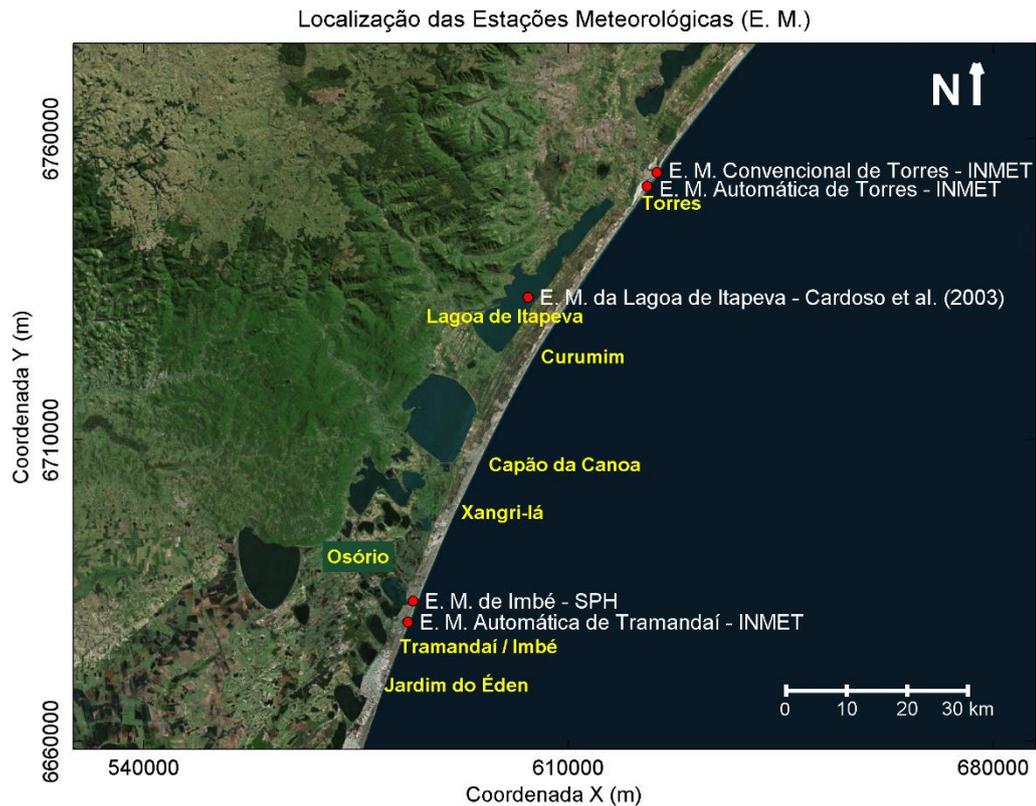


Figura 4: Localização das Estações Meteorológicas (E. M.) utilizadas como base de dados. Imagem modificada do *Google Earth*.

Além da aquisição das séries temporais citadas anteriormente, foram realizadas medições simultâneas de velocidade e direção 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), 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), denominados respectivamente de ponto Norte e ponto Sul (Figura 5). 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 anemômetros 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 da direção do vento, com o auxílio de bússolas. As medições apresentaram grande resolução temporal, com dados medidos a cada 1 min (Figura 6). As direções em relação ao norte magnético obtidas com as bússolas foram transformadas em direções em relação ao norte geográfico, utilizando o *World*

Magnetic Model (WMM) da NOAA. Os valores utilizados para correção foram: $17,23^\circ$ W para ponto Sul e $17,4^\circ$ W para ponto Norte da C1; e $17,21^\circ$ W para ponto Sul e $17,45^\circ$ W para ponto Norte da C2.

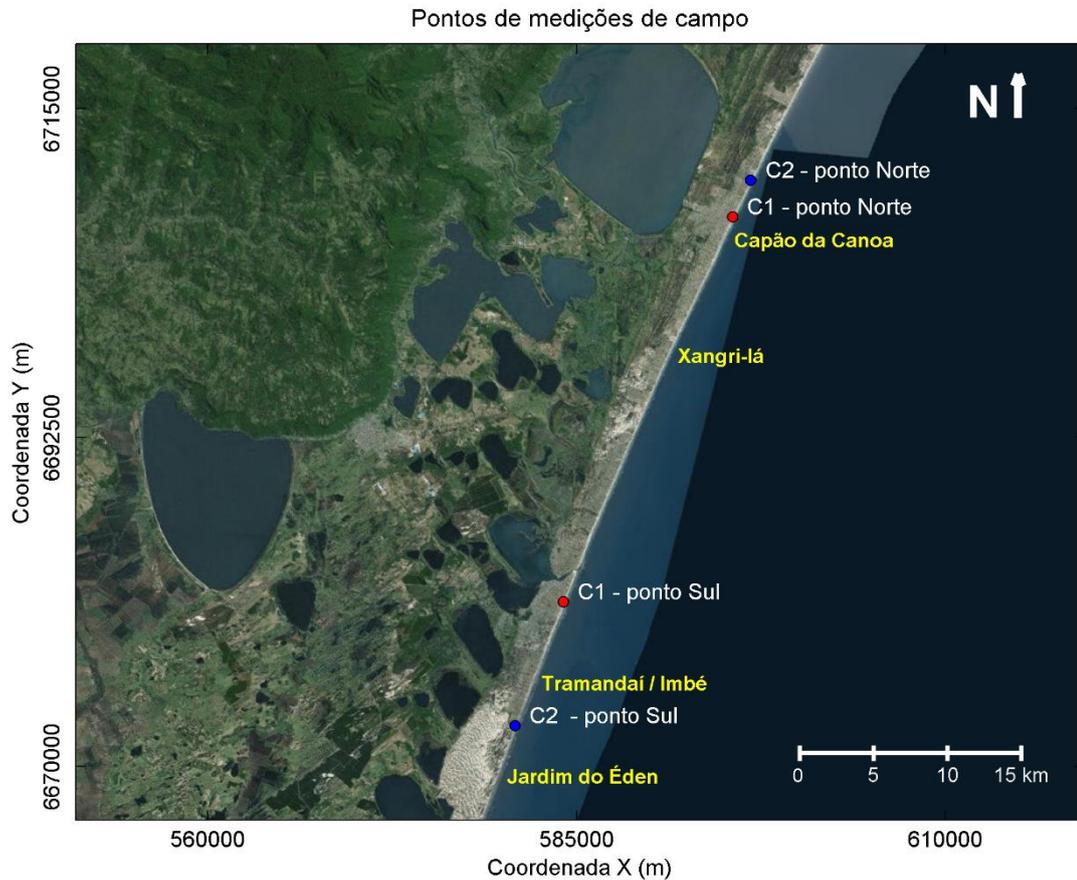


Figura 5: Mapa de localização das estações nas campanhas C1 e C2, denominadas como pontos Norte e Sul. Imagem modificada do *Google Earth*.



Figura 6: Anemômetro e seta utilizados para medição da velocidade e direção do vento, respectivamente.

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 precisão entre os valores obtidos nas duas estações meteorológicas (é considerada uma boa correlação quando r^2 é maior que 0,95).

Um cálculo do erro médio quadrático ou RMSE (*Root Mean Square Error*) também foi realizado, quando julgado necessário, apenas para apontar se há diferenças entre as variáveis das diferentes estações, seguindo a seguinte formulação:

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

Onde $E1$ e $E2$ representam a variável de cada uma das estações. Quanto menor o valor de RMSE, mais semelhantes são as séries comparadas.

1.8 Referências

BALDUÍNO RAMBO, S.J. 1956. **A Fisionomia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Selbach, 510p.

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, **Boletim de Resumos**. Imbé: ABEQUA, 2001. 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**, SI 39: 132-135.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental. 2015a. Programa de Gerenciamento Costeiro - GERCO/RS. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental. 2015b. Diretrizes ambientais para o desenvolvimento dos municípios do Litoral Norte, Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

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., 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.

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.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2011a. **Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do 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.

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.

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.

TOMAZELLI, L.J. 1993. O regime de ventos e taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, 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. **Revista Pesquisas em Geociências**, 35(2):47-55.

TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 1992. Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, 19(1):3-12.

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. 2007. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem natural. *In*: Fernando Gertum Becker, Ricardo Aranha Ramos & Luciano de Azevedo Moura (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.

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, (8):1-45.

2. ARTIGO SUBMETIDO

O artigo referente a essa Dissertação foi submetido à *Revista Pesquisas em Geociências*. A carta comprovando a submissão está no item Anexo.

1 **O campo de dunas transgressivo da barreira costeira holocênica no Litoral**
2 **Norte do Rio Grande do Sul: possíveis controles do seu desenvolvimento**

3
4 **The transgressive dune field of the holocene coastal barrier in the northern**
5 **coast of Rio Grande do Sul: possible controls of its development**

6
7
8
9 Patrícia R. PUHL¹ & Sérgio R. DILLENBURG²

10
11
12
13 ⁽¹⁾ Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do
14 Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, Caixa Postal 15001, CEP 91.509-900, Porto
15 Alegre, Brasil. E-mail: patricia.puhl@gmail.com.

16 ⁽²⁾ Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade
17 Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, Caixa Postal 15001, CEP 91.509-900,
18 Porto Alegre, Brasil. E-mail: sergio.dillenburg@ufrgs.br.

19
20
21
22 **Resumo.** No Litoral Norte do Rio Grande do Sul, ao norte do balneário Xangri-lá, a
23 barreira holocênica encontra-se parcialmente coberta pela fase moderna e relativamente
24 ativa de um campo de dunas transgressivo, enquanto que, ao sul deste balneário, o campo
25 de dunas cobre completamente a barreira. Este trabalho contribuiu para o conhecimento
26 acerca desse comportamento diferenciado de desenvolvimento da fase moderna do campo
27 de dunas transgressivo sobre a barreira holocênica. Foram utilizadas séries temporais de
28 vento (direção e velocidade) e precipitação de estações meteorológicas localizadas ao sul
29 e ao norte de Xangri-lá, bem como foram realizadas medições simultâneas de vento, por
30 meio de anemômetros portáteis, imediatamente ao norte e ao sul desse balneário.
31 Potenciais de transporte de areia foram calculados para ambas as estações
32 meteorológicas. Os registros históricos da estação de Tramandaí (mais ao sul) indicaram
33 maiores velocidades de vento e menores de precipitação em relação à estação de Torres
34 (mais ao norte). Devido a maior velocidade dos ventos em Tramandaí, o potencial de
35 transporte de areia nessa localidade foi superior a Torres, indicando o favorecimento da
36 migração das dunas em suas proximidades. O comportamento desigual de
37 desenvolvimento da fase moderna do campo de dunas transgressivo pode então estar
38 relacionado a maior velocidade e frequência dos ventos NNE, NE, ENE e E em
39 Tramandaí (ou seja, ao sul de Xangri-lá), além da menor precipitação que também
40 favorece um transporte de areia mais eficiente ao sul de Xangri-lá.

41 **Palavras-chave:** Velocidade e direção do vento, precipitação, desenvolvimento desigual
42 do campo de dunas, avanço da franja, potencial de transporte de areia.

43
44
45

46 **Abstract.** In the north coast of Rio Grande do Sul, to the north of Xangri-lá beach, the
47 Holocene barrier is partially covered by the modern and relatively active phase of a
48 transgressive dune field, while to the south of this balneario the dune field completely
49 covers the barrier. This work contributed to the knowledge about this differentiated
50 development behavior of the modern phase of the transgressive dune field on the
51 holocene barrier. Time series of wind (direction and speed) and precipitation of
52 meteorological stations located to the south and north of Xangri-lá were used, as well as
53 simultaneous wind measurements using portable anemometers, immediately to the north
54 and south of this balneario. Sand transport potentials were calculated for both
55 meteorological stations. Historical records of the Tramandaí station (further south)
56 indicated higher wind speeds and lower precipitation relative to the Torres station (further
57 north). Due to the greater speed of the winds in Tramandaí, the potential of sand transport
58 in this locality was higher than Torres, indicating the favor of the migration of the dunes
59 in its proximities. The uneven developmental behavior of the modern phase of the
60 transgressive dune field can then be related to the higher speed and frequency of the
61 NNE, NE, ENE and E winds in Tramandaí (ie, south of Xangri-lá), as well as the lower
62 precipitation also favors more efficient sand transportation south of Xangri-lá.

63 **Keywords.** Speed and direction of the wind, precipitation, uneven development of the
64 dune field, fringe advance, sand transport potential.
65

66

67 1 Introdução

68

69 Na planície costeira do Rio Grande do Sul (RS) são encontrados sistemas
70 deposicionais do tipo laguna-barreira referentes a quatro máximos transgressivos. Esses
71 sistemas são denominados, do mais antigo para o mais recente, como laguna-barreira I, II, III
72 e IV. Nesses sistemas, e em particular no sistema IV, são encontrados depósitos praias e
73 eólicos nas formas de cordões litorâneos do tipo dunas frontais e de campos de dunas
74 transgressivos, além de depósitos lagunares.

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

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

84 No Litoral Norte do RS, a fase mais recente de formação de campos de dunas
85 transgressivos apresenta-se pouco desenvolvida ao norte do balneário Xangri-lá, limitando-se
86 a uma franja com cerca de 500-800 m de largura, cobrindo apenas 1/4 ou 1/5 da superfície

87 emersa da barreira holocênica. Entretanto, em Xangri-lá e ao sul deste balneário, esta fase
88 mostra um significativo avanço (desenvolvimento) e passa a cobrir toda a barreira (Figura
89 1C).

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

94

95 **2 Localização e aspectos gerais da área de estudo**

96

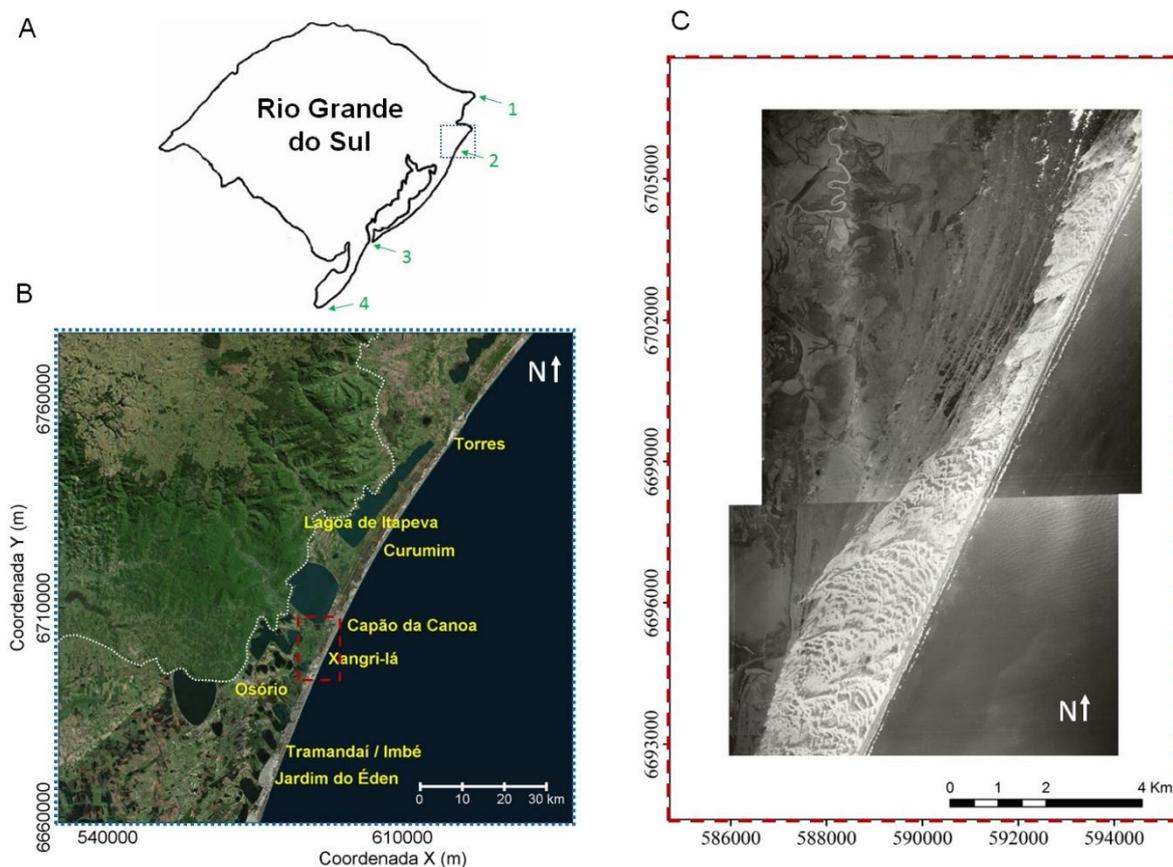
97 A costa do RS, localizada entre as latitudes 29° e 34° S, apresenta aproximadamente
98 620 km de extensão, com seu limite norte no rio Mampituba e sul no Arroio Chuí, e possui
99 uma orientação predominantemente NE-SW, ocorrendo segmentos levemente côncavos e
100 convexos alternados. A costa do RS é caracterizada por apresentar praias arenosas
101 relativamente contínuas, interrompidas apenas por quatro cursos de água: o rio Mampituba, o
102 canal de desembocadura da Laguna de Tramandaí, o canal de desembocadura da Laguna dos
103 Patos e o Arroio Chuí (Calliari *et al.*, 2005) (Figura 1A).

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

116

117

118



119
 120 Figura 1. Área de Estudo. A) Localização geral da área de estudo com as quatro
 121 irregularidades da costa do RS (1 - rio Mampituba, 2 - desembocadura da Lagoa de
 122 Tramandaí, 3 - desembocadura da Lagoa dos Patos e 4 - Arroio Chuí); B) imagem de satélite
 123 do *Google Earth* destacando as principais localidades e o contorno da Serra Geral (pontilhado
 124 branco); e (C) fotografias aéreas apresentando a fase mais recente de formação de campos de
 125 dunas transgressivos, com destaque para o pequeno desenvolvimento a norte do balneário
 126 Xangri-lá, cobrindo uma pequena parcela da barreira holocênica, e com significativo avanço
 127 ao sul do balneário, cobrindo toda a barreira.

128 *Figure 1. Study Area. A) General location of the study area with the four irregularities of the*
 129 *RS coast (1 - Mampituba river, 2 - mouth of Tramandaí Lagoon, 3 - mouth of Lagoa dos*
 130 *Patos and 4 - Arroio Chuí); B) Google Earth satellite image highlighting the main localities*
 131 *and outline of Serra Geral (white dotted line); and C) aerial photographs presenting the most*
 132 *recent phase of transgressive dune fields formation, especially the small development by the*
 133 *north of Xangri-lá beach, covering a small part of the holocene barrier, and with significant*
 134 *progress to the south of the balneario, covering the entire barrier.*

135

136

137 2.1 Caracterização meteo-oceanográfica

138 Segundo Tomazelli (1993), o vento dominante na costa do RS é o NE e, embora sobre
139 ao longo de todo o ano, é mais ativo nos meses de primavera e verão. O vento de W-SW é
140 secundário, sendo mais eficaz nos meses de inverno. Ao longo da costa do RS, o regime de
141 ventos não é homogêneo (Martinho *et al.*, 2010): há um gradiente crescente de velocidade de
142 norte para sul, entre Torres e Mostardas. Especificamente em Torres, as direções mais
143 frequentes são de NE e S, e tem uma velocidade reduzida; em Imbé, os ventos de NE são mais
144 frequentes e apresentam maior velocidade; já em Mostardas, os ventos NE e S são os mais
145 frequentes e mais fortes, e dentre as estações analisadas por Martinho *et al.* (2010), é a que
146 apresenta a maior frequência de ventos fortes.

147 O regime de chuvas é fortemente determinado pelas diferenças de altitude e os
148 acidentes de relevo. As correntes de ar, saturadas de vapor de água, esbarrando na Serra
149 Geral, são forçadas a subir. Como a cada 100 m de ascensão a temperatura diminui 0,5 °C, há
150 a condensação, formação de nuvens e precipitação orográfica (Balduino Rambo, 1956).
151 Conseqüentemente, a precipitação atinge o máximo nas encostas e no bordo do Planalto. Nos
152 locais onde a orografia é inexistente, como no litoral, as chuvas ocorrem em menor volume.
153 Na costa do RS, o Litoral Norte é a porção mais quente e úmida. Isso ocorre devido a
154 influência do elevado gradiente topográfico entre o litoral e as escarpas da Serra Geral, com
155 elevações de 400 – 500 m, que ocorrem a cerca de 15 a 20 km de distância da linha de costa.
156 Estas elevações produzem um aumento no contraste das temperaturas da terra e do mar. A
157 brisa marinha (flui do mar para a terra), transporta massas de ar quentes e úmidas, gerando as
158 já mencionadas chuvas orográficas na região (Hasenack & Ferraro, 1989; Grimm *et al.*,
159 1998). De forma geral, há uma tendência a índices crescentes de precipitação anual no sentido
160 sul-norte (SEMC, 2002).

161 As principais ondulações que ocorrem na costa do RS são as de N-NE e as de S. As
162 ondulações provenientes de N-NE são as mais frequentes, porém, apresentam menor energia
163 que as ondulações de S. As ondas de S, apesar de menos frequentes, porém mais energéticas,
164 são as mais importantes para o transporte sedimentar ao longo da costa (Lima *et al.*, 2001), o
165 qual corresponde a uma resultante de deriva litorânea de sul para norte.

166 No Litoral Norte, a linha de costa apresenta forma côncava e uma plataforma interna
167 adjacente ampla e com baixa declividade, resultando em um processo eficiente de refração e
168 de dissipação da energia das ondas até alcançarem à costa. O contrário ocorre em porções da
169 costa que apresentam forma convexa: há plataformas internas mais estreitas e íngremes, não

170 havendo uma grande área para refração e dissipação de energia das ondas, alcançando a costa
171 com grande energia e conseqüente grande transporte longitudinal de sedimentos. Nas zonas
172 de transição (entre as porções côncavas e convexas), não há predominância de processos
173 deposicionais ou erosionais, havendo um balanço na entrada e saída de sedimentos e produção
174 de barreiras agradacionais (ou estacionárias). Ou seja, a energia das ondas e as taxas de
175 transporte longitudinal de sedimento são menores no Litoral Norte do que em porções da
176 costa que apresentem forma convexa ou retilínea, e conseqüentemente, na região entre Torres
177 e Tramandaí ocorre um balanço positivo de sedimentos em uma larga escala temporal
178 (Martinho *et al.*, 2009)

179 Na costa do Rio Grande do Sul, as marés astronômicas são de pequena amplitude
180 (média de 0,5 m) e secundárias em relação às marés meteorológicas (variações de nível
181 associadas aos agentes meteorológicos, como ventos e pressão atmosférica) (Villwock &
182 Tomazelli, 2007). As correntes de marés podem ser consideradas inexpressivas, não afetando
183 diretamente a sedimentação costeira.

184

185 2.2 Caracterização geológica

186 O Litoral Norte do RS apresenta uma costa com condicionantes geológicos variáveis:
187 na sua porção mais ao norte, há grandes formações rochosas da Serra Geral (pertencente ao
188 Planalto Meridional) que afloram na costa na forma de escarpas, no município de Torres, com
189 uma muito estreita planície costeira; e, mais ao sul, a escarpa da Serra Geral ocorre mais
190 interiorizada até deixar de ocorrer, com orientação NE-SW, nas proximidades de Osório,
191 sendo substituído por uma ampla planície costeira.

192 As escarpas da Serra Geral apresentam altitudes médias de 400 – 500 m (Dillenburg *et*
193 *al.*, 2001) e está localizada, em média a aproximadamente 9 km da linha de costa na região de
194 Torres, e a cerca de 20 km da linha de costa, na região de Tramandaí/Imbé. Mais para o sul,
195 deixa de postar-se frontalmente à linha de costa e inflete para o interior.

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

201 Em termos de granulometria, nas praias de Torres o tamanho médio de grão se
202 mantém entre 2,2 e 2,7 ϕ (areia fina), sendo praias bastante homogêneas com relação às

203 características sedimentológicas. Nos balneários de Tramandaí/Imbé, os sedimentos também
204 se apresentam homogêneos ao longo da praia, com tamanho médio de grão oscilando entre
205 2,1 e 2,6 ϕ (areia fina) (Figueiredo, 2005).

206 A costa do Rio Grande do Sul comporta um dos mais expressivos sistemas eólicos da
207 costa brasileira. Isso ocorre, pois, a porção costeira do estado apresenta três fatores básicos
208 para a formação de campos de dunas: topografia de planície costeira, regime de ventos
209 apropriado em velocidade, frequência e direção, e grande estoque de areia quartzosa fina
210 (Tomazelli *et al.*, 2008; Martinho *et al.*, 2010). Uma caracterização mais detalhada dos
211 diferentes campos de dunas transgressivos do Litoral Norte e Médio do RS pode ser obtida
212 em Martinho *et al.* (2010).

213 Segundo Dillenburg *et al.* (2001), na porção sul do Litoral Norte, entre Xangri-lá e
214 Tramandaí, a barreira holocênica (barreira IV) apresenta uma média de 2,5 km de largura,
215 coberta em toda sua extensão pela fase moderna (ativa) de campos de dunas transgressivos,
216 que migram para SW, uma vez que o vento dominante é de NE. Com a migração desses
217 campos de dunas, o sistema lagunar sofre assoreamento. Na porção norte, entre Xangri-lá e
218 Torres, a largura média da barreira costeira é maior (3,5 km) e apresenta uma reduzida
219 cobertura de areias da fase moderna dos campos de dunas transgressivos, limitada a uma
220 franja que não alcança 1 km de largura, a contar da linha de costa. Em ambas as porções não
221 urbanizadas desses dois setores do litoral, ocorrem dunas frontais relativamente contínuas,
222 com alturas entre 2 e 5 m. Dillenburg *et al.* (2001) levantaram a hipótese, sem testá-la
223 adequadamente, de que um aumento na velocidade média dos ventos de NE, de norte para sul
224 ao longo do Litoral Norte, acompanhado por um aumento das taxas de precipitação, de sul
225 para norte, foram determinantes de uma maior mobilidade de dunas ao sul de Xangri-lá,
226 favorecendo um mais amplo desenvolvimento da fase moderna de formação dos campos de
227 dunas transgressivos.

228

229 **3 Materiais e Métodos**

230

231 Foram obtidas séries temporais de vento (direção e velocidade) e de precipitação de
232 duas estações meteorológicas automáticas do INMET: Torres e Tramandaí, a primeira situada
233 cerca de 70 km ao norte de Xangri-lá, e a segunda situada a 20 km ao sul. Para a primeira, as
234 séries compreendem o período de 01/06/2006 a 15/12/2015; para a segunda, de 09/03/2008 a
235 25/11/2015, com dados horários em ambas. Para comparação das duas séries, foram

236 escolhidos intervalos em comum: 09/03/2008 a 25/11/2015. Também foi obtida uma série de
237 direção e velocidade do vento da estação meteorológica convencional de Torres, com dados
238 entre as datas de 01/06/1961 e 31/12/2014, apenas para os horários 00:00, 12:00 e 18:00.

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

242 Segundo o INMET (2011a), uma estação meteorológica automática (EMA) coleta por
243 meio de sensores, a cada minuto, parâmetros meteorológicos. Dentre esses parâmetros podem
244 ser citados temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos
245 ventos, e radiação solar. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para
246 serem transmitidos para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é
247 validado através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados, sendo
248 disponibilizados gratuitamente, em tempo real. Já uma estação meteorológica convencional
249 (Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional) é composta por vários
250 sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos, sendo esses
251 lidos e anotados por um observador a cada intervalo e que os envia a um centro coletor por
252 um meio de comunicação qualquer (INMET, 2011b).

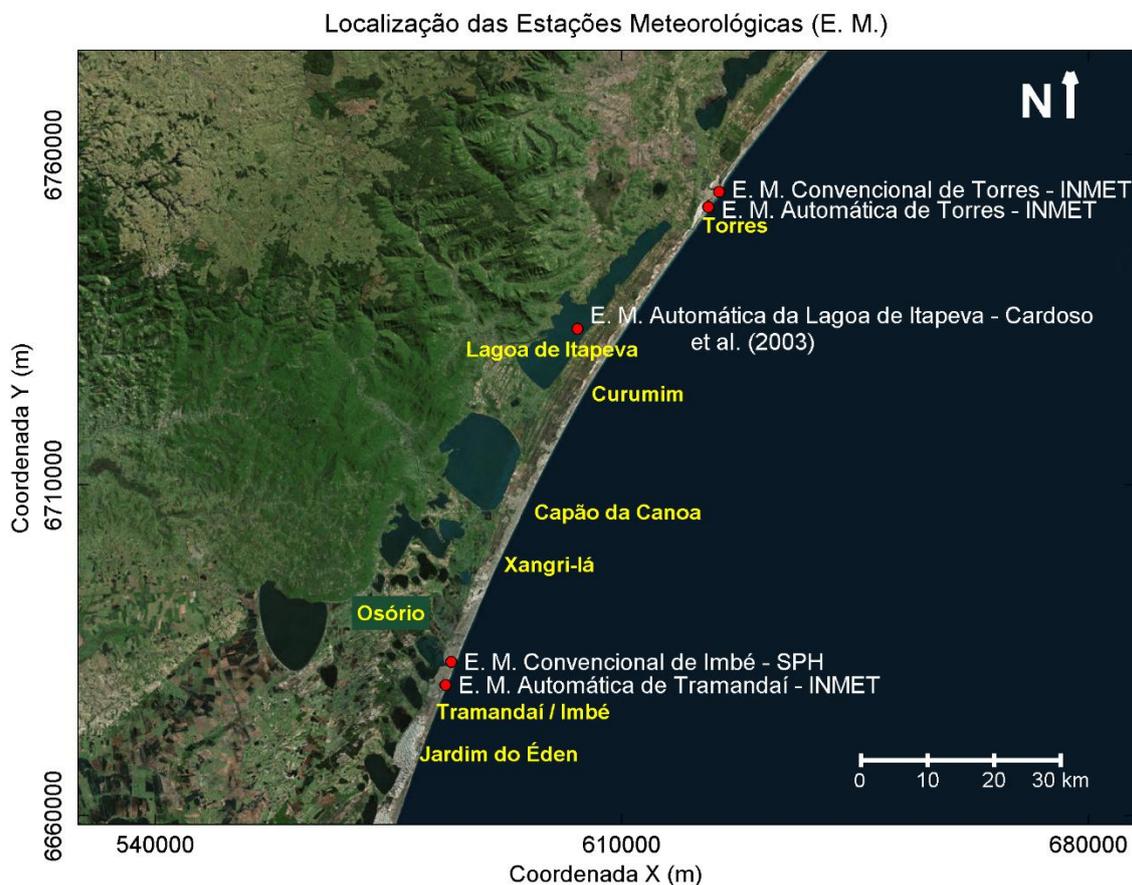
253 Potenciais de transporte de areia (DP - *Drift Potential*) foram calculados para essas
254 séries das estações automáticas do INMET usando o Método de Fryberger & Dean (1979). O
255 valor numérico obtido pela equação expressa a quantidade relativa de areia potencialmente
256 transportada pelo vento durante determinado tempo em que o vento soprou. As unidades de
257 DP são consideradas como unidades vetoriais (UV), pois a velocidade do vento é tratada
258 como um vetor. O potencial de transporte de areia de uma estação meteorológica corresponde
259 a soma dos potenciais de deriva para cada direção de vento num determinado intervalo de
260 tempo.

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

265 Séries de velocidade média do vento, direção do vento e de precipitação foram
266 também obtidas para a lagoa de Itapeva – a lagoa mais ao norte do sistema de lagoas costeiras
267 de água doce interligadas no Litoral Norte do RS. Esse corpo aquoso apresenta orientação
268 NE-SW, assim como a costa do RS, e estende-se das proximidades de Torres a Curumim

269 (Figura 2). Toda sua margem oeste coincide com a Serra Geral. O período de dados dessa
 270 estação automática compreende de 01/12/1998 a 09/09/1999, com medições a cada trinta
 271 minutos. Maiores detalhes desse levantamento podem ser obtidos em Cardoso *et al.* (2003).

272



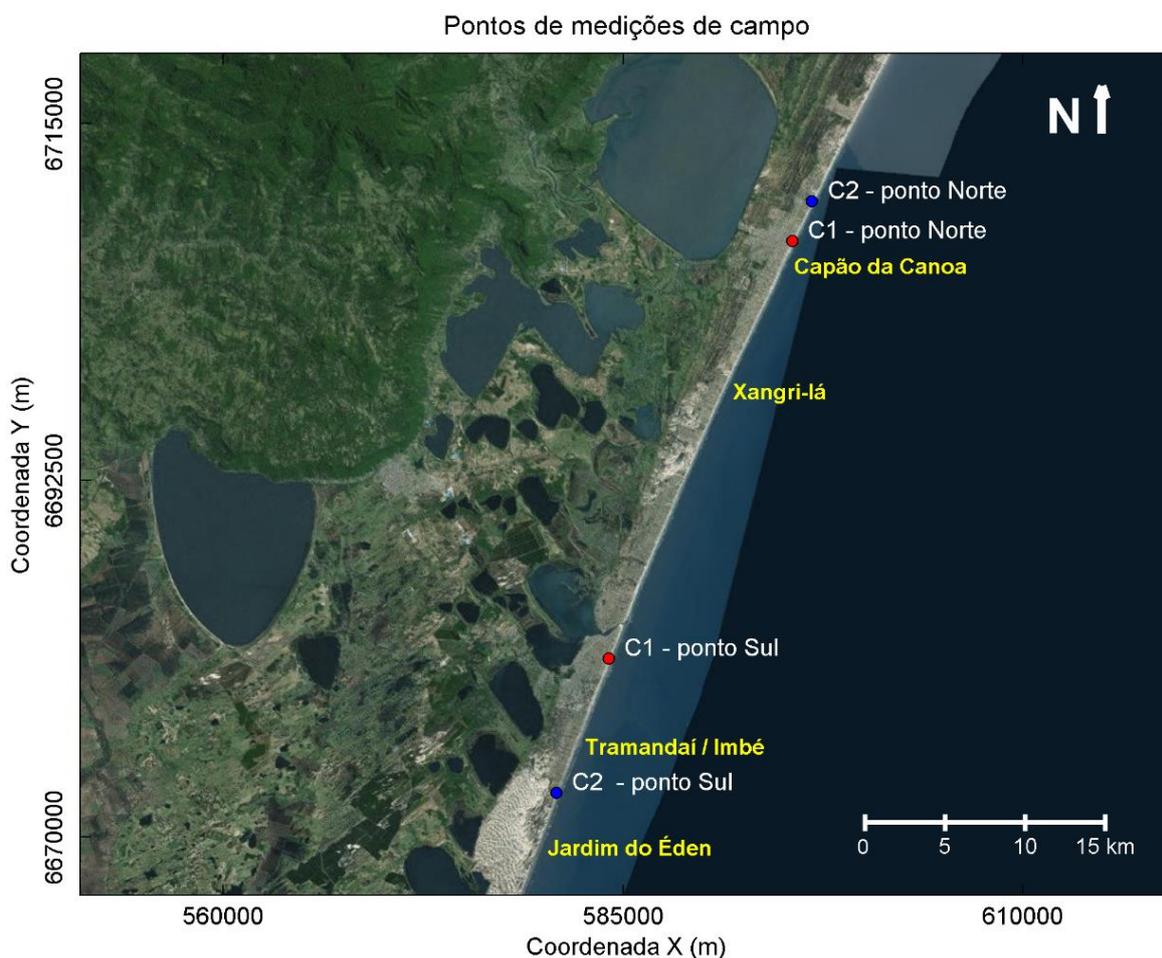
273
 274 Figura 2. Localização das Estações Meteorológicas (E. M.) utilizadas como base de dados.
 275 Imagem modificada do *Google Earth*.

276 *Figure 2. Location of the Weather Stations (W.S.) used as a database. Modified image of*
 277 *Google Earth.*

278

279 Além da aquisição das séries temporais citadas anteriormente, foram realizadas
 280 medições simultâneas de velocidade e direção do vento em dois locais: em Capão da Canoa
 281 (situada aproximadamente 5 km a norte de Xangri-lá) e Tramandaí (situada cerca de 25 km ao
 282 sul de Xangri-lá, em uma primeira campanha (C1), e denominados, respectivamente, de ponto
 283 Norte e ponto Sul. E em Capão da Canoa e Jardim do Éden (cerca de 30 km ao sul de Xangri-
 284 lá), em uma segunda campanha (C2), denominados respectivamente de ponto Norte e ponto
 285 Sul (Figura 3). O objetivo foi coletar dados de vento a norte e a sul da região de expansão
 286 (alargamento) do campo de dunas transgressivo, que ocorre no balneário de Xangri-lá.

287 Os instrumentos utilizados foram dois anemômetros digitais portáteis da marca Kestrel
 288 1000 fixados em tripé fotográfico com altura regulada em 1 m, para medição da velocidade
 289 instantânea do vento; duas setas, fixadas na mesma altura do tripé, para medição da direção do
 290 vento, com o auxílio de bússolas. As medições apresentaram grande resolução temporal, com
 291 dados medidos a cada 1 min (Figura 4). As direções em relação ao norte magnético obtidas
 292 com as bússolas foram transformadas em direções em relação ao norte geográfico, utilizando
 293 o *World Magnetic Model* (WMM) da NOAA. Os valores utilizados para correção foram:
 294 17,23° W para ponto Sul e 17,4° W para ponto Norte da C1; e 17,21° W para ponto Sul e
 295 17,45° W para ponto Norte da C2.
 296



297
 298 Figura 3. Mapa de localização das estações nas campanhas C1 e C2, denominadas como
 299 pontos Norte e Sul. Imagem modificada do *Google Earth*.

300 *Figure 3. Location map of the stations in the field campaign C1 and C2, denominated as*
 301 *North and South points. Modified image of Google Earth.*

302

303



304
 305 Figura 4. Anemômetro e seta utilizados para medição da velocidade e direção do vento,
 306 respectivamente.

307 *Figure 4. Anemometer and arrow used to measure wind speed and direction, respectively.*

308

309 Por meio de regressões lineares simples e seus respectivos coeficientes de
 310 determinação (r^2), é possível definir a concordância e a precisão entre as variáveis
 311 comparadas das estações meteorológicas automática e convencional. O coeficiente de
 312 determinação obtido pode variar entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior a
 313 precisão entre os valores obtidos nas duas estações meteorológicas (é considerada uma boa
 314 correlação quando r^2 é maior que 0,95).

315 Um cálculo do erro médio quadrático ou RMSE (*Root Mean Square Error*) também
 316 foi realizado, quando julgado necessário, apenas para apontar se há diferenças entre as
 317 variáveis das diferentes estações, seguindo a seguinte formulação:

318

$$319 \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E1_i - E2_i)^2}$$

320

321 Onde $E1$ e $E2$ representam a variável de cada uma das estações. Quanto menor o valor
 322 de RMSE, mais semelhantes são as séries comparadas.

323

324

325

326 **4 Resultados**

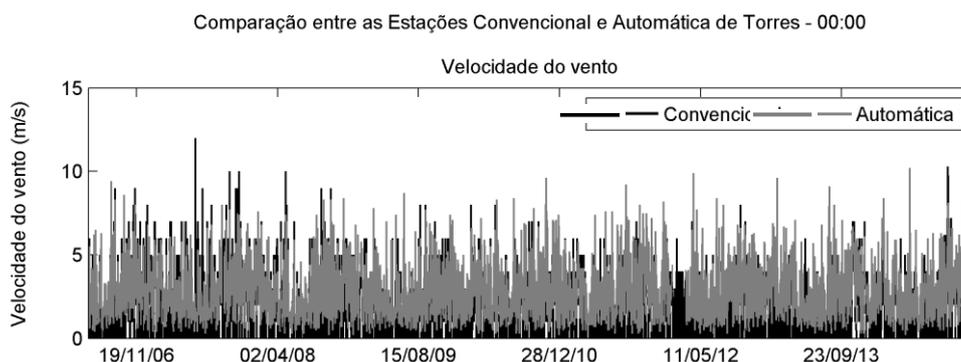
327

328 *4.1 Dados das Estações Convencional e Automática de Torres*

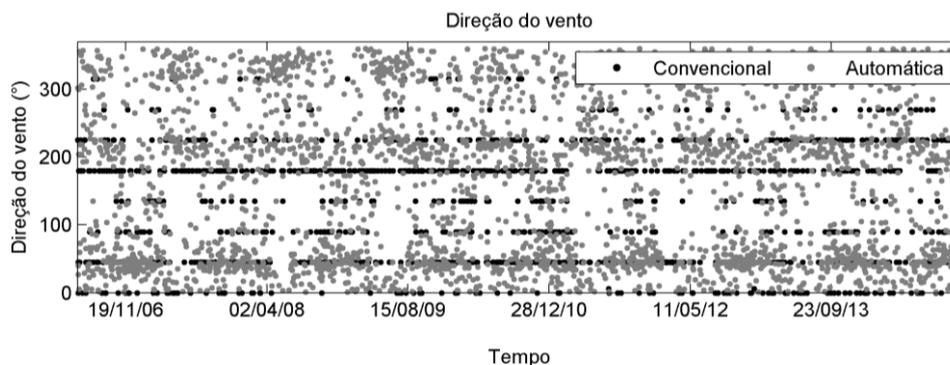
329 Os dados dessas duas estações são horários e, para comparação das séries foi escolhido
 330 um horário em comum, como por exemplo, 00:00 (Figura 5). As séries de velocidade de vento
 331 para as duas estações (Figura 5A), apesar de apresentarem um padrão similar, possuem
 332 diferenças nos valores, com uma correlação baixa entre elas ($r^2 = 0,7854$), e com um RMSE
 333 calculado de 1,34 m/s (valor utilizado apenas para apontar que há diferenças entre as
 334 estações). Além disso, houve distribuição diferenciada nas direções, com valores entre 0 e
 335 360° na estação automática e valores arredondados para os pontos cardeais e colaterais (ex:
 336 NE ou SW) na convencional (Figura 5B), resultando uma correlação muito baixa ($r^2 =$
 337 0,5921).

338

339 A



B



343

344 Figura 5. A) Velocidade (m/s) e B) direção (°) do vento para as estações convencional (em
 345 preto) e automática (em cinza) do INMET de Torres – entre 01/06/2006 e 31/12/2014 para o
 346 horário 00:00.

347 *Figure 5. A) Speed (m/s) and B) direction (°) of the wind for conventional (black) and*
348 *automatic (gray) stations of Torres INMET - between 06/01/2006 and 31/12/2014 for the*
349 *00:00 time.*

350

351 *4.2 Dados das Estações Automáticas de Torres e Tramandaí*

352 A velocidade do vento em Tramandaí, para o período entre 09/03/2008 e 25/11/2015,
353 foi visivelmente superior à velocidade em Torres, conforme apresentado no gráfico a seguir
354 (Figura 6A). Essa diferença entre as duas as séries pode-se ser confirmada por meio do RMSE
355 calculado (2,88 m/s), ou seja, há uma diferença de magnitude entre elas. Percebe-se também
356 uma ampla variedade de direções ao longo das séries (Figura 6B).

357 Nas duas estações, o vento mais frequente foi de NE (12,14% do tempo em Torres e
358 24,02% em Tramandaí). Em Torres também se destaca o vento ENE, ocorrendo em 11,55%
359 do tempo). As máximas velocidades para Torres estão associadas aos ventos de SSE e W,
360 com máxima de 13,0 m/s e para Tramandaí aos ventos de ENE e SE, com máximos de 20 e
361 18,8 m/s, respectivamente. A classe de velocidade predominante para Tramandaí foi a de 3 a
362 4 m/s, e para Torres a de 1 a 2 m/s (Quadro 1 e Quadro 2, respectivamente).

363 Exceto para os ventos de SSW, todas as médias de velocidade por direção foram
364 maiores em Tramandaí. Portanto, para os ventos de interesse deste estudo (NNE, NE, ENE e
365 E), as velocidades médias também foram maiores para Tramandaí. Ocorreram 469 registros
366 de ventos de NNE, NE, ENE e E acima de 11m/s em Tramandaí, enquanto que para Torres
367 apenas 5 (Quadros 1 e 2, respectivamente).

368

369

370

371

372

373

374

375

376

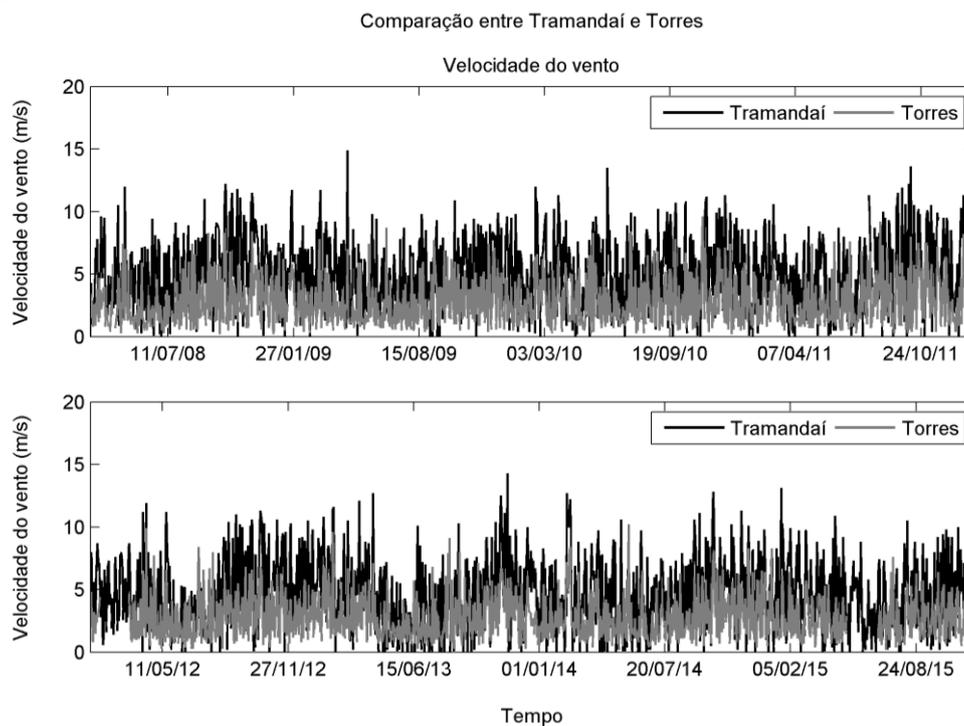
377

378

379

380

A



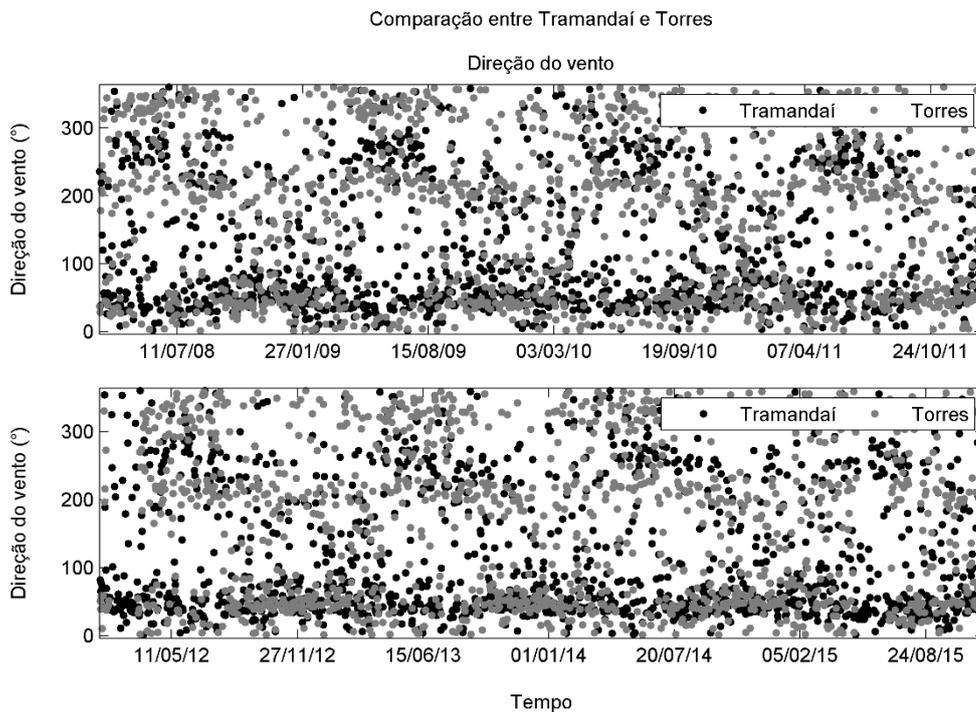
381

382

383

384

B



385

386

387 Figura 6. A) Velocidade (m/s) e B) direção (°) do vento para as estações automáticas do
 388 INMET – Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) – entre 09/03/2008 e 25/11/2015.

389 *Figure 6. A) Speed (m/s) and B) direction (°) of wind for INMET automatic stations -*
 390 *Tramandaí (in black) and Towers (in gray) - between 03/03/2008 and 25/11/2015.*

391 Quadro 1. Diagrama de distribuição conjunta de velocidade e direção dos ventos de Torres (entre 09/03/2008 e 25/11/2015). A escala de cores, do
392 menor para o maior valor, vai do cinza claro ao cinza escuro.

393 *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*
394 *highest value, ranges from light gray to dark gray.*

TORRES	Direção																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	11,121954
1 - 2	2729	1389	1120	824	1154	837	580	446	566	595	987	630	612	804	2450	3604	19327	28,576709
2 - 3	940	1427	1636	1309	1202	800	638	588	951	903	1112	241	170	151	362	704	13134	19,419801
3 - 4	147	567	1708	1710	755	164	224	427	1033	1072	956	132	76	89	89	90	9239	13,660693
4 - 5	34	143	1486	1691	418	38	90	184	906	1135	706	78	47	47	48	19	7070	10,453631
5 - 6	10	38	1117	1024	185	13	39	71	583	995	431	30	44	27	14	4	4625	6,8384788
6 - 7	3	4	547	522	79	5	23	31	238	682	197	23	17	22	8	2	2403	3,5530518
7 - 8	1	2	214	301	37		6	6	111	366	89	4	9	11	3	1	1161	1,716643
8 - 9		1	71	111	5		5	6	38	152	28	3	3	2	2		427	0,6313579
9 - 10			21	26	5		1		13	61	12		1	3	2		145	0,2143956
10 - 11			6	14				4	3	15	2		1				45	0,0665366
11 - 12			1	4				1	2	3	1						12	0,0177431
12 - 13								1	1	1			2				5	0,007393
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		

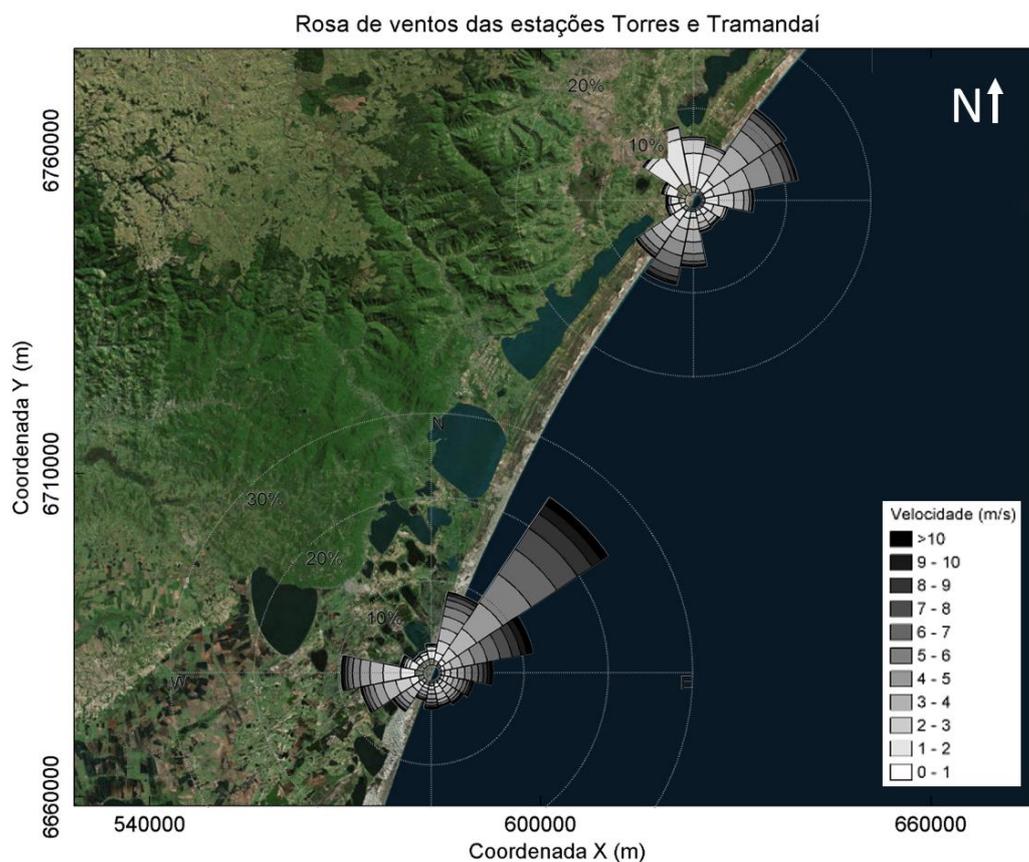
395

396 Quadro 2. Diagrama de distribuição conjunta de velocidade e direção dos ventos de Tramandaí (entre 09/03/2008 e 25/11/2015). A escala de
397 cores, do menor para o maior valor, vai do cinza claro ao cinza escuro.

398 *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
399 lowest to highest value, ranges from light gray to dark gray.*

TRAMANDAÍ	Direção																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	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	31	14	21	32	77	9		1	1877	2,78
10-11		18	383	256	113	39	18	5	9	2	6	6	28	13			896	1,32
11-12		5	151	121	41	16	10	6	7	5	1	2	16	4			385	0,57
12-13		3	48	40	9	8	7	4	1		1		7	1			129	0,19
13-14		1	12	11	3	5	5	2	4		1		2	3			49	0,07
14-15			2	7	5	2	2	1		1			3				23	0,03
15-16			1	3	1				1								6	0,01
16-17				2	1												3	0,00
17-18								1									1	0,00
18-19								1									1	0,00
19-20				2													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)	7,8	13,8	15,9	20	16,4	14,7	18,8	14,6	15,6	14,2	13,1	11,4	14,7	13,7	8,5	9,9		

400 Percebe-se uma componente de W pouco frequente em Torres e bastante
 401 frequente em Tramandaí, associada a Serra Geral. Em Torres, sua presença impede que
 402 os ventos vindos de W alcancem a porção costeira; já em Tramandaí, os ventos possuem
 403 pista praticamente livre para a costa. Essa interferência da Serra Geral também pode ser
 404 observada quanto aos ventos de N, NW e NNW: ao norte de Torres, o embasamento se
 405 afasta da costa, permitindo a passagem dos ventos vindos dessas direções, o que não
 406 ocorre em Tramandaí, pois ao norte dessa localidade, o embasamento se aproxima da
 407 costa, barrando os ventos dessas direções (Figura 7).



408
 409 Figura 7. Rosa de ventos das estações Torres e Tramandaí para o período entre
 410 09/03/2008 e 25/11/2015. Imagem modificada do *Google Earth*.

411 *Figure 7. Wind rose of Torres and Tramandaí stations for the period between*
 412 *09/03/2008 and 11/25/2015. Modified image of Google Earth.*

413
 414

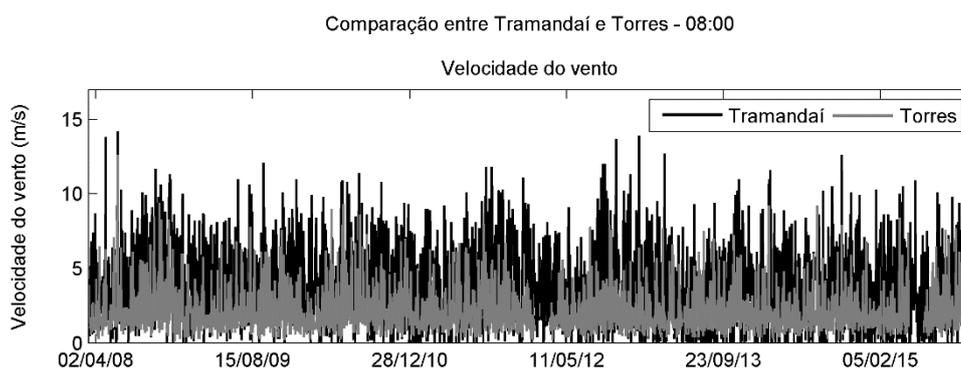
415 Nas análises das séries por horário, para todas as horas a velocidade do vento de
 416 Tramandaí foi superior a Torres. Do meio dia às 21:00, a diferença entre as velocidades
 417 diminuiu, pois Torres apresentou um acréscimo de velocidade nesse intervalo de horas
 418 (a diferença de velocidade entre as estações, por exemplo, às 08:00 foi de 3,12 m/s e às

419 17:00 de 2,27 m/s, obtidas por meio do RMSE), e as direções se concentram em 60 e
 420 200°. Já para os demais horários, as direções se concentram entre 0° e 50° e entre 200° e
 421 360°. Portanto, os ventos NE e E parecem ter predominância entre meio dia e 21:00, já
 422 os de NNE e ENE de 22:00 a 11:00. Nas Figuras 8 e 9 estão apresentados os gráficos
 423 para as 08:00 e 17:00, respectivamente, exemplificando os dois padrões citados acima.

424

425 A

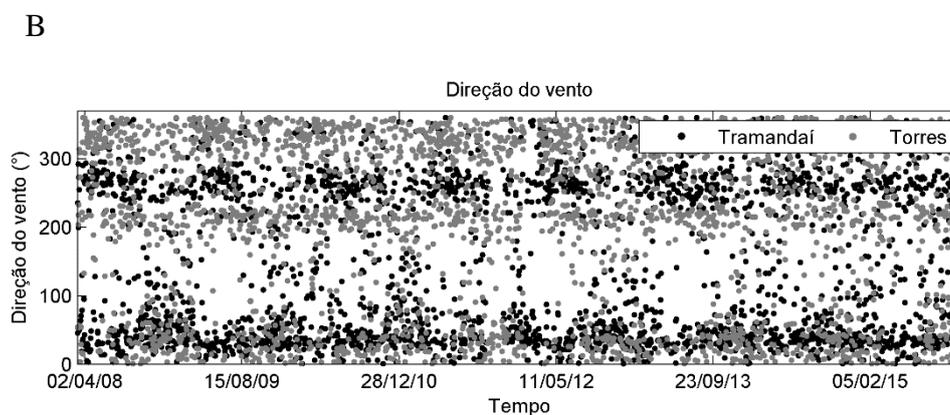
426



428

429

430



432

433 Figura 8. A) Velocidade (m/s) e B) direção (°) do vento para as estações automáticas do
 434 INMET – Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) – entre 09/03/2008 e 25/11/2015
 para o horário 08:00.

435 *Figure 8. A) Speed (m/s) and B) direction (°) of wind for INMET automatic stations -*
 436 *Tramandaí (in black) and Towers (in gray) - between 03/09/2008 and 25/11/2015 to*
 437 *08:00 hours.*

438

439

440

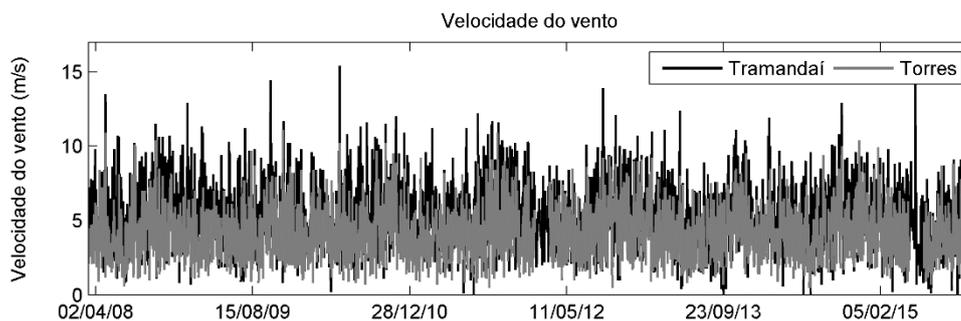
441

442

443

A

Comparação entre Tramandaí e Torres - 17:00

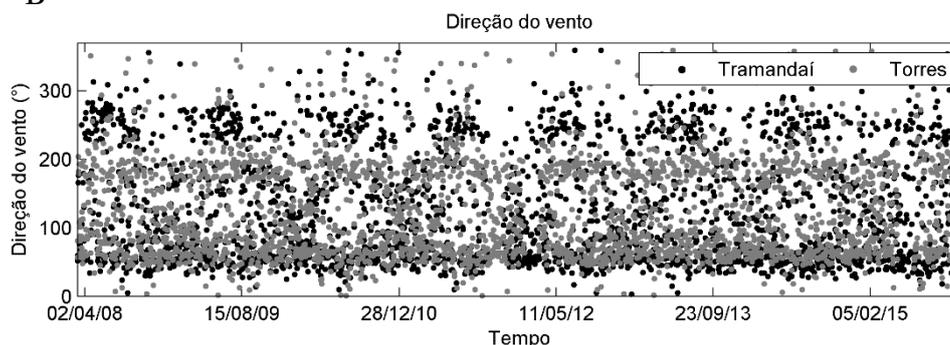


444

445

446

B



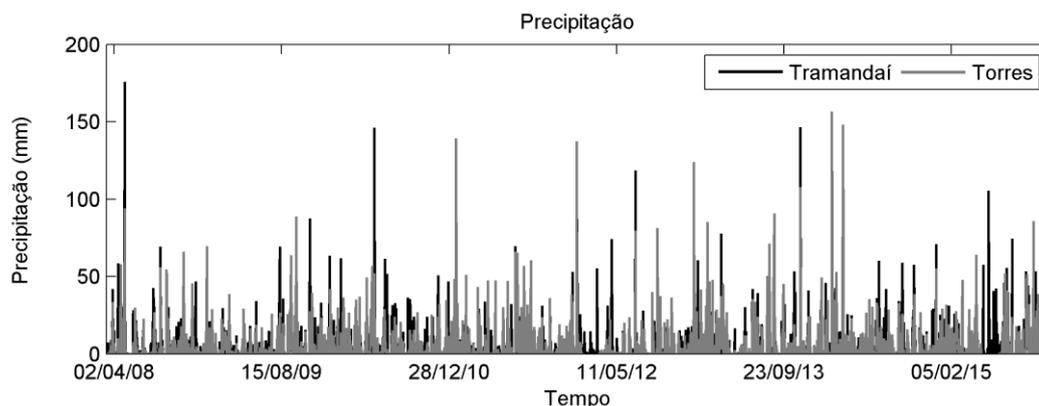
447

448 Figura 9. A) Velocidade (m/s) e B) direção (°) do vento para as estações automáticas do
 449 INMET – Tramandaí (em preto) e Torres (em cinza) – entre 09/03/2008 e 25/11/2015
 450 para o horário 17:00.

451 *Figure 9. A) Speed (m/s) and B) direction (°) of the wind for the automatic stations of*
 452 *INMET - Tramandaí (in black) and Torres (in gray) - between 03/09/2008 and*
 453 *25/11/2015 to 17:00 clock.*

454

455 Quanto à precipitação, Tramandaí apresentou menores valores: Torres
 456 apresentou um total de 12708,2 mm de chuva ao longo de todo o período, enquanto
 457 Tramandaí apresentou 11990,6 mm, portanto em Torres houve 71,8 cm a mais em
 458 aproximadamente 7 anos, equivalendo a 10,3 cm a mais que Tramandaí por ano. Em
 459 30,8% do tempo (867 dias), precipitou mais em Torres; em 28% do tempo (789 dias),
 460 choveu mais em Tramandaí; já em 41,2% (1162 dias) os valores para ambas as
 461 localidades foram iguais ou não houve precipitação (Figura10). A diferença entre as
 462 séries foi obtida numericamente por meio do RMSE, e foi de 9,91 mm.



463

464 Figura 10. Precipitação (mm) para as estações automáticas do INMET – Tramandaí
 465 (em preto) e Torres (em cinza) – entre 09/03/2008 e 25/11/2015.

466 *Figure 10. Precipitation (mm) for the automatic stations of INMET - Tramandaí (in*
 467 *black) and Towers (in gray) - between 03/09/2008 and 11/25/2015.*

468

469 Foram calculados os potenciais de transporte de areia para as duas estações, para
 470 o período de 09/03/2008 a 25/11/2015: para Tramandaí foi 50,85 e para Torres 4,65. O
 471 tamanho de grão utilizado nos cálculos para as duas localidades foi 2,5 ϕ (ou 0,177
 472 mm), de acordo com medições de Martinho (2008).

473

474 *4.3 Dados da Estação Meteorológica de Imbé, dados da Estação Convencional de*
 475 *Torres e dados da Lagoa de Itapeva*

476 Imbé apresentou velocidades semelhantes a Itapeva ao longo da maior parte do
 477 tempo, porém ocorreram alguns picos de velocidade em Imbé (Figura 11A). Como não
 478 se observou um padrão constante de dominância de uma estação em relação a outra,
 479 realizou-se um filtro para as direções de 22,5° a 90°, isolando, portanto, os ventos de
 480 interesse desse estudo (NNE, NE, ENE e E). Ao filtrar a série, percebe-se que dois
 481 desses picos referem-se a esses ventos, com mais de 15 m/s (Figura 11B).

482

483

484

485

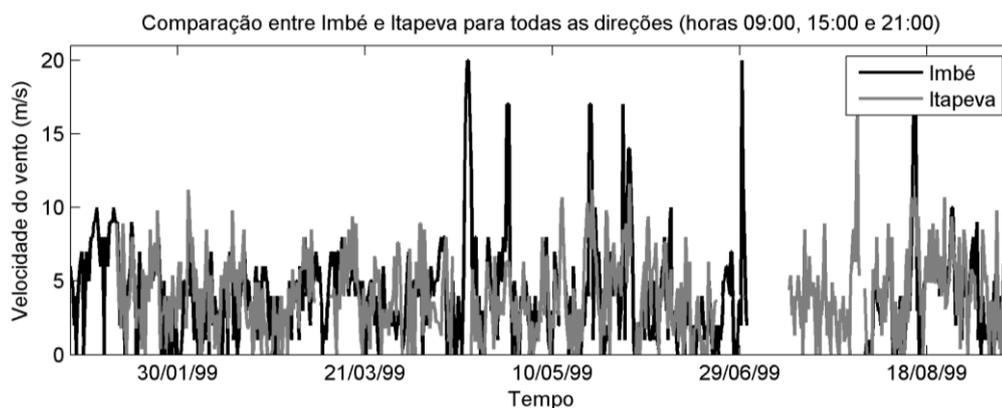
486

487

488

489

A

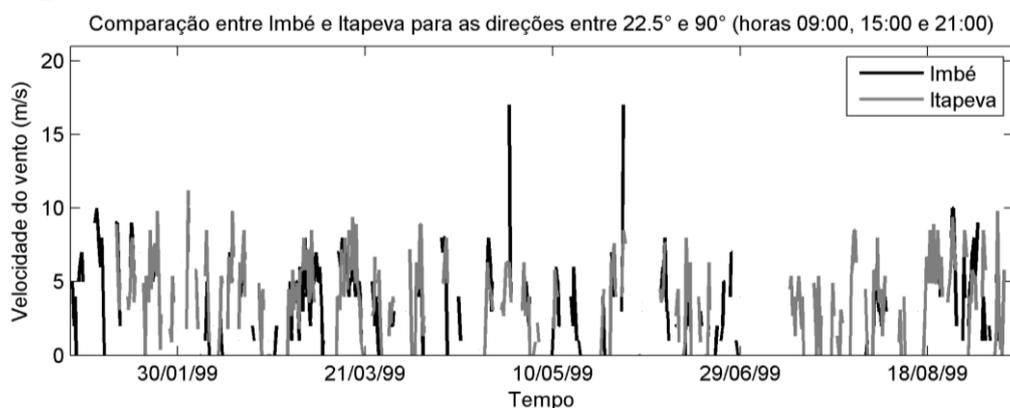


490

491

492

B



493

494 Figura 11. Velocidade do vento (m/s) para as séries obtidas dos dados da
 495 Superintendência de Portos do Estado do RS para Imbé (em preto) e dos dados da
 496 Lagoa de Itapeva (em cinza), entre 01/01/1999 e 09/09/1999. A) Séries brutas e B)
 497 séries referentes apenas às direções de NNE a E (de 22,5° a 90°).

498 *Figure 11. Wind speed (m/s) for the series obtained from the Superintendency of Ports*
 499 *of the State of RS for Imbé (in black) and from the data of the Lagoa de Itapeva (in*
 500 *gray), between January 1, 09/09/1999. A) Gross series and B) series referring only*
 501 *NNE to E directions (22.5° to 90°).*

502

503 Itapeva e Torres apresentaram um padrão muito similar de velocidade do vento,
 504 porém há maiores velocidades em Itapeva (Figura 12A). Ao filtrar a série para as
 505 direções de 22,5° a 90°, é possível notar que nenhuma das localidades se destacou com
 506 picos de velocidade (Figura 12B).

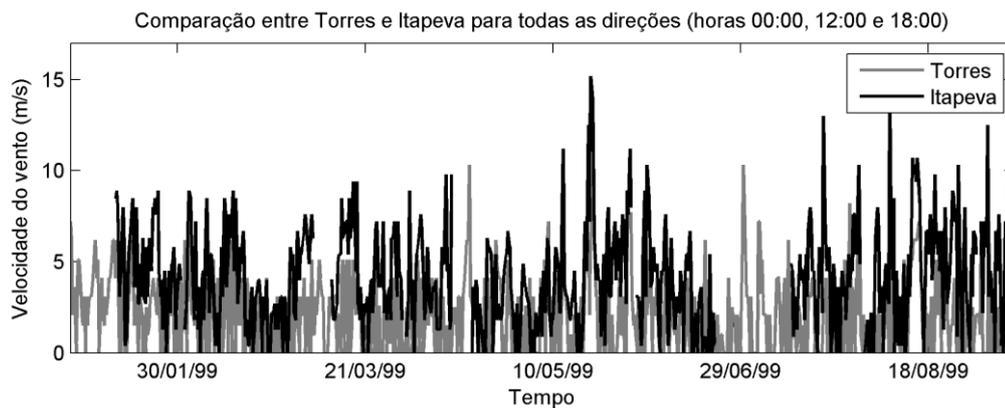
507

508

509

510

A

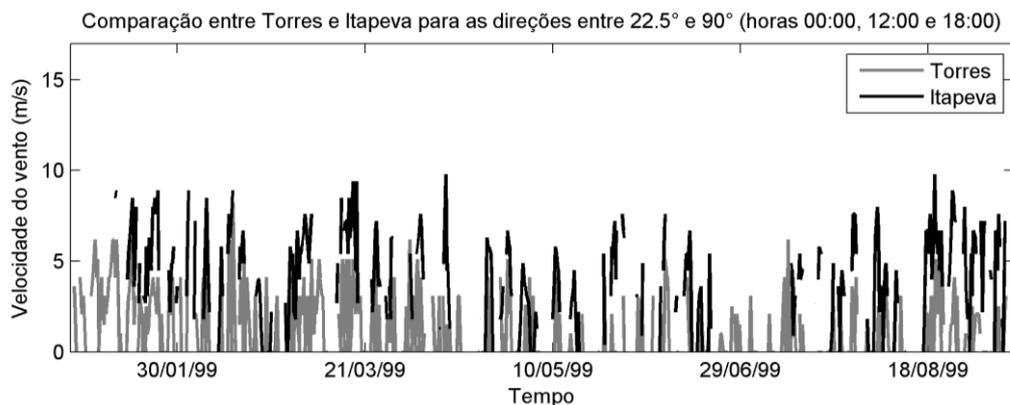


511

512

513

B



514

515 Figura 12. Velocidade do vento (m/s) para as séries obtidas dos dados da Estação
 516 Convencional do INMET para Torres (em cinza) e dos dados da Lagoa de Itapeva (em
 517 preto), entre 01/01/1999 e 09/09/1999. A) Séries brutas e B) séries referentes apenas às
 518 direções de NNE a E (de 22,5° a 90°).

519 *Figure 12. Wind speed (m/s) for the series obtained from the INMET Conventional*
 520 *Station data for Torres (in gray) and from the Itapeva Lagoon data (in black), between*
 521 *01/01/1999 and 09/09/1999. A) Gross series and B) series referring only NNE to E*
 522 *directions (22.5° to 90°).*

523

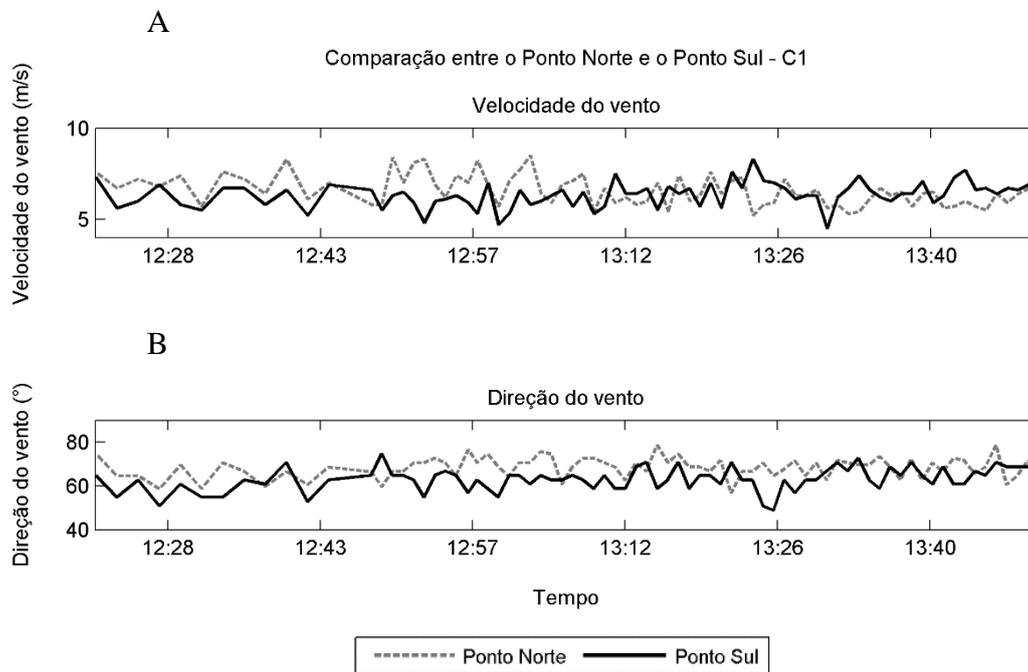
524 4.4 Medições simultâneas de campo a norte e a sul de Xangri-lá

525 Os resultados das medições de campo podem ser observados nas Figuras 13 e
 526 14 (a localização dos pontos está na Figura 3). De forma geral, as duas estações
 527 apresentaram comportamento semelhante em termos de velocidade do vento, para as
 528 duas campanhas de medição de dados. O valor de RMSE calculado para as duas séries
 529 de velocidade foi 1,1875 m/s na primeira atividade de campo (C1) e 0,4331 m/s na

530 segunda (C2), havendo, portanto, maiores diferenças entre as séries da primeira
 531 campanha. Essa relação também foi observada para a direção do vento.

532

533



534

535

536

537

538 Figura 13. A) Velocidade (m/s) e B) direção do vento para os dados medidos na C1, em
 539 28/10/2015, para os pontos Norte e Sul.

540 *Figure 13. A) Speed (m/s) and B) wind direction for the data measured at C1 on*
 541 *10/28/2015, for North and South points.*

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

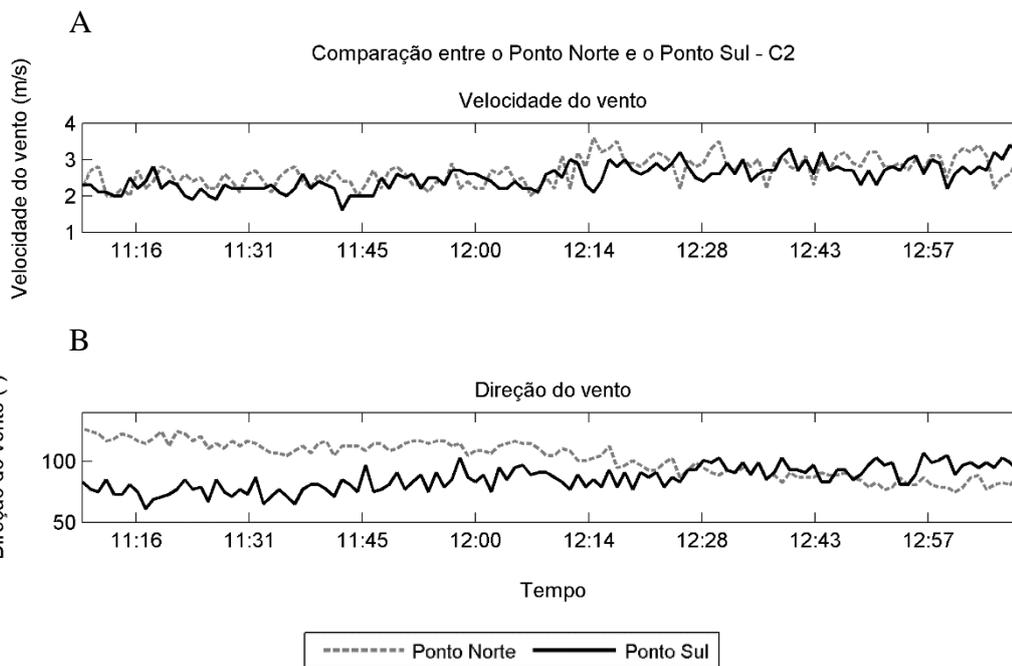
558

559

560

561

562



563

564

565

566

567

568 Figura 14. A) Velocidade (m/s) e B) direção do vento para os dados medidos na C2, em
 569 20/01/2016, para os pontos Norte Sul.

570 *Figure 14. A) Speed (m/s) and B) wind direction for the data measured at C2 on*
 571 *20/01/2016, for North and South points.*

572

573 5 Discussão

574

575 5.1 Dados das Estações Convencional e Automática de Torres

576 Entre as estações convencional e automática de Torres, apesar de apresentarem
 577 localização próxima, houve diferenças entre as séries de dados (valores de correlação
 578 abaixo de 0,95), possivelmente associadas à diferente altura das estações, metodologia
 579 de obtenção e armazenamento dos dados. Trabalhos anteriores (Sentelhas *et al.*, 1997;
 580 Teixeira *et al.*, 2003; Rubert *et al.*, 2006) também identificaram diferenças entre os
 581 elementos das estações automáticas e convencionais. Rubert *et al.* (2006) constatou
 582 diferença entre os dados de vento da estação convencional (medidos com cata-vento) e
 583 os dados da estação automática (medidos com sensor automático) em Rio Grande, RS.
 584 Esses resultados sugerem que há existência de defasagem nos dados da estação
 585 convencional devido ao equipamento utilizado, evidenciando a importância da coleta
 586 por sensor automático. Teixeira *et al.* (2003), que comparou outras variáveis, como
 587 temperatura do ar, a umidade relativa e a radiação solar incidente, nas estações

588 agrometeorológicas convencional e automática, constatou que, devido às diferenças na
589 precisão e na frequência de amostragem dos sensores, os dados apresentaram
590 discrepâncias.

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

596

597 *5.2 Dados das Estações Automáticas de Torres e Tramandaí*

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

609 Por exemplo, em termos de topografia, terrenos planos apresentam um valor de
610 índice maior que vales profundos, permitindo uma carga maior de vento; em termos de
611 rugosidade, superfícies lisas de grandes dimensões (com mais de 5 km de extensão)
612 medidas na direção e sentido do vento incidente apresentam maiores valores que
613 terrenos cobertos por obstáculos grandes e altos (com altura média de 25 m ou mais),
614 gerando maiores cargas de vento (ABNT, 1988).

615 Dessa forma, a proximidade das escarpas da Serra Geral em Torres pode gerar
616 uma redução da carga de vento em relação a Tramandaí, visto que a Serra Geral passa a
617 se distanciar da costa. Esse princípio também pode ser utilizado para tentar explicar o
618 comportamento diferenciado da formação da fase moderna do campo de dunas
619 transgressivo presente, sobre a barreira holocênica, no Litoral Norte do RS. A norte de
620 Xangri-lá, onde a Serra Geral ainda está presente, pode haver uma perda de carga de

621 vento devido ao atrito com esse obstáculo. Conseqüentemente, haveria uma perda de
622 energia para o transporte dos sedimentos. Já ao sul de Xangri-lá, onde a Serra Geral
623 passa a ocorrer de forma interiorizada, haveria uma diminuição da perda de carga de
624 vento, permitindo um maior transporte sedimentar e conseqüente avanço do campo de
625 dunas. Essas hipóteses podem ser testadas em trabalhos posteriores, utilizando
626 simulações com túneis de vento, por exemplo, a fim de avaliar se há alteração da carga
627 do vento devido ao obstáculo Serra Geral. Bigarella (1975) *apud* Giannini *et al.* (2005),
628 ao estudar os campos de dunas transgressivos da Ilha de Santa Catarina, também
629 defenderam que obstáculos topográficos locais são fortemente responsáveis por
630 mudanças no regime de ventos e no sentido de migração de alguns desses campos.

631 Tomazelli (1993) analisou o regime de ventos regional com base nos dados de
632 duas estações meteorológicas: a estação de Imbé, situada próximo ao campo de dunas
633 de Cidreira, e a estação de Torres, posicionada próximo ao campo de dunas de Itapeva.
634 A série de dados apresenta 13 anos de duração (de 01/1970 a 12/1982). Nas duas
635 estações meteorológicas, o vento mais frequente foi de NE, assim como encontrado
636 nesse estudo. Segundo o autor, embora exista uma boa consistência nos registros das
637 duas estações (Imbé e Torres), observam-se algumas diferenças significativas que
638 podem ser atribuídas principalmente a efeitos topográficos locais e a posição das
639 estações com relação ao Planalto da Serra Geral; ou seja, sua imponente topografia
640 exerce influência no padrão de circulação dos ventos.

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

651 Para os cálculos de DP, são consideradas apenas as classes acima de 5,6 m/s,
652 uma vez que abaixo desse valor, a velocidade do vento é menor que o estresse de
653 cisalhamento do vento para o tamanho de grão médio de 2,5 ϕ (0,177 mm). Dessa

654 forma, para Tramandaí 65,3% dos dados foram desconsiderados; e para Torres 93,1%, o
655 que resulta em um valor reduzido de DP.

656 Os valores de DP indicam que Tramandaí apresenta potencial de transporte de
657 areia muito superior a Torres e, portanto, há favorecimento da migração das dunas nas
658 proximidades de Tramandaí, provavelmente com influência até Xangri-lá. Essa
659 migração também é favorecida em locais com menor precipitação, uma vez que
660 menores valores de umidade geram menor coesão dos grãos arenosos e menor
661 propensão ao desenvolvimento de vegetação fixadora de dunas. Ou seja, por apresentar
662 maior DP e menor precipitação, em Tramandaí há o favorecimento do desenvolvimento
663 de campos de dunas transgressivos.

664 Tomazelli (1993) também calculou os DP pelo método de Fryberger & Dean
665 (1979), porém para as localidades de Torres, Imbé e Rio Grande durante o período de
666 1970 e 1982. Os valores encontrados foram bastante superiores aos encontrados nesse
667 trabalho: 1441,7 para Imbé (localizado próximo a Tramandaí) e 800,5 para Torres.
668 Essas diferentes magnitudes encontradas nos dois trabalhos podem estar relacionadas ao
669 uso de séries temporais de intervalos e bases diferentes.

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

679

680 *5.3 Dados da Estação Meteorológica de Imbé, dados da Estação Convencional de* 681 *Torres e dados da Lagoa de Itapeva*

682 Ao filtrar as séries de Imbé e Itapeva nas direções 22,5 a 90°, percebe-se que há
683 dois picos de velocidade (acima de 15 m/s) apenas em Imbé, indicando que há
684 diferenças de velocidade nessas localidades quando ocorre os ventos de NNE a E,
685 chegando com maior velocidade, portanto, em Imbé (Figura 11B). Ao realizar o mesmo
686 filtro para Itapeva e Torres, é possível notar que nenhuma das localidades se destacou

687 com picos de velocidade (Figura 12B), indicando que os ventos de NNE a E alcançam
688 ambas as localidades de forma similar, possivelmente associada à proximidade
689 geográfica delas e, conseqüentemente, características em comum, como a presença da
690 Serra Geral imediatamente a oeste.

691

692 *5.4 Medições de campo a norte e a sul de Xangri-lá*

693 A maior diferença entre as duas séries do C1 em relação a C2 pode estar
694 relacionada a escolha dos pontos de medição: na C1, o ponto mais ao sul (em
695 Tramandaí) apresentava edificações em suas proximidades, as quais podem ter
696 interferido na velocidade e direção do vento, enquanto o ponto mais ao norte (em Capão
697 da Canoa) não apresentava tais obstáculos. Segundo Lopes (1992), ao entrar em contato
698 com a superfície de qualquer objeto, o vento tende a forçá-lo ao movimento juntamente
699 com ele, e reciprocamente, este corpo com o qual o vento contata, também introduz
700 alterações nas condições do escoamento, tornando-as diferentes das verificadas a uma
701 grande distância. Então, para a C2, foram escolhidos dois pontos de medição com
702 características do entorno mais semelhantes, sem edificações expressivas, resultando em
703 séries com comportamento mais similar.

704 O regime de vento obtido em medições simultâneas de curta duração (2 h) nas
705 proximidades de Capão da Canoa e Tramandaí se apresentou muito semelhante,
706 especialmente em termos de velocidade. Como observado nas análises das séries do
707 INMET para Torres e Tramandaí, a diferença entre as séries de velocidades diminuiu no
708 período entre meio dia e 21:00, quando comparada aos outros horários. As medições de
709 campo foram realizadas entre 12:20 e 13:50 na C1 e entre 11:10 e 13:10 na C2, ou seja,
710 praticamente inseridas nesse período em que as diferenças entre as estações foram
711 menores. Portanto, essa diferença reduzida observada entre os pontos de medição pode
712 estar associada ao horário em que as medições foram realizadas. Por motivos de
713 logística, necessidade do deslocamento até os locais de medições e da instalação dos
714 materiais, não foi possível realizar novas medições iniciando no período da manhã.

715 Outra possível explicação para não terem sido observadas velocidades maiores
716 no ponto a sul de Xangri-lá em relação ao ponto mais ao norte seria a curta duração das
717 medições, com séries de até duas horas, podendo as medições terem coincidido com
718 intervalos de tempo em que a velocidade do vento nas duas localidades se igualou.
719 Esses curtos intervalos de horas, com valores mais semelhantes entre as estações,

720 tendem a ser menos percebidos nas séries históricas do INMET, uma vez que essas têm
721 uma escala temporal muito maior, de vários anos.

722

723 **6 Conclusões**

724

725 As estações meteorológicas convencional e automática de Torres, apesar de
726 possuírem localização próxima, apresentaram diferenças significativas entre seus dados
727 de velocidade e direção do vento.

728 Na comparação entre os registros automáticos de Tramandaí e Torres, para o
729 período analisado (entre 09/03/2008 e 25/11/2015), Tramandaí apresentou maiores
730 velocidades de vento e menores de precipitação em relação a Torres. A diferença entre
731 as séries de velocidades diminuiu no período entre meio dia e 21:00, podendo explicar a
732 semelhança dos resultados dos pontos Norte e Sul das campanhas C1 e C2, que foram
733 levantados próximo ao meio dia (entre 11:10 e 13:50). Medições de campo mais longas
734 e em períodos entre 21:00 e meio dia, podem apresentar maiores diferenças entre os
735 pontos de campo. Ainda comparando os registros automáticos de Tramandaí e Torres, o
736 vento mais frequente foi de NE, ocorrendo em 12,14% do tempo em Torres e 24,02%
737 em Tramandaí. Por ano, em Torres, choveu aproximadamente 10,3 cm a menos que
738 Tramandaí.

739 Há a possibilidade de que a proximidade das escarpas da Serra Geral em Torres
740 gere uma redução da carga de vento, que é diretamente proporcional à velocidade do
741 vento, em relação a Tramandaí, onde a Serra Geral se distancia da costa. A norte de
742 Xangri-lá, onde a Serra Geral ainda está presente, pode haver uma perda de carga de
743 vento (percebida pela redução da velocidade) devido ao atrito com esse obstáculo.
744 Consequentemente, haveria uma perda de energia para o transporte dos sedimentos. Já
745 ao sul de Xangri-lá, onde a Serra Geral passa a ocorrer de forma interiorizada, pode
746 haver uma diminuição da perda de carga de vento (pois as velocidades do vento são
747 maiores), permitindo um maior transporte sedimentar e consequente avanço do campo
748 de dunas. Essas hipóteses poderão ser testadas em trabalhos posteriores, utilizando
749 simulações com túneis de vento, por exemplo.

750 Devido a maior velocidade dos ventos em Tramandaí, o potencial de transporte
751 de areia (DP) nessa localidade foi superior a Torres, indicando o favorecimento da
752 migração das dunas nas proximidades de Tramandaí. O comportamento desigual da

753 migração das dunas pode estar relacionado a maior velocidade e frequência dos ventos
754 NNE, NE, ENE e E em Tramandaí (ou seja, ao sul de Xangri-lá). A menor precipitação
755 também favorece um transporte de areia mais eficiente ao sul de Xangri-lá.

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

770

771 **Agradecimentos.** Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul
772 (UFRGS), ao Instituto de Geociências (IG) e ao Centro de Estudos de Geologia Costeira
773 e Oceânica (CECO) pelo fornecimento da estrutura e do espaço físico. Patrícia Puhl e
774 Sergio Dillenburg agradecem ao CNPq pela concessão de suas Bolsas de Mestrado e de
775 Produtividade em Pesquisa, respectivamente.

776

777

778 **Referências bibliográficas**

779

780 ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1988. *NBR-6123 - Forças Devidas*
781 *ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, ABNT, 66p.

782 Balduino Rambo, S.J. 1956. *A Fisionomia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre,
783 Selbach, 510p.

- 784 Calliari, L.R., Pereira, P.S., de Oliveira, A.O. & Figueiredo, S.A. 2005.
785 Variabilidade das Dunas Frontais no Litoral Norte e Médio do Rio Grande do
786 Sul, Brasil. *Gravel*, (3): 15-30.
- 787 Cardoso, L.S., Silveira, A.L.L. & Motta Marques, D.M.L. 2003. A ação do vento como
788 gestor da hidrodinâmica na lagoa Itapeva (Litoral Norte do Rio Grande do Sul-
789 Brasil). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(3): 5-15.
- 790 Dillenburg, S.R., Roy, P.S., Cowell, P.J. & Tomazelli, L.J. 2000. Influence of
791 Antecedent Topography on Coastal Evolution as Tested by the Shoreface
792 Translation Barrier Model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16(1): 71-81.
- 793 Dillenburg, S.R., Tabajara, L.L., Dillenburg, L.R. & Tomazelli, L.J. 2001. Fatores
794 controladores da formação das dunas frontais e dos campos de dunas
795 transgressivas do Litoral Norte do Rio Grande do Sul: uma introdução ao
796 problema. In: CONGRESSO DA ABEQUA: Global Changes and the
797 Quaternary, 8, 2001, Imbé, *Boletim de Resumos...* Imbé, ABEQUA, p. 145-147.
- 798 Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P. & Silva,
799 D.B. 2006. Stratigraphy and evolution of a prograded transgressive dunefield
800 barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 132-135.
- 801 Figueiredo, S.A. 2005. *Sedimentologia e suas implicações na morfodinâmica das praias*
802 *adjacentes às desembocaduras lagunares e fluviais da costa do Rio Grande do*
803 *Sul*. Rio Grande, 177p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação
804 em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia,
805 Universidade Federal do Rio Grande.
- 806 Fryberger, S.G. & Dean, G. 1979. Dune forms and wind regime. In: Mckee, E.D. (Ed.).
807 *A Study of Global Sand Seas*, Washington, U.S. Government Printing Office, p.
808 137-169.
- 809 Giannini, P.C.F., Assine, M.L., Barbosa, L.M., Barreto, A.M.F., Carvalho, A.M.,
810 Claudino-Sales, V., Maia, L.P., Martinho, C.T., Peulvast, J.P., Sawakuchi, A.O.
811 & Tomazelli, L.J. 2005. Dunas e paleodunas eólicas costeiras e interiores. In:
812 Souza, C.R.G; Suguio, K., Oliveira, A.M.S., Oliveira, P.E. (Eds.) *Quaternário*
813 *do Brasil*. Ribeirão Preto, Holos Editora. p. 235-257.
- 814 Grimm, A.M., Ferraz, S.E.T. & Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in Southern
815 Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11(11):
816 2863-2880.

- 817 Hasenack, H. & Ferraro, L.W. 1989. Considerações sobre o clima da região de
818 Tramandaí, RS. *Pesquisas em Geociências*, (22): 53-70.
- 819 Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P., Tomazelli, L.J. & Ayup-
820 Zouain, R.N. 2007. Morphology of the Itapeva to Tramandai transgressive
821 dunefield barrier system and mid- to late Holocene sea level change. *Earth*
822 *Surface Processes and Landforms*, 32(3): 407-414.
- 823 Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N.,
824 Esteves, L.S., Gruber, N.L.S., Toldo Junior, E.E., Tabajara, L.L.C. de A. &
825 Clerot, L.C. P. 2005. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields?
826 Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system,
827 Southern Brazil. *Anais da academia brasileira de ciências*, 77(3): 493-508.
- 828 INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2011a. *Rede de Estações Meteorológicas*
829 *Automáticas do INMET*. Brasília, INMET, 11p. (Nota Técnica n.
830 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET).
- 831 INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2011b. Estação Meteorológica de
832 Observação de Superfície Convencional. Disponível em:
833 <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 13 jan. 2016.
- 834 Lima, S.F., Almeida, L.E.S.B. & Toldo Junior, E.E. 2001. Estimativa da Capacidade
835 do Transporte Longitudinal de Sedimentos a partir de Dados de Ondas para a
836 costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28(2): 99-107.
- 837 Lopes, A.V. 1992. *A ação do vento e a resposta dinâmica de edifícios altos*. Porto,
838 247p. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil,
839 Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
- 840 Martinho, C.T. 2008. *Morfodinâmica e evolução de campos de dunas transgressivos*
841 *quaternários do litoral do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 241p. Tese de
842 Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de
843 Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 844 Martinho, C.T., Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. 2008. Mid to late Holocene evolution of
845 transgressive dunefields from Rio Grande do Sul coast, southern Brazil. *Marine*
846 *Geology*, 256: 49-64.
- 847 Martinho, C.T., Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. 2009. Wave Energy and Longshore
848 Sediment Transport Gradients Controlling Barrier Evolution in Rio Grande do
849 Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 25(2): 285-293.

- 850 Martinho, C.T., Hesp, P.A. & Dillenburg, S.R. 2010. Morphological and temporal
851 variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio
852 Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, 117: 14-32.
- 853 Rubert, J., dos Santos, M.B. & Krusche, N. 2006. Comparação entre medidas de
854 velocidade do vento em Rio Grande, RS, de 2001 a 2006. *In: CONGRESSO*
855 *BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2006, Florianópolis, *Anais...*
856 *Florianópolis*, XIV CBMET.
- 857 SEMC. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. 2002. Atlas Eólico: Rio Grande
858 do Sul. Disponível em: <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/>> Acesso
859 em: 20 fev. 2016.
- 860 Sentelhas, P.C., Moraes, S.O., Piedade, S.M.S., Pereira, A.R., Angelocci, L.R. & Marin,
861 F.R. 1997. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações
862 convencional e automática. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(2): 215-
863 221.
- 864 Teixeira, A.H.C., Bassoi, L.H., Reis, V.C.S, Silva, T.G.F., Ferreira, M.N.L. & Maia,
865 J.L.T. 2003. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações
866 agrometeorológicas automática e convencional. *Revista Brasileira de*
867 *Fruticultura*, 25(3): 457-460.
- 868 Tomazelli, L.J., 1993. O regime de ventos e taxa de migração das dunas eólicas
869 costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 20(1): 18-26.
- 870 Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G. & Rosa, M.L.C.C. 2008.
871 Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos
872 de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em*
873 *Geociências*, 35(2): 47-55.
- 874 Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas*
875 *Técnicas*, (8): 1-45.
- 876 Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 2007. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese
877 e paisagem natural. *In: Becker, F.G., Ramos, R.A. & Moura, L.A. (Eds.).*
878 *Biodiversidade: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes,*
879 *Planície Costeira do Rio Grande do Sul*. Brasília, Editora SCAN, p. 20-33.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estações meteorológicas convencional e automática de Torres, apesar de possuírem localização próxima, apresentaram diferenças significativas entre seus dados de velocidade e direção do vento.

Na comparação entre os registros automáticos de Tramandaí e Torres, para o período analisado (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 meio dia e 21:00, podendo explicar a semelhança dos resultados dos pontos Norte e Sul das campanhas C1 e C2, que foram levantados próximo ao meio dia (entre 11:10 e 13:50). Medições de campo mais longas e em períodos entre 21:00 e meio dia, 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. Por ano, em Torres, choveu aproximadamente 10,3 cm a menos que Tramandaí.

Há a possibilidade de que a proximidade das escarpas da Serra Geral em Torres gere uma 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 presente, pode haver uma perda de carga de vento (percebida pela redução da velocidade) devido ao atrito com esse obstáculo. Consequentemente, haveria uma perda de energia para o transporte dos sedimentos. Já ao sul de Xangri-lá, onde a Serra Geral passa a ocorrer de forma interiorizada, pode haver uma diminuição da perda de carga de vento (pois as velocidades do vento são maiores), permitindo um 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.

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 um 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, que os campos de dunas a sul dessa localidade.

Anexo



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 10 de janeiro de 2017.

Aos
Patrícia Puhl & Sérgio Dillenburg

Venho comunicar o recebimento do manuscrito listado, submetido para avaliação publicação na revista *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Entretanto, para dar prosseguimento às atividades editoriais, é necessária atenção aos seguintes itens, necessitando, portanto, de nova submissão.

O presente manuscrito deve ser ajustado de acordo com as normas da revista, pois ele contém alguns problemas de forma. Note que as principais observações estão indicadas no próprio texto. As tabelas devem ser padronizadas de acordo com o modelo disponível no site da revista. As figuras devem conter legendas traduzidas para o inglês. Por fim, solicito que as referências bibliográficas sejam revisadas de acordo com as normas da revista. Ajustar uma a uma.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. Uma nova versão é aguardada até o dia 20/01/2017. Por favor, renomear o arquivo para "Man 652 Puhl & Dillenburg v2". Inserir na mensagem de e-mail, em assunto, Man 652 Puhl & Dillenburg v2.

Título: *O campo de dunas transgressivo da barreira costeira holocênica no Litoral Norte do Rio Grande do Sul: possíveis controles do seu desenvolvimento.*

Autores: Patrícia Puhl & Sérgio Dillenburg.

Atenciosamente,

Dr. Tiago Jalowitzki
Editor Adjunto

Pesquisas em Geociências
Instituto de Geociências – Laboratório de Geologia Isotópica
Av. Bento Gonçalves, nº 9500 - Prédio 43129
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Email: tiago.jalowitzki@ufrgs.br