

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

**Clima de Ondas, Potencial Energético e o Transporte de
Sedimentos no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**

Felipe Caetano Sprovieri

ORIENTADOR – Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Júnior

Porto Alegre – 2018

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

**Clima de Ondas, Potencial Energético e o Transporte de
Sedimentos no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**

Felipe Caetano Sprovieri

ORIENTADOR – Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Júnior

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eduardo Puhl - – Instituto de Hidráulica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Prof. Dr. Eduardo Siegle – Instituto Oceanográfico – Universidade Federal de São Paulo - USP

Prof Dr. Lauro Júlio Calliari - Instituto de Oceanografia - Universidade Federal do Rio Grande - FURG

**Tese de Doutorado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do título
de Doutor em Geociências**

Porto Alegre – 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Sprovieri, Felipe Caetano
Clima de Ondas, Potencial Energético e o
Transporte de Sedimentos no Litoral Norte do Rio
Grande do Sul / Felipe Caetano Sprovieri. -- 2018.
142 f.
Orientador: Elírio Ernestino Toldo Jr..

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2018.

1. Reconstrução e Análise do Clima de Ondas no Sul
do Brasil. 2. Potencial Energético das Ondas no Sul
do Brasil. 3. Modelagem do Transporte de Sedimentos
Praial no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. I.
Toldo Jr., Elírio Ernestino, orient. II. Título.

Dedicatória

*Há quem sempre me “orientou”,
meu vô, Dr. Rovilson Cleber
Sprovieri, com amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

Meu principal agradecimento é ao Professor e amigo Elírio Toldo Jr., o qual sempre apoiou e seguiu me orientando para a realização e conclusão deste Doutorado, mesmo com vários desvios e mudanças de cronograma, sempre manteve a confiança e seguiu me incentivando. Obrigado Elírio!

E, sem parâmetros de comparação e causa, agradeço a minha família, Magda minha esposa, e Vitória, Laura e Clara minhas amadas filhas, as quais sempre entenderam e aceitaram os momentos de ausência devido à realização do Doutorado. Obrigado meus amores!

Agradeço a instituição financiadora:

- CNPq. Processo 159691/2012-5.

RESUMO

Esta tese teve o objetivo de descrever e interpretar a propagação, deformação e a distribuição do potencial energético das ondas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, através da utilização de uma abordagem híbrida, a qual consiste em acoplar modelos de alta resolução capazes de simular os processos de transformação de ondas em águas rasas (*refraction, bottom friction, shoaling, diffraction, breaking*), com técnicas estatísticas de interpolação que utilizam uma relação empírica entre variáveis de águas profundas e águas rasas afetadas pelos efeitos de propagação, reduzindo o esforço computacional. Com os parâmetros das ondas e suas potenciais capacidades energéticas, também foi calculado, através de modelos numéricos, as taxas e magnitudes do transporte de sedimentos num trecho de 45 km ao longo do Litoral Norte. A caracterização do clima de ondas da região sul do Brasil, em águas profundas (3000m) ao largo da costa, e em águas rasas (17 m) na Praia de Tramandaí, foi realizada com base em duas séries temporais distintas de quatorze anos (Jan/1997-Dez/2010), analisadas separadamente. A série foi obtida através de reanálise do modelo operacional NWW3 (águas profundas), e a partir desta foi aplicada uma metodologia híbrida (dinâmica + estatística) de transferência (*downscale*), integrando modelagem numérica de ondas (dinâmica) e ferramentas matemáticas (estatística), para reconstruir a série temporal completa. A metodologia de reconstrução foi validada através da comparação com dados instrumentados medidos *in situ*. O modelo DELFT3D-WAVE utilizado na modelagem numérica também foi calibrado com dados instrumentados. Informações sobre o regime de ondas no Brasil são escassas e sustentadas por observações de curto período, sendo os únicos trabalhos publicados com regimes de longo prazo referentes a análises realizadas com dados provenientes de reanálises globais. O presente trabalho é inédito na escala espaço temporal analisada, tendo em vista a reconstrução e posterior análise de uma série temporal de quatorze anos em águas rasas na costa sul do Brasil. Informações sobre o potencial energético das ondas no Brasil são limitadas, geradas principalmente por análises de cenários característicos de ondas ou eventos extremos isolados, não levando em consideração base de dados superiores ao período de um ano. A partir dos resultados obtidos neste trabalho foi comprovado que existe dissipação energética ao longo da propagação das ondas sobre a plataforma sul brasileira, contudo o potencial energético disponível para extração continue sendo significativo, com 76.3 MW/m e 40.9 MW/m disponíveis ao ano em águas intermediárias e na Praia de Tramandaí, respectivamente. Para a determinação das taxas e magnitudes envolvidas no transporte de sedimentos e na evolução morfológica anual ao largo da costa, foi aplicado à técnica de redução de casos de onda através do Fluxo Médio de Energia, aonde foram selecionados 36 cenários hidrodinâmicos representados pela frequência de ocorrência em relação à série temporal original. Os cenários foram simulados com o modelo DELFT3D-WAVE+FLOW, e os valores ponderados pela respectiva frequência de cada cenário, possibilitando assim a quantificação das taxas anuais de transporte de sedimentos. O transporte resultante de sedimentos no litoral é para norte, apresentando uma taxa líquida de 1.098.945 m³/ano. A taxa média ao longo do ano é de 2.849 m³/m/ano. Em geral, os resultados da variação volumétrica dos perfis de praia demonstram que a maior parte da área estudada está com aporte sedimentar, provenientes do sul para norte, apresentando uma tendência acresciva, com taxa de sedimentação média de 1,8 m³/m ao ano. Os resultados obtidos neste trabalho condizem com estudos anteriores realizados por outros autores na área.

ABSTRACT

This thesis aimed to describe and interpret the propagation, deformation and distribution of the energy potential of the waves in the North Coast of Rio Grande do Sul, through the use of a hybrid approach, which consists of coupling high resolution models able to simulate the processes of shallow water conversion (refraction, bottom friction, shoaling, diffraction, breaking), with statistical interpolation techniques that use an empirical relationship between deep water and shallow water variables affected by propagation effects, reducing computational effort. With the parameters of the waves and their potential energetic capacities, the rates and magnitudes of the transport of sediments in a stretch of 45 km along the North Coast were also calculated through numerical models. The characterization of the wave climate of southern Brazil, in deep waters (3000m) offshore, and shallow water (17m) at Tramandaí Beach, was carried out on the basis of two distinct time series of fourteen years (Jan/1997-Dec/2010), analyzed separately. The series was obtained through a reanalysis of the NWW3 operational model (deep waters), and from there was applied a hybrid methodology (dynamic + statistic) of downscale, integrating numerical modeling of waves (dynamic) and mathematical tools (statistics), to reconstruct the complete time series. The reconstruction methodology was validated by comparison with instrumented data measured in situ. The DELFT3D-WAVE model used in numerical modeling was also calibrated with instrumented data. Information on the wave regime in Brazil is scarce and supported by short-term observations, the only published studies being with long-term regimes concerning analyzes performed with data from global reanalysis. The present work is unprecedented in the time space scale analyzed, in view of the reconstruction and subsequent analysis of a fourteen - year time series in shallow waters on the southern coast of Brazil. Information on the energy potential of waves in Brazil is limited, generated mainly by analyzes of wave-characteristic scenarios or isolated extreme events, not taking into account data bases over a period of one year. From the results obtained in this work it was verified that there is energy dissipation along the wave propagation on the Brazilian South platform, but the available energy potential for extraction continues to be significant, with 76.3 MW/m and 40.9 MW/m available per year in waters and in Tramandaí Beach, respectively. For the determination of the rates and magnitudes involved in sediment transport and annual morphological evolution off the coast, it was applied to the wave case reduction technique through the Medium Energy Flow, where 36 hydrodynamic scenarios were selected, represented by frequency of occurrence in relation to the original time series. The scenarios were simulated with the DELFT3D-WAVE+FLOW model, and the values weighted by the respective frequency of each scenario, thus allowing the quantification of annual sediment transport rates. The sediment transport on the coast is to the north, presenting a net rate of 1.098.945 m³/year. The average rate during the year is 2.849 m³ / m / year. In general, the results of the volumetric variation of the beach profiles show that most of the studied area is sedimentary, originating from the south to the north, presenting an additional tendency, with average sedimentation rate of 1.8 m³ / m per year. The results obtained in this work are consistent with previous studies carried out by other authors in the area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo, mostrando a Praia de Tramandaí, RS. Imagem: Google Earth®.	18
Figure 2. Map of the Rio Grande do Sul coast in south America with the location of Tramandaí beach. WGS - 84 Zone 22 S (UTM). Image: Google Earth®.	27
Figure 3. Methodological transfer process of the wave climate (downscale).....	28
Figure 4. Location of the extraction point of the time series of wave data in deep water (3000 m). Database used in the numerical model WWIII. Point coordinates: 31°00'00" S and 47°30'00" O. WGS - 84 Zone 22 S (UTM).	30
Figure 5. Differences between simulated and measured wave data in shallow water.	33
Figure 6. Scheme of the transfer methodology, which allows reconstruction of wave parameters at the point of interest for a given sea state (H_{si} , T_{pi} and Dir_i) by interpolation of the results of the spread of cases with different combinations of H_s , T_p and Dir_p	35
Figure 7. Representative combinations of directions (Dir_p), significant wave height (H_s) and peak period (T_p) selected for the simulations of wave propagation. The black dots indicate the NWW3 (3000 m) reanalysis data and the black line delimits the area considered in the interpolation for the transfer.	35
Figure 8. Significant wave height and mean wave direction. Results of wave propagation with D3D-W model on regional domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dir_p = 180^\circ$	37
Figure 9. Significant wave height and mean wave direction. Results of wave propagation with D3D-W model on local domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dir_p = 180^\circ$	37
Figure 10. Comparison of the results of the time series wave propagation data of WWIII (red line) versus the results of the reconstructed time series (blue line).....	39
Figure 11. Rose of directional wind speed values for the results obtained from NCEP/NCAR. Point coordinates: 31°00'00" S and 47°30'00" O. WGS - 84, Zone 22 S (UTM). Period 1997 to 2010.	40
Figure 12. Histogram of significant wave height (H_s) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.	41

Figure 13. Rose of directional values for significant wave height (H_s) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.....	41
Figure 14. Rose of directional values peak period (T_p) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.....	42
Figure 15. Directional wave roses representing the seasons in the South Hemisphere. NWW3 reanalysis data (3000 m) Left: Significant height (H_s); Right: Peak Period (T_p). Period 1997 to 2010.....	43
Figure 16. Histogram of significant wave height (H_s) for the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.	45
Figure 17. Rose of directional values of significant wave height (H_s) for the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.	45
Figure 18. Rose of directional values of peak period (T_p) for the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.	46
Figure 19. Directional wave roses representing the seasons in the South Hemisphere. Reconstructed D3D-W (17 m) data: left: significant height (H_s); right: peak period (T_p). Period 1997 to 2010.....	47
Figure 20. Annual root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for deep waters (NWW3 – 3000 m).	50
Figure 21. Annual root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for shallow waters (D3D-W – 17 m).....	50
Figure 22. Monthly root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for deep waters (NWW3 – 3000 m).	51
Figure 23. Monthly root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for shallow waters (D3D-W – 17 m).....	51
Figure 24. Annual mean wave power density (colour shades) and annual mean best direction (arrows). Adapted from Gunn and Stock-Williams (2012).....	61
Figure 25. Map of the Rio Grande do Sul coast in south America with the location of Tramandaí beach. WGS - 84 Zone 22 S (UTM). Image: Google Earth ®.	63
Figure 26. Location of wave resources, measuring equipment and numerical grids for wave downscale. Image: Google Earth ®.	64
Figure 27. Differences between simulated and measured wave energy data in shallow water.....	67
Figure 28. Results of wave energy propagation with D3D-W model on regional domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dirp = 180^\circ$	68

Figure 29. Results of wave energy propagation with D3D-W model on local domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dirp = 180^\circ$	69
Figure 30. Methodological transfer scheme for the wave climate (downscale).	69
Figure 31. Comparison of the results by the brute-force simulation with WWIII (red line) versus the results obtained by the transfer method (blue line).	70
Figure 32. Rose of directions for the wave energy (kW/m) for WW3 reanalysis data (3000 m).....	71
Figure 33. Characterization of the yearly mean wave energy at WW3 reanalysis data (3.000 m) in terms of significant wave height (H_s) and peaky period (T_p). The colour scale represents annual energy per meter of wave front (in MWh/m).	72
Figure 34. The yearly mean wave energy at WW3 reanalysis data (3000 m) for each year (kW/m).....	73
Figure 35. The yearly total wave energy at WW3 reanalysis data (3000 m) for each year (MWh/m).	74
Figure 36. Rose of directions for wave energy (kW/m) for 17m wave data (17m)....	75
Figure 37. The yearly average wave energy at 17m wave data (17m) in terms of significant wave height (H_s) and peak period (T_p). The colour scale represents annual energy per meter of wave front (in MWh/m).	76
Figure 38. The yearly mean wave energy at 17m wave data (17m) for each year (kW/m).....	76
Figure 39. The yearly total wave energy at 17m wave data (17m) for each year (MWh/m).	77
Figure 40. Rose of directions for wave energy (kW/m) for 4.2m wave data (4.2m)..	79
Figure 41. The yearly mean wave energy at 4.2m (4.2m) in terms of significant wave height (H_s) and peak period (T_p). The colour scale represents annual energy per meter of wave front (in MWh/m).	80
Figure 42. The yearly average wave energy at 4.2m wave data (4.2m) for each year (kW/m).....	80
Figure 43. The yearly total wave energy at 4.2m wave data (4.2m) for each year (MWh/m).	81
Figura 44. Localização da área de estudo, mostrando os perfis virtuais do transporte no sistema praial. Imagem: Google Earth ®.....	94
Figura 45. Localização do ponto de extração da série temporal de dados de onda em águas profundas (3.000 m).	98

Figura 46. Fluxograma esquemático do modelo Delft3D-MOR.....	100
Figura 47. Comparação e calibração dos parâmetros de onda.....	103
Figura 48. Esquema da metodologia de transferência, que permite obter os parâmetros de onda no ponto de interesse para um dado estado de mar (Hsi, Tpi e Dirp), a partir da interpolação dos resultados da propagação de casos com diferentes combinações de Hs, Tp e Dirp.	104
Figura 49. Combinações de direções (Dirp), altura significativa (Hs) e período de pico (Tp) selecionados para as simulações de propagação de ondas. Os pontos em preto indicam os dados de reanálise NWW3 (3000 m) e a linha preta delimita a área considerada na interpolação para a transferência.	105
Figura 50. Resultados de propagação de ondas com o modelo D3D-W sobre base batimétrica regional. Caso: Hs = 7,5 m, Tp = 14 s e Dirp = 180°.	106
Figura 51. Resultados de propagação de ondas com o modelo D3D-W sobre base batimétrica local. Caso: Hs = 7,5 m, Tp = 14 s e Dirp = 180°.	107
Figura 52. Comparação dos resultados da propagação da série temporal do WWIII (linha vermelha) com os resultados da série reconstruída (linha azul).....	109
Figura 53. Intervalo de direções em águas profundas que cobrem 95% da energia observada na praia.....	111
Figura 54. Classes selecionadas pelo método do fluxo de energia e casos representativos de cada classe (pontos vermelhos).	112
Figura 55. Taxa anual de transporte de sedimentos para norte [m ³ /ano].	116
Figura 56. Taxa anual de transporte de sedimentos para sul [m ³ /ano].....	117
Figura 57. Taxas de transporte resultantes de sedimentos [m ³ /ano].....	119
Figura 58. (Esquerda) Evolução morfológica após o período de 1 ano. Tons de verde indicam sedimentação, tons de vermelho erosão. (Direita) Variação volumétrica absoluta [m ³ /m] ao longo da área de estudo.	122
Figura 59. Variação volumétrica absoluta [m ³ /m].	124

LISTA DE TABELAS

Table 1. Directional probability and statistics for annual wave energy of D3D-W (4.2 m).....	77
Table 2. Directional probability and statistics for annual wave energy of D3D-W (4.2 m).....	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Área de Estudo	17
1.2	Objetivo Geral	19
1.2.1	Objetivos Específicos	19
1.3	Hipóteses	19
1.4	Sobre a Estrutura desta Tese:	20
	ARTIGO 1	21
	Reconstruction and Analysis of Wave Climate in Southern Brazil	21
1	Introduction	24
1.1	Study Area	25
2	Material and Methods	27
2.1	Proposed Methodology	27
2.2	Winds	28
2.3	Waves	29
2.4	Numerical Modeling	31
2.4.1	Compuation Domain	31
2.4.2	Bathymetry	32
2.5	Model Calibration	32
2.6	Temporal Wave Reconstruction	33
2.6.1	Wave Selection Cases	34
2.6.2	Wave Propagation	36
2.6.3	Time Series Reconstruction	37
2.6.4	Validation	38
3	Material and Methods	39
3.1	Deep Water Winds	39

3.2	Deep Water Waves	40
3.3	Deep Water Waves	44
3.4	Wave Height Trends	48
4	Conclusions	51
	References	53
	ARTIGO 2	56
	Wave Power Potential in Southern Brazil	56
1	Introduction	59
1.1	Study Area.....	62
2	Material and Methods.....	63
2.1	Wave Data	63
2.2	Wave Model	65
2.2.1	Computational Domain	66
2.2.2	Bathymetry	66
2.2.3	Model comparison with buoy data	67
2.2.4	Wave Propagation	68
2.3	Time Series Reconstruction	69
2.3.1	Validation	70
3	Results	71
3.1	Offshore Wave Energy	71
3.2	Nearshore Wave Energy 17m	74
3.3	Beach Wave energy 4.2m	78
4	Conclusions	82
	References	84
	ARTIGO 3	88
	Modelagem do Transporte de Sedimentos Praial no Litoral Norte do Rio Grande do Sul	88

1	Introdução	91
1.1	Área de Estudo	93
2	Metodologia	95
2.1	Síntese Metodológica.....	95
2.2	Ventos	96
2.3	Ondas	96
2.4	Modelagem	98
2.4.1	DELFT3D - FLOW	98
2.4.2	DELFT3D - WAVE	99
2.4.3	DELFT3D - MOR.....	99
2.4.4	Domínio Computacional	101
2.4.5	Batimetria	101
2.4.6	Calibração	101
2.4.7	Seleção de Casos	103
2.4.8	Propagação dos Casos	105
2.4.9	Reconstrução da Série Temporal.....	107
2.4.10	Validação.....	108
2.5	Simulação Morfológica.....	109
2.5.1	Fluxo de Energia	109
2.5.2	Seleção de Casos	110
2.5.3	Maré Morfológica.....	112
2.5.4	Aceleração Morfológica	113
3	Resultados e Discussão.....	114
3.1	Transporte Bruto de Sedimentos.....	115
3.2	Transporte Resultante de Sedimentos	118
3.3	Evolução Morfológica.....	121
4	Conclusões	126

Referencias	128
CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

1 INTRODUÇÃO

O comportamento hidrodinâmico dos ambientes costeiros é um assunto de grande interesse pela comunidade científica. A caracterização em nível avançado das ondas, correntes e do fenômeno do transporte de sedimentos em áreas costeiras e portuárias é de extrema importância na gestão costeira, e conseqüentemente reflete na economia. Desta forma, avaliações quali-quantitativas dos agentes hidrodinâmicos e das taxas de transporte são fundamentais para o correto dimensionamento de qualquer planejamento a curto, médio e longo prazo dos potenciais econômicos do litoral (Sprovieri, 2011).

A hidrodinâmica das ondas e correntes, e os mecanismos associados ao transporte de sedimentos são muito complexos nestas áreas. Contudo, ao longo das últimas décadas a abordagem dos estudos envolvendo o transporte de sedimentos deixou de ser apenas descritiva, partindo de simples modelos analíticos para sofisticados modelos numéricos (Fredse & Deigaard, 1992).

Embora o nível tecnológico atual possibilite o uso de computadores mais potentes, aliado a novas técnicas numéricas, o estudo do transporte de sedimentos na zona de surfe ainda apresenta incertezas consideráveis. Isso é explicado pelo complexo comportamento hidrodinâmico das ondas e das correntes induzidas por ondas e pelo vento, associado aos mecanismos de transporte de sedimentos, atuantes na zona de arrebatamento e no espraiamento (*swash zone*) (Elfrink, 1996).

Informações sobre o regime de ondas no Brasil são escassas e sustentadas por observações de curtos períodos. Poucos estudos realizados no Brasil avaliaram as características regionais de ondas com base em observações de longo prazo (e.g.: Candella, 1997; Pereira et al., 2000; Araújo et al., 2003; Bensi et al., 2005).

No estado do Rio Grande do Sul (RS), os estudos sobre ondas a partir de medições podem ser creditados a Strauch *et. al.*, (2009) e alguns outros autores que realizaram pesquisas sobre o tema, contudo sem publicações de impacto internacional.

Embora exista um progresso na investigação do clima de ondas a partir de medições, os registros temporais apresentam falhas devido a problemas operacionais, e abrangem um curto período temporal. Como alternativa, os modelos de reanálises de

ondas têm permitido uma detalhada descrição do clima de ondas em locais onde medições de longo prazo não estão disponíveis ou não existem.

Visando solucionar esta premissa, nos últimos anos, simulações numéricas multidecadais (reanálise) de ondas do mar foram desenvolvidas para melhorar o conhecimento do clima de ondas em águas profundas, especialmente em locais onde os dados instrumentais não estão disponíveis (Camus *et al.*, 2011). Desta forma, a aplicação deste recurso proporciona registros temporais longos e contínuos, com resolução espacial satisfatória.

Nesta temática o primeiro artigo foi abordado, intitulado *Reconstrução e Análise do Clima de Ondas no Sul do Brasil (Reconstruction and Analysis of Wave Climate in Southern Brazil)*. Nesta publicação o objetivo foi apresentar e aplicar uma técnica que possibilite reconstruir em longo prazo o clima de ondas em águas rasas, a partir de dados de reanálise, bem como caracterização do clima de ondas e análise de tendências de médio e longo prazo nos resultados obtidos.

Seguindo a linha de pesquisa abordada com o clima das ondas (Artigo 1), mas partindo para uma abordagem de utilização mais ampla, a linha de pesquisa foi direcionada para a geração de energia elétrica a partir das ondas.

O interesse na geração de energia elétrica a partir das ondas tem sido sustentado na última década pela subida dos preços do petróleo e a ameaça de mudanças climáticas. De um setor impulsionado principalmente pela experimentação, recentes e incessantes esforços almejam transformar a extração de energia das ondas em uma indústria, possivelmente capaz de fornecer uma parte significativa das necessidades de eletricidade do mundo.

O oceano é uma vasta fonte de energia, a qual pode ser explorada a partir de gradientes térmicos, gradientes de salinidade, variações das marés, correntes de maré e ondas, cuja tema é abordado neste artigo (OES, 2011).

Como a energia das ondas é uma fonte previsível e abundante, estimativas detalhadas do potencial energético do recurso torna-se fundamentais para subsidiar qualquer implementação tecnológica e consequente operacionalização de uso do recurso.

Neste sentido o segundo artigo foi elaborado, intitulado Potencial Energético das Ondas no Sul do Brasil (*Wave Power Potential in Southern Brazil*). O propósito principal desta publicação foi expandir os resultados obtidos no Artigo 1, avançando na modelagem das componentes de energia da onda em águas rasas, provendo informações quali-quantitativas para futura prospecção da energia das ondas em Tramandaí.

Com a caracterização das ondas e do potencial de energia quantificado para região sul do Brasil, a partir da série temporal de 14 anos de dados reconstruída (Artigo 1), ainda seria preciso determinar a taxa anual de transporte de sedimentos na área do Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul.

As taxas de transporte são resposta direta dos agentes energéticos atuantes no sistema praial, embora outros autores tenham estimado tais taxas, o período de análise não contemplou uma série de dados de longo prazo e com grau de refinamento adequado em função das condicionantes ambientais da região.

Como os mecanismos que governam o processo de transporte, bem como, as taxas que regem este transporte, afetam diretamente a qualidade, durabilidade, segurança e custos (gerenciamento) envolvidos em obras costeiras e infraestruturas, é imprescindível a necessidade de aprimorar ainda mais as técnicas utilizadas nesta área do conhecimento (Sprovieri, et. al., 2012).

A partir das bases de dados de reanálise de ondas associado à metodologia híbrida de transferência de ondas de águas profundas para rasas, e técnicas numéricas de modelagem é possível quantificar as taxas de transporte de sedimentos atuantes na zona de surfe e espraiamento de praias.

Portanto, o terceiro artigo foi construído para atender esta premissa, intitulado como Modelagem do Transporte de Sedimentos Praial no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, cujo objetivo foi determinar as taxas de transporte de sedimento e consequente às variações morfológicas anuais para o litoral médio norte do estado do Rio Grande do Sul, principalmente para a Praia de Tramandaí, através da integração de métodos numéricos, medições direcionais de ondas in situ e modelagem numérica de ondas, correntes e transporte de sedimentos.

1.1 Área de Estudo

A plataforma do sul do Brasil está localizada entre o Cabo de Santa Marta e o Chuí (28,5 – 34° S). A Planície Costeira do estado do Rio Grande do Sul está localizada nesta plataforma, onde uma extensa costa com orientação uniforme NE-SO e leve sinuosidade ao longo dos seus 615 km de extensão, caracterizam a linha de costa do estado. A ausência de promontórios rochosos e/ou baías ao longo de sua extensão a torna uma linha de costa singular, sendo uma costa arenosa totalmente exposta à energia incidente do ambiente oceânico.

Toda esta extensão é constituída por depósitos quaternários inconsolidados que não recebem contribuições de areias modernas, pois toda carga de tração transportada pela rede de drenagem interior é retida nas lagoas e outros ambientes costeiros, como por exemplo, a Lagoa dos Patos (32° S). A Plataforma Continental é parte de uma ampla e passiva margem, com mais de 150 km de extensão, profundidades máximas variando entre 100 e 140 m e suave declividade da ordem de 0,06°.

Na porção centro-sul da planície está localizada a Praia de Tramandaí (Figura 1), com aproximadamente 12 km de extensão e orientação NNE–SSO, classificada no estágio morfodinâmico dissipativo com estruturas de banco e cava longitudinal (Jung et al., 2011). A antepraia é extensa e rasa com limite externo na profundidade de 10 m, onde predominam depósitos arenosos (Toldo et al., 2006).

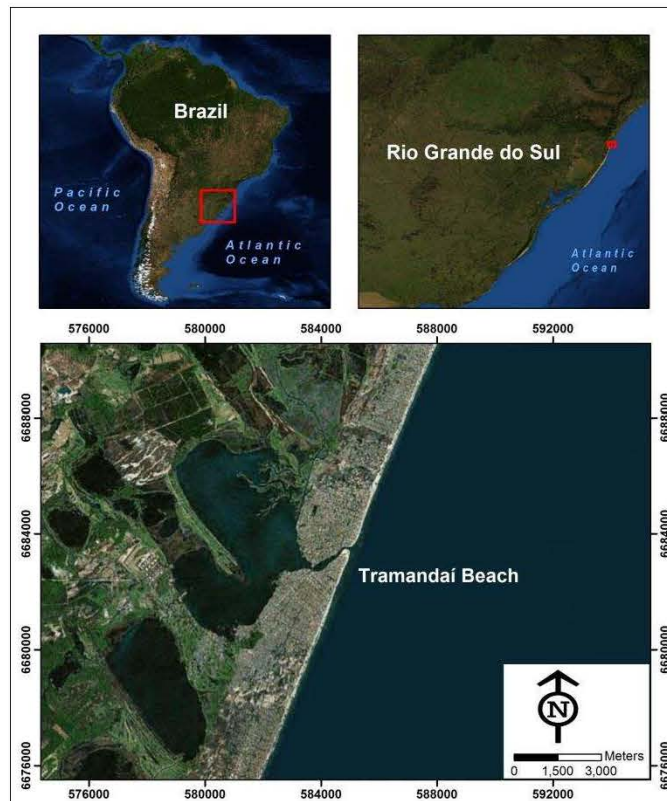


Figura 1. Localização da área de estudo, mostrando a Praia de Tramandaí, RS. Imagem: Google Earth®.

Os sedimentos praias da região centro-norte do estado consistem principalmente de areias finas bem selecionadas (tamanho médio de 0.2 mm), (Nicolodi et al. 2002, Gruber 2002). Sendo retrabalhados pelas ondulações geradas no Oceano Atlântico Sul e vagas geradas pelos fortes ventos locais de verão e primavera, provenientes de NE. Exceto pela passagem de frentes frias de S e SE, a agitação marítima é caracterizada por ondas de média a elevada energia, sendo a altura significativa de 1,4 m e período entre 7 e 9 s (Almeida e Toldo, 1997). A maré astronômica é semidiurna, com altura média de 0,30 m, sendo que a maré meteorológica pode alcançar 1,20 m (Almeida et al., 1997).

A profundidade de fechamento é estimada em 7,5 m, calculada com base em dois conjuntos de dados coletados nos anos de 1963 e 1996 no Litoral Norte do estado (Almeida et al., 1999). Conseqüentemente, o transporte e a deposição dos sedimentos ao longo da costa são primariamente dominados pela ação da onda.

Embora o foco deste trabalho seja para a costa do Rio Grande do Sul, a abordagem principal será realizada para a Praia de Tramandaí e proximidades, onde os parâmetros de onda simulados foram comparados com parâmetros medidos.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal desta tese é definir as condições de contorno e as características hidrodinâmicas da propagação, deformação e a distribuição do potencial energético das ondas geradas em águas profundas e posterior incidência em praias expostas submetidas a micromaré no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, a partir da modelagem numérica.

1.2.1 Objetivos Específicos

1. Analisar o clima de ondas para águas profundas a partir dos dados do módulo de reanálise do modelo de geração e propagação de ondas *WAVEWATCH III*;
2. Aplicar metodologia de *dowscale* para transferir uma série temporal de dados de onda desde águas profundas até as proximidades da costa;
3. Aplicar o método do Fluxo de Energia para os dados de ondas em águas rasas e obter as condições de contorno para modelagem do transporte de sedimentos na Praia de Tramandaí – RS;
4. Quantificar as taxas e magnitudes do transporte de sedimentos para o litoral norte do RS;
5. Avaliar o comportamento morfológico das principais praias do litoral norte do RS.

1.3 Hipóteses

Em um contexto geral as pesquisas envolvendo o tema do transporte de sedimentos em praias, aliado ao complexo comportamento hidrodinâmico atuante no sistema praial, evoluíram consideravelmente nas últimas décadas. Com o avanço tecnológico somado a incessante dedicação científica, novos modelos numéricos foram desenvolvidos. Sendo assim, para consolidar os estudos envolvendo modelagem numérica aplicada para processos costeiros, e também a quantificação das taxas de transporte de sedimentos em praias, contribuindo no avanço científico para a costa do norte do Rio Grande do Sul, são apresentadas hipóteses investigativas para o desenvolvimento do estudo.

- I. O clima de ondas apresenta uma variação de tendência em curto e médio prazo

na uniformidade do fluxo de energia.

- II. A morfologia da plataforma continental dissipa a energia das ondas a ponto de impedir o aproveitamento do potencial energético das ondas em águas rasas?
- III. A linha de costa apresenta estabilidade apesar da complexa distribuição do fluxo energético de ondas, as quais resultam em taxas e magnitudes do transporte de sedimentos variáveis espaço-temporalmente.

1.4 Sobre a Estrutura desta Tese:

Esta tese de Doutorado está estruturada em torno de artigos publicados/submetidos em periódicos com corpo editorial permanente e revisores independentes escritos pelo autor durante o desenvolvimento de seu Doutorado. Conseqüentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais:

- a) Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de Doutorado, onde estão sumarizados os objetivos e a filosofia de pesquisa desenvolvidos, o estado da arte sobre o tema de pesquisa (apresentada anteriormente);
- b) Artigo submetido para a publicação na *Brazilian Journal of Oceanography*:
SPROVIERI, C. F.; TOLDO, E.E., Jr.; and FARINA, L. **RECONSTRUCTION AND ANALYSIS OF WAVE CLIMATE IN SOUTHERN BRAZIL.**
- c) Artigo submetido para a publicação na *Brazilian Journal of Oceanography*:
SPROVIERI, C. F.; TOLDO, E.E., Jr.; and FARINA, L. **WAVE POWER POTENTIAL IN SOUTHERN BRAZIL.**
- d) Artigo submetido para Revista *Pesquisas em Geocências*:
SPROVIERI, C. F.; and TOLDO, E.E., Jr. **MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ZONA DE SURFE DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL.**
- e) Conclusões gerais da tese.

ARTIGO 1

RECONSTRUCTION AND ANALYSIS OF WAVE CLIMATE IN SOUTHERN BRAZIL

Este capítulo apresenta o conteúdo do primeiro artigo que compõe esta tese e foi enviado para publicação em *Brazilian Journal of Oceanography* em 05/03/2018. O conteúdo apresentado a seguir segue na íntegra o submetido para revista, mudando apenas a formatação do texto. O e-mail a seguir apresenta o recebimento do manuscrito pela revista.

Felipe Sprovieri

De: Braz. j. oceanogr. - GNPapers <gnpapers@gnpapers.com.br>
Enviado em: segunda-feira, 5 de março de 2018 23:23
Para: Felipe Caetano Sprovieri
Assunto: Artigo Submetido - Brazilian Journal of Oceanography



Ilmo(a) Sr.(a)
Prof(a), Dr(a) Felipe Caetano Sprovieri

Número do artigo: 169
Seção: Artigo Completo

Informamos que recebemos o manuscrito "Reconstruction and Analysis of Wave Climate in Southern Brazil". Ele será enviado para apreciação dos revisores com vistas à publicação no(a) Brazilian Journal of Oceanography. Por favor, para qualquer comunicação futura sobre o referido manuscrito cite o número do artigo apresentado acima.

O(s) autor(es) declara(m) que o presente trabalho é inédito e o seu conteúdo não foi nem está sendo considerado para publicação em outro periódico brasileiro ou estrangeiro, impresso ou eletrônico.

Obrigado por submeter seu trabalho.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Marcos César de Oliveira Santos
Editor-chefe

««« Enviado por GNPapers - Esta é uma mensagem automática - Por favor não responda este email
»»»

RECONSTRUCTION AND ANALYSIS OF WAVE CLIMATE IN SOUTHERN BRAZIL

Felipe SPROVIERI ^a, Elírio E. TOLDO JR. ^a, Leandro FARINA ^{a,b},

^a Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre, RS, Brazil. CEP: 91501-970.

^b BCAM – Basque Center for Applied Mathematics, Mazarredo, 14 E48009 Bilbao, Basque Country – Spain.

Corresponding author: Felipe SPROVIERI, e-mail: felipe.sprovieri@gmail.com

Elírio E. TOLDO JR., e-mail: toldo@ufrgs.br

Leandro FARINA, e-mail: farina@mat.ufrgs.br

ABSTRACT

This paper presents the wave climate of southern Brazil for deep water (3000 m) and shallow water (17 m) at Tramandaí beach, based on two time series between 1997 and 2010, analyzed separately. The time series was obtained by reanalysis of data of the operational model NWW3 to deep water, and from this a hybrid methodology (statistical + dynamic) transfer (downscale) was applied, integrating numerical modeling of waves (dynamic) and mathematical tools (statistics) to reconstruct the full time series in the coastal area. The reconstruction methodology was validated by comparison with instrumented data measured in situ. The Delft3D-WAVE model used in numerical modeling of waves was also calibrated with instrumented data. Information on the wave regime in the southern Atlantic ocean is scarce and supported by observations of short periods only, and the only published work with long term observations refers to analyses performed on data from global reanalysis schemes. This work is unprecedented in the scale of the timeline that was analyzed, with a view to the rebuilding and subsequent analysis of a time series covering 14-yr for shallow waters offshore Brazil.

ADDITIONAL INDEX WORDS: Waves, Downscale, Delft3D, Reanalysis, Brazil Wave Climate.

1 INTRODUCTION

Information on the wave regime in Brazilian coast is scarce and supported by observations of short periods only. Although the country is the target of the oil and gas market, offshore bulk exploitation restricts access to the measured data. A few studies conducted have evaluated the regional characteristics of waves based on short-term observations (e.g. Araújo et al., 2003; Bensi et al., 2005). In the state of Rio Grande do Sul, studies on waves from measurements can be credited to Strauch (2009) and some other authors who conducted research on the subject, yet without publications of international impact.

In recent years, multidecadal numerical simulations (reanalysis or hindcasts) of ocean waves have been developed to improve the knowledge of the wave climate in deep water, especially in locations where instrumental data are not available (Camus et al., 2011). Although there is progress in the investigation of the wave climate from measurements, the temporal records are flawed due to operational problems, and cover a shorter time period.

Alternatively, wave reanalysis models have allowed a detailed description of the wave climate in places where long-term measurements are not available or do not exist. Thus, the application of this resource provides long continuous time records, with satisfactory spatial resolution.

Global reanalysis data bases have low temporal and spatial resolution. The spatial resolution of the wave and wind data is usually not sufficient for coastal applications, and processes of wave transformation on the coast are not included in the physical formulations of the global model. Thus, the information provided by models of waves in deep water should be transferred to shallow water, thereby increasing the spatial resolution (downscaling).

The approaches developed to perform downscale usually consist of: (a) a dynamic approach that consists of transferring data from low-resolution models (i.e WWIII) with high-resolution models (i.e SWAN) capable of simulating the processes of transformation of waves in shallow water (refraction, bottom friction, shoaling, diffraction and breaking); (b) a statistical approach that uses an empirical relationship between variables in deep water and shallow waters affected by propagation effects to

obtain reliable information on small-scale coastal areas; (c) a hybrid approach that combines the dynamic (numerical models) and the statistical (interpolation schemes) approaches, reducing the computational effort.

A more accurate procedure for downscaling is the dynamic approach. However, the computational effort for this solution is usually impractical. The statistical approach only reproduces the wave parameters in a specific location. Regardless of the approach taken, it is always necessary to compare the results with measured data to validate the transfer of waves on the shore.

The transfer function of some hybrid methods requires propagation of a considerable number of sea states (dynamic) in order to represent climate variability in deep water or several years of analysis to generate the statistical model and its validation (Galiskova and Weisse, 2006; Herman et al., 2009). Moreover, these methods have more sophisticated statistical parameters capable of reproducing long-term waves in appropriate temporal and spatial scales for coastal engineering applications.

In this study, a methodology will be used for hybridized downscaling of a coastal area. The methodology is to reduce the number of cases to apply the dynamic downscale, without changing the representation of cases from the original time series into deep water. The time series of wave parameters will be rebuilt in shallow waters through the statistical approach. Therefore, data from hourly wave reanalysis of deep water over the long term will be selected in a few cases; these will be propagated with wave model (Delft3D), capable of simulating the complex processes of transformation, and finally, the full temporal series will be transferred through an interpolation algorithm for shallow water.

The objective of this paper is to present the definition of the wave climate for the state of Rio Grande do Sul through the integration of numerical methods, directional in situ wave measurements, and numerical modeling of waves.

Section 1 introduces the work and the study area is presented. The methodological description, including the steps of selection, propagation, calibration, reconstruction of waves and validation of the method, is presented in 2. Section 3 presents the results and discussion. Finally, in Section 4 some conclusions about the work are presented.

1.1 Study Area

The inner platform and coastline along the southern Brazil is dominated by waves and the regional processes of sediment transport are primarily controlled by the wave energy flux. The coastal plain has an extensive coastline featuring uniform NE-SW orientation and light sinuosity along its 615 km length. The absence of rocky headlands and/or bays along its length makes it a natural coastline, with a sandy shore fully exposed to the incident energy of the ocean environment. All this extension consists of unconsolidated Quaternary deposits which do not receive contributions from modern sands, as every tensile load carried by the interior drainage system is retained in the lagoons and other coastal environments, such as the Patos Lagoon (Toldo et al., 2006). The continental shelf is part of a broad and passive margin, more than 150 km long, with maximum depths ranging between 100 and 140 m and a gentle slope of about 0.06° (Côrrea, 1996).

In the south-central portion of the plain is located Tramandaí beach (Figura 1), approximately 12 km long and oriented NNE-SSW, classified in the dissipative morphodynamic stage with longitudinal bar-trough system (Jung et al., 2011). The shoreface is extensive and shallow with an outer boundary at a depth of 10 m, with a predominance of sandy deposits (Toldo et al., 2006).

Although the focus of this work is the coast of Rio Grande do Sul, the main approach will concern the shallow water, where the simulated wave parameters were compared with measured parameters.

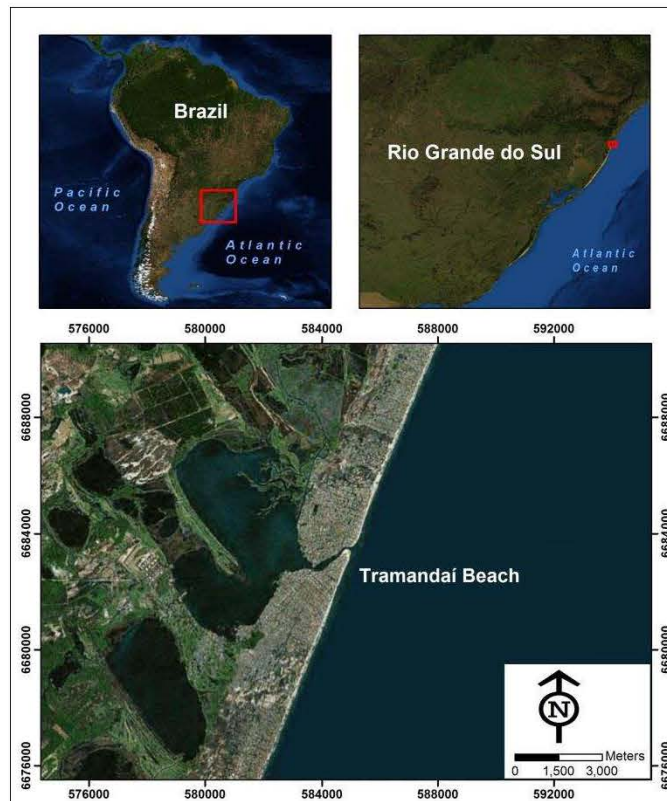


Figure 2. Map of the Rio Grande do Sul coast in south America with the location of Tramandaí beach. WGS - 84 Zone 22 S (UTM). Image: Google Earth®.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Proposed Methodology

The proposed methodology for transferring the wave climate for deep water coastal areas, called a downscale, consists of: (a) definition of the wave climate in deep water from NCEP reanalysis of data from the NWW3 operational model; (b) selection of a representative subset of sea states (deep water); (c) extension of a representative subset of states of deep ocean waters to coastal areas through the D3D-W wave propagation model; (d) reconstruction of the time series in the coastal area using a cubic linear interpolation scheme; (e) validation of the results from the comparison with instrumented data measured in situ; (f) establish the wave climate at the chosen location. The processes for the application of this method are shown in Figure 3.

The product of this methodology can be used for several purposes; i.e (i) calculation of wave parameters for design of coastal protection structures; (ii) calculation of beaches closure depth; (iii) calculation of wave power potential; however, in this work

it will be used to characterize the wave climate from the time series of reconstructed waves. In addition, one could run the model for the entire regional coast, depending on the computational resources available.

This methodology can be applied in any area of study, with different wave patterns and with different bathymetric settings. The application presented in this paper was performed for Tramandaí beach, RS, Brazil (Figura 1).

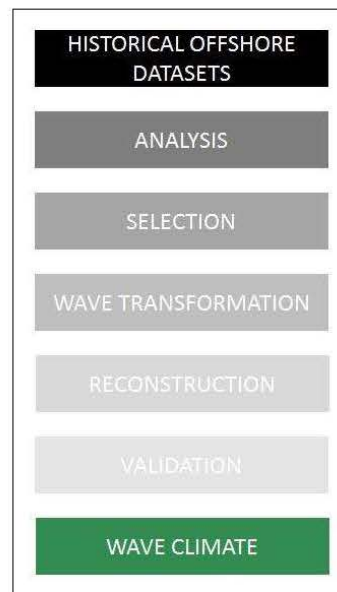


Figure 3. Methodological transfer process of the wave climate (downscale).

2.2 Winds

Regional winds affecting the coast are mainly related with two high-pressure systems, the South Atlantic anticyclone, which is more active during the summer months, and the Polar Mobile anticyclone, which is most influential during the winter months (Tomazelli, 1993). These systems determine the prevalence of NE winds in the months of spring and summer, and W-SW winds in the winter months. According to Tomazelli (1993), wind analyses characterize the region's wind as high-energy with low directional variability.

Compilation of wind data to input the D3D-W model was performed using data from the reanalysis of the NCEP/NCAR Reanalysis Project (Kalnay et al., 1996). This

database is composed of global models fed with observational data, such as product features and the field components of wind to 10 meters.

The time series of wind data was obtained for the calculation grid element located at coordinates 31°00'00" S and 47°30'00" (WGS-84). Data were extracted from a global mesh with a resolution of 1.25° x 1°. The time series covered the period January 1997 to December 2010, totaling 14 years.

The time series of wind extracted (NCEP/NCAR) was applied as a boundary condition in the D3D-W model on the full extent of regional boundary.

2.3 Waves

According to Strauch et al. (2009), from data measured at Tramandaí beach in 2006 and 2007 with a directional waverider (Datawell), in summer the incident swell is distributed between the ENE and S directions, with values of significant wave height proportionally split between 1.5m (ESE) and 3.0m (SSE), predominantly in the SE direction. The wave periods for this time of year had a higher frequency of occurrence, between 9 s and 12 s, although periods of 15 s were recorded. In autumn, results showed a maximum significant wave height of 4.0 m, distributed between the ENE and S directions, predominantly in the SSE direction. In autumn the maximum period of waves recorded was 19 s, this being from the SSE.

In order to characterize the wave climate in deep water was carried out by reanalysis of the data generation model and propagation of waves in deep water module WWIII (Tolman, 1997, 1999).

The wave parameters used in this study correspond to a time series of significant wave height (H_s), peak period (T_p) and associated peak period ($Dirp$), obtained from simulations of the model toward WWIII with input wind from the NCEP/NCAR. This work not performed simulations with the WWIII model, the results used were extracted from the global database available from NOAA.

The WWIII model (Tolman, 1997, 1999) is a third-generation model developed by NOAA/NCEP (WAMDIG, 1988; Komen et al., 1994) that solves the equation of conservation of the spectral density of wave action. The model assumes that the

properties of the medium (depths and currents) as well as the field of waves vary in time, and spatial scales are much larger than the scale of variation of a single wavelength. The model allows simulation of the generation and propagation of wave spectra based on wind data. The model calculates the nonlinear processes of wave generation by wind, wave-wave interactions, dissipation by whitecapping, and friction with the background.

A time series of 14 years of wave data was extracted from the database reanalysis of NOAA, and from this, the wave climate was analyzed. The extraction point of the wave data in deep water was obtained for the calculation grid element located at coordinates $31^{\circ}00'00''$ S and $47^{\circ}30'00''$ (WGS-84), located a depth of approximately 3000 m (Figure 4). Data were obtained from a global mesh with a resolution of $1.25^{\circ} \times 1^{\circ}$. The extracted time series consists of Year, Month, Day, Hour, Minute, Hs in meters, Tp in seconds and Dirp in degrees, with daily results every three hours, totaling 40,692 records.

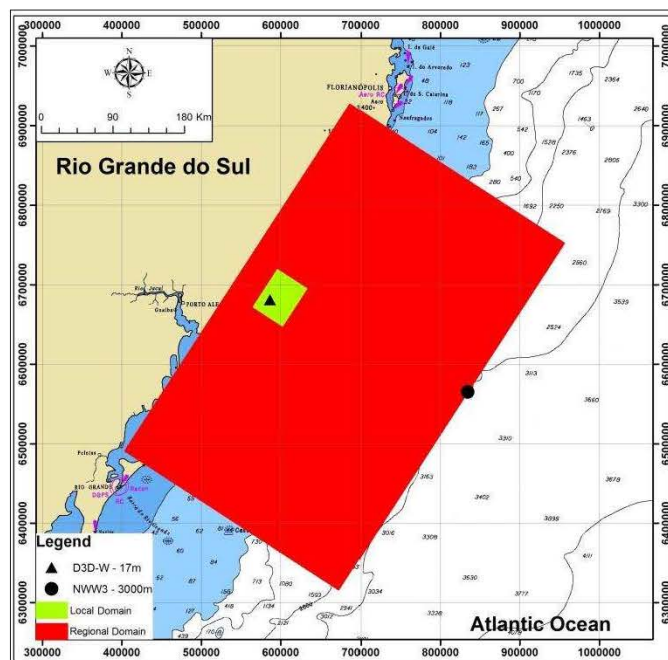


Figure 4. Location of the extraction point of the time series of wave data in deep water (3000 m). Database used in the numerical model WWIII. Point coordinates: $31^{\circ}00'00''$ S and $47^{\circ}30'00''$ O. WGS - 84 Zone 22 S (UTM).

The analyzed time series of waves was used as a boundary condition in the generation and propagation of waves with the D3D-W model.

2.4 Numerical Modeling

In this study the Delft3D-WAVE (D3D-W) numerical model developed by Deltares in Delft, Netherlands was used. This model includes the SWAN (Simulating Waves Nearshore), a numerical wave model that provides realistic estimates of wave parameters in coastal areas (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999). Even though this model is designed specifically for coastal applications, it can be applied for the generation and propagation of gravity waves on any scale. The model is based on the wave action balance equation. The spectrum considered is the action density spectrum, instead of the energy spectrum, and in the presence of currents the action density is conserved while energy is canceled (Whitham, 1974). A complete description of the formulations and interactions terms of the model can be seen in Holthuijsen et al. (2004).

2.4.1 Computation Domain

The elaboration of the computational domain was performed with the Delft3D-RGFGRID module, an integrated tool in the Delft3D modeling package, which allows the generation and manipulation of orthogonal and/or curvilinear numerical grids. The preparation of the numerical grids followed the required properties of orthogonality and smoothness in order to avoid interference from numerical noise, consequently increasing the accuracy of the model (WL | Delft Hydraulics, 2007).

To simulate the processes of wave propagation from the point of reanalysis of the WWIII model in the vicinity of Tramandaí beach, two coupled calculations meshes (nested) were created, with different resolutions, as shown in Figure 4.

The regional grid is a regular orthogonal grid consisting of 323 x 522 elements of the calculation, which has a southern boundary approximately parallel to the 3000 meters isoline, allowing the external border of the mesh to represent a nearly constant depth along the computational domain. The spacing of the regional grid is 1000 meters. The local grid is a regular orthogonal grid consisting of 178 x 226 elements with a spacing of 250 meters, positioned adjacent to Tramandaí beach, thus ensuring higher resolution calculations near to the point of interest. The D3D-W model (SWAN)

transfers the results obtained in the regional mesh automatically to the boundary of the local mesh.

2.4.2 Bathymetry

Depth values in the study area were obtained through the digitization of Nautical Charts N°. 2200, 2100, 2010, 1911, 1910, 1900, 90 and 30, digitized and made available by the Directorate of Hydrography and Navigation of the Navy of Brazil (DHN) in digital raster format.

Depth data were corrected for the mean sea level (MSL) in the region, as indicated in Nautical Charter number 2100 as a difference of 0.13 meters to the level of reduction (DHN).

2.5 Model Calibration

The calibration procedure of the D3D-W consisted of comparing the time series of wave data measured in situ with the modeling of waves for the same point where the measurement was taken.

In the calibration process the parameters of the model can be set to improve the similarity between the measured data and the modeled results.

The calibration parameters set were: (i) depth-induced breaking; (ii) non-linear interactions triad; (iii) bottom friction; (iv) diffraction.

The time series of wave data used to compare the results of the modeling comes from the campaign by the partnership of UFRGS and PETROBRAS in 2006, where a directional waverider (Datawell®) was anchored in the zone of influence of the Maritime Terminal Almirante Soares Dutra, to a depth of 17 m, at the coordinates 30°00'42 "S and 50°06'21" W (WGS 1984).

To quantify the differences between the temporal series of wave data measured in situ and the results of modeling, the mean square waves or RMSE (Root Mean Square Error) was used according to the formula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

where P is the predicted variable and the variable is observed.

Figure 5 shows the comparison between the measured (blue line) and modeled (red line) wave data, indicating good representation of processes and patterns obtained by the model on measured data, with an RMSE of 0.27 m for Hs, 2.63 s for Tp and 34.50° for Dirp.

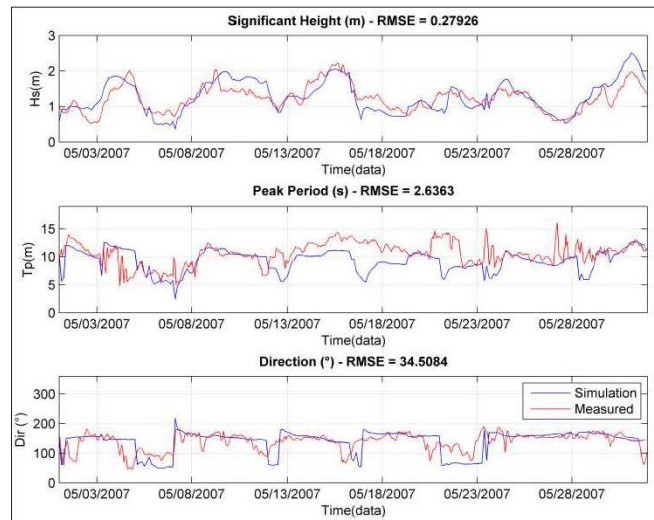


Figure 5. Differences between simulated and measured wave data in shallow water.

With the calibrated D3D-W model it is possible to propagate the cases of deep-water waves to shallow, and apply the methodology of reconstructing the time series data of waves in shallow water.

2.6 Temporal Wave Reconstruction

The reconstruction method of wave climate proposed in this paper is submitted below, showing the numerical methods applied.

2.6.1 Wave Selection Cases

The vast majority of regions around the world, especially in developing countries, lack long time series of wave data measured in shallow waters. To remedy this deficiency, Camus et al. (2011) developed a methodology based on the use of temporal data, from the reanalysis of deep water wave programs (e.g. WWIII), propagation models in shallow water series, and interpolation techniques that allow the generation of a quantity of temporal data of waves in shallow water of the same length as the original time series of deep water.

This method of transfer of the original deep water series to shallow water acts as a technique of linear interpolation in three dimensions (H_s , T_p and Dir), applied to the coefficients and parameters of wave propagation with directional characteristics. It enables the building of a time series for shallow water with the same number of cases as the original time series for deep water. This methodology is applied in the MATLAB®, which is a computational environment where it is possible to perform complex processes through simplified language.

The method applies the intrinsic function INTERP (N), where N is the number of variables to be interpolated, and with the function gridData, which interpolates specific points (X_i , Y_i) in the interpolated surface generating as output, the Z_i values in the domain of interest.

The concept of the method is shown in Figure 6, which represents schematically the operation of the technique, which allows for the wave parameters at a given point (H_{si} , T_{pi} , Dir_i) by interpolation of the results of different combinations of H_s , T_p and Dir_p .

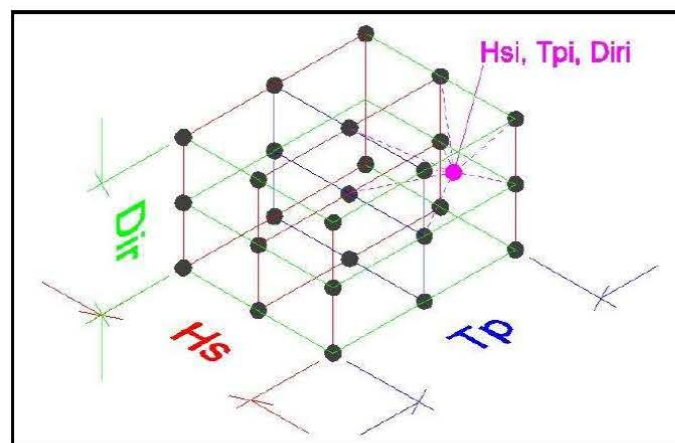


Figure 6. Scheme of the transfer methodology, which allows reconstruction of wave parameters at the point of interest for a given sea state (H_{si} , T_{pi} and Dir_i) by interpolation of the results of the spread of cases with different combinations of H_s , T_p and Dir_p .

The time series of wave data obtained from NOAA reanalysis data was used to implement the aforementioned methodology. The total number of records in the time series is 40,692 (over 14 years).

Due to the computational infeasibility of propagating all 40,692 wave cases (sea states) extracted from the WWIII model from deep water to shallow water, a selection of cases was made from the time series of waves to be propagated.

The criterion used to choose the instances of spread was to select all cases of possible waves occurring in the study area. For this, 40,692 cases were shown, as in Figure 7, and from these a limited selection were chosen for each class of 0.5 meters in the distribution of wave heights (H_s), 2 seconds in the distribution of wave periods (T_p) and 22.5 degrees in the distribution of the incident wave directions (Dir_p). The cases were selected in the interval classes, that is, every 0.5 meters, 2 seconds and 22.5 degrees, and these cases are represented by the red dots in Figure 7.

The time series of wave data in deep water was processed in the MATLAB ® environment and the selection criterion was applied, resulting in a combination of 947 cases of representative waves (combinations of H_s , T_p and Dir_p).

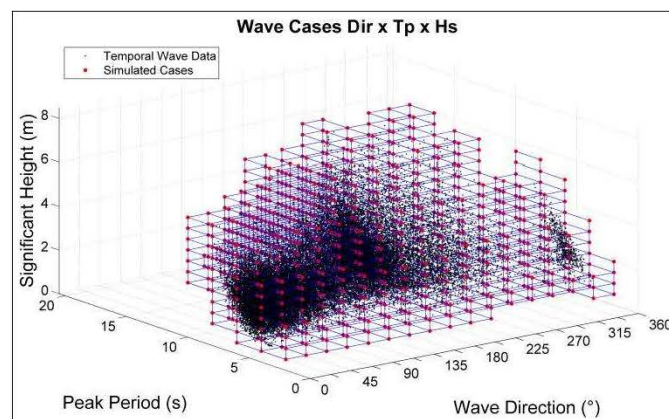


Figure 7. Representative combinations of directions (Dir_p), significant wave height (H_s) and peak period (T_p) selected for the simulations of wave propagation. The black dots indicate the NWW3 (3000 m) reanalysis data and the black line delimits the area considered in the interpolation for the transfer.

The 947 cases that were defined to allow the interpolation of all combinations of H_s – T_p – Dir_p occurring in the deep water time series are representative of all directions, from N to NNW (0° to 360°).

2.6.2 *Wave Propagation*

The 947 cases of representative waves were propagated using the D3D-W numerical model. The model was run in stationary mode, considering the effects of refraction, diffraction, dissipation with the background and dissipation by breaking (coefficients set as default). The spectra were defined based on input data H_s , T_p and $Dirp$ cases by adopting a JONSWAP spectrum with gamma parameter sharpness peak equal to 3.3.

The directional spreading was defined based on the peak period. Waves with a longer period (swell) have a lower directional scattering (4 to 15) and waves with a shorter period (waves or sea wind) have greater directional scattering (15 to 25). The spectrum was discretized into 24 frequency components and 144 directional components.

The wave cases selected was applied on the boundary condition in the D3D-W model on the full extent of regional boundary. The boundary conditions near the coast was set open.

Examples of results of wave propagation performed with the D3D-W model for regional and local meshes calculation are shown in Figure 8 and Figure 9, respectively.

In Figure 8, regional domain is observed to a larger value H_s , depending on the boundary condition (offshore) and high depth, since in Figure 9, the local domain, there is a decrease in the values of H_s , depending on the cases transformation of waves in shallow water. The arrows indicate the mean wave direction.

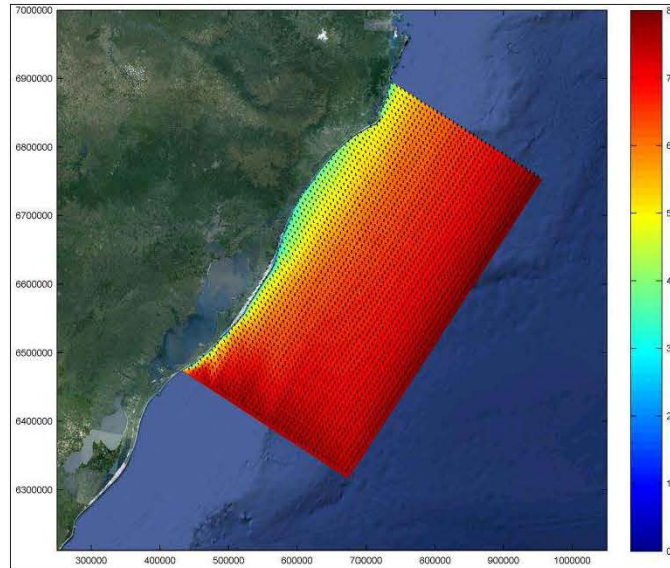


Figure 8. Significant wave height and mean wave direction. Results of wave propagation with D3D-W model on regional domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dirp = 180^\circ$.

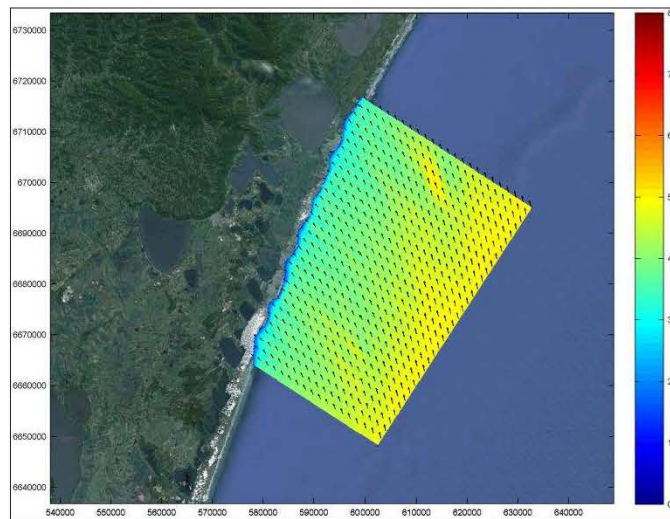


Figure 9. Significant wave height and mean wave direction. Results of wave propagation with D3D-W model on local domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dirp = 180^\circ$.

2.6.3 Time Series Reconstruction

With the results of H_s , T_p and $Dirp$ obtained in the 947 cases of wave propagation (D3D-W), the coefficients of wave propagation (Eq. 2) for H_s , T_p and $Dirp$ were calculated. With coefficients of propagation (K_p) corresponding to each case propagated, linear interpolation is performed in the time series for deep water. Knowing the propagation coefficient (K_p), it is possible to obtain the values of the wave

parameters H_s , T_p and Dir at the point of interest (Eq. 3). The expression for calculating the coefficients is the same for H_s , T_p and Dir .

$$K_p = \frac{H_s, T_p, Dir_p \text{ (shallow water)}}{H_s, T_p, Dir_p \text{ (deep water)}} \quad 2$$

$$H_s, T_p, Dir_{p_{point}} = \kappa_p \times H_{s_i}, T_{p_i}, Dir_{p_i} \quad 3$$

After performing the interpolation techniques presented in section 2.6.1, 2.6.2 and 2.6.3, it was possible to reconstruct the time series in shallow water.

This method allows reconstruction of the time series for any element of the computational domain. In this study the point chosen for construction (D3D-W - 17m) is located at a depth of 17 meters, at coordinates 29°59'57.56" S and 50°06'7.25" W (Figure 4).

The point chosen is purposely located where the waverider (Datawell®) was anchored in 2006, thus enabling comparison of the results with data measured in the field.

With the time series reconstructed at the point in shallow water for the period of 14 years (30/01/1997 to 31/12/2010), it is possible to characterize the wave climate in the vicinity of Tramandaí beach.

2.6.4 Validation

To validate the transfer methodology employed, and confirm the effectiveness of the method, a simulation described as brute-force was performed with the time series of WWIII for the period from 01/05/2007 to 31/05/2007 (the same period as the model calibration and data measured in the field). This kind of simulation is the spread of the cases obtained from WWIII (case) over one month, totaling 240 cases propagated (H_s , T_p and Dir). The results of the brute-force propagation are compared with the results obtained by the transfer method, as shown in Figure 10.

The validation of the transfer method is shown in Figure 10, where is compared the transfer method results versus the propagation of cases WWIII (brute force), in which the patterns of H_s T_p and Dir are accepted.

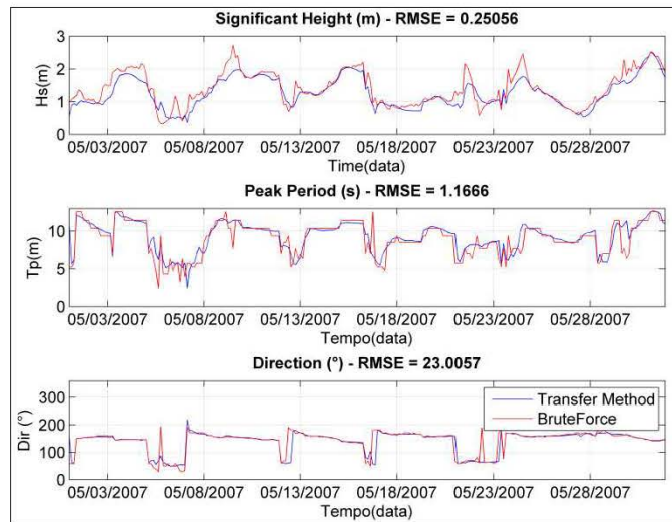


Figure 10. Comparison of the results of the time series wave propagation data of WWIII (red line) versus the results of the reconstructed time series (blue line).

Figure 10 verifies that the transfer method adequately reproduces the effects of the series of waves propagating from deep water to the point of interest (17 m) and therefore the use of their results to determine the wave climate for Tramandaí beach is justified.

3 MATERIAL AND METHODS

3.1 Deep Water Winds

Figure 11 shows the directional rose of wind speed values for reanalysis of data obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis Project (Kalnay et al., 1996).

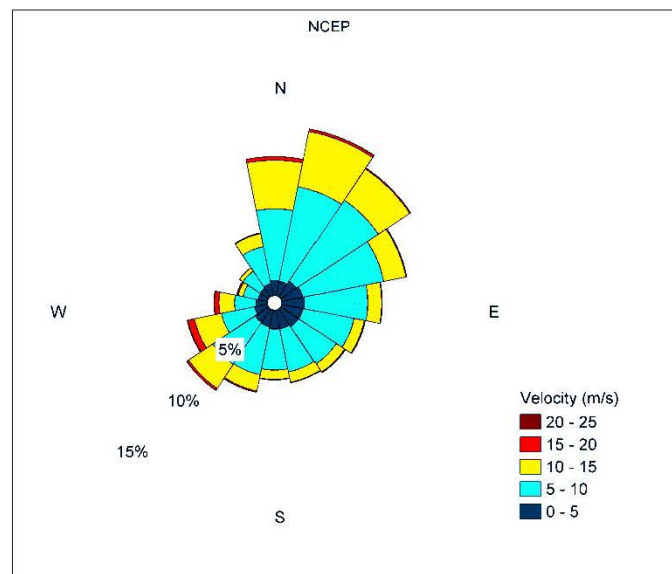


Figure 11. Rose of directional wind speed values for the results obtained from NCEP/NCAR. Point coordinates: 31°00'00" S and 47°30'00" O. WGS - 84, Zone 22 S (UTM). Period 1997 to 2010.

In Table 1 the joint distribution diagram for the wind velocity (m/s) and direction (°) values obtained from the NCEP/NCAR model is presented. Cases with a higher frequency of occurrence are highlighted.

From the distribution shown in Table 1, it is seen that the highest frequency of occurrence is related to winds from the NE, with 11.78% of cases. The most common intensities are between 6 and 8 m/s, in 24.29% of cases. However, winds coming from the N and ENE correspond to 40.92% of the analyzed records, where 79.17% of the intensities range between 4 and 12 m/s.

Table 1. Diagram of distribution of wind velocity (m/s) and direction (°) for the results obtained from NCEP/NCAR. Period 1997 to 2010.

Vel (m/s)\ Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N° Casos	Freq (%)
0 - 2,0	50	58	60	66	62	75	81	72	75	70	66	67	58	49	44	43	996	2,448
2,0 - 4,0	206	188	211	246	282	278	275	266	265	207	194	172	146	138	122	155	3351	8,239
4,0 - 6,0	392	468	631	688	659	598	522	480	444	459	443	287	212	177	269	345	7074	17,392
6,0 - 8,0	780	1023	1145	1058	799	646	592	569	522	584	555	390	255	222	274	466	9880	24,291
8,0 - 10	1019	1399	1230	844	590	453	389	395	386	543	626	402	250	113	159	402	9200	22,620
10 - 12	840	1055	781	460	291	207	212	206	181	328	511	387	183	73	84	249	6048	14,870
12 - 14	424	434	248	154	84	75	59	73	66	118	246	290	187	56	27	110	2651	6,518
14 - 16	152	130	54	34	26	29	18	26	24	38	94	174	118	23	7	25	972	2,389
16 - 18	44	31	9	10	9	9	12	4	6	13	27	86	53	13		10	336	0,826
18 - 20	12	6	2	2	1	1	5	4	1	3	5	27	30	8	1	2	110	0,270
20 - 22		2				1		1	1	3	1	15	7	7			38	0,093
22 - 24										1		4	4	3		1	13	0,032
24 - 26													1	1			2	0,004
N° Casos	3919	4794	4371	3562	2803	2372	2165	2096	1971	2367	2768	2301	1504	883	987	1808		
Freq (%)	9,635	11,787	10,747	8,757	6,891	5,832	5,323	5,153	4,846	5,819	6,805	5,657	3,697	2,171	2,426	4,445		

3.2 Deep Water Waves

The time series data obtained from the NWW3 wave model results were statistically analyzed to characterize the wave climate in deep water.

As a result, the histogram distribution of H_s (Figure 12), the rose of directions for H_s and T_p (Figure 13 and Figure 14) are presented.

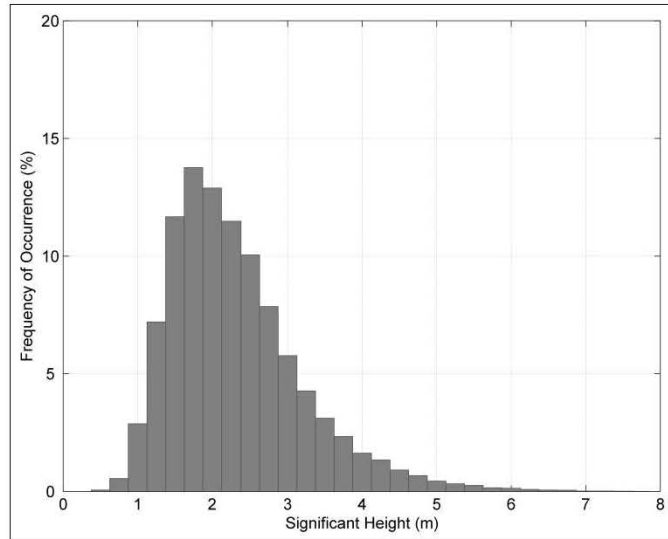


Figure 12. Histogram of significant wave height (H_s) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.

Figure 13 and Figure 14 show the directional roses depending on the values of significant wave height and peak period, respectively. This type of presentation is used to represent the statistical characteristics of the wave climate of a region, where the histograms of the basic parameters (H_s and T_p) are expressed by a directional sector in polar coordinates. Roses indicating the sea state are represented by a unique trio of H_s , T_p and Dir_p parameters, which corresponds to a significant height H_s calculated from all those present in the energy spectrum, while T_p and Dir_p are the peak period and direction over the energy spectrum, respectively.

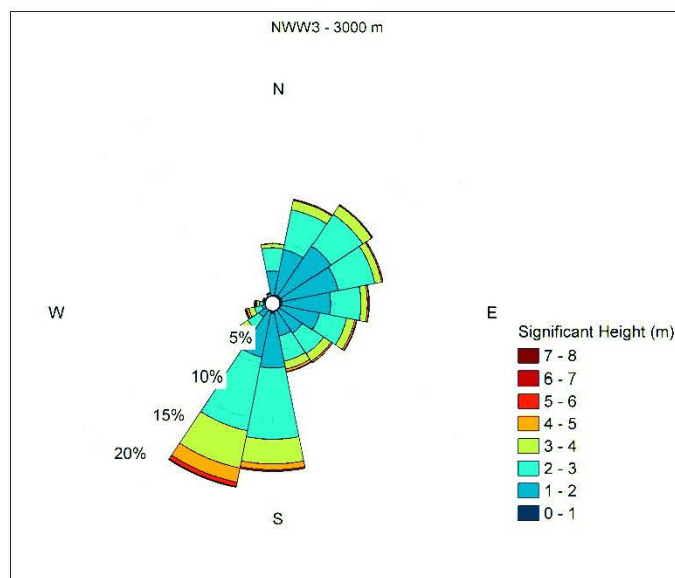


Figure 13. Rose of directional values for significant wave height (H_s) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.

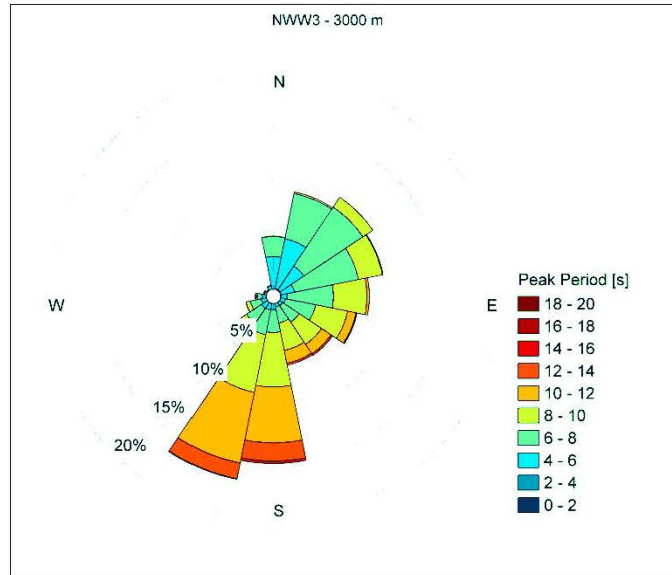


Figure 14. Rose of directional values peak period (Tp) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.

Table 2 shows the diagram of the joint distribution of significant wave height (m) and direction (°) of waves in deep water. From this, it appears that the waves with the highest frequency of occurrence come from the S-SSW in 31.34% of cases, with their values of significant height ranging between 1.5 and 2.5 m, representing 49.78% of the height classes. Although the S-SW incidence is the most frequent, 19.96% of the waves come from the NE-ENE, with significant heights ranging between 1 and 2 m.

Table 2. Diagram of distribution for significant wave height (m) and waves direction (°) for NWW3 reanalysis data (3000 m). Period 1997 to 2010.

Hs (m) \ Dir _s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N° Casos	Freq (%)
0 - 0,5											1	1					2	0,0049
0,5 - 1,0	46	66	99	86	68	46	23	43	101	31	11	4	5	1	2	9	641	1,5760
1,0 - 1,5	260	585	978	863	767	524	400	331	561	532	76	20	22	10	11	40	5980	14,7030
1,5 - 2,0	660	1169	1269	1272	1053	936	654	609	1519	1242	249	109	49	20	11	66	10887	26,7678
2,0 - 2,5	481	930	834	895	735	698	544	585	1621	1503	270	148	59	24	8	25	9360	23,0134
2,5 - 3,0	383	584	583	494	390	320	374	377	1008	1276	255	140	80	23	3	10	6300	15,4898
3,0 - 3,5	120	268	271	171	159	197	236	202	612	853	212	115	70	20	4	1	3511	8,6325
3,5 - 4,0	24	78	133	86	80	112	96	94	307	568	156	100	39	8	1		1882	4,6273
4,0 - 4,5	12	37	23	33	44	48	48	72	160	358	136	51	36	6			1064	2,6161
4,5 - 5,0	3	7	11	19	13	21	15	24	61	180	108	41	13	2			518	1,2736
5,0 - 5,5		2	3	1	9	8	1	15	39	101	48	27	14	1			269	0,6614
5,5 - 6,0					2	4	1	7	16	62	24	11	10				137	0,3368
6,0 - 6,5					1	6		2	4	18	24	9	6	1			71	0,1746
6,5 - 7,0						2			2	12	8	7	4				35	0,0861
7,0 - 7,5									2	1	5	2	1				11	0,0270
7,5 - 8,0											2	1	1				4	0,0098
N° Casos	1989	3726	4204	3920	3321	2922	2392	2361	6013	6737	1585	786	409	116	40	151		
Freq (%)	4,8903	9,1611	10,3363	9,6361	8,1653	7,1843	5,8612	5,8050	14,7841	16,5642	3,8970	1,9325	1,0056	0,2952	0,0983	0,3713		

Observing the figures and tables presented, we conclude that the waves in deep water according to NWW3 (3000 m) are predominantly from directions between N and SW

(96.31% of records), with significant wave heights ranging mostly between 0.5 and 5.0 m (98.70% of records) and peak period 4–14 s (99.43% of records). However, data occur in the time series of up to 7.76 Hs Tp m up to 18.18 s.

In order to characterize the seasonal wave climate in deep water, Figure 15 show a simple statistical analysis in which the parameters of basic waves are identified for each season.

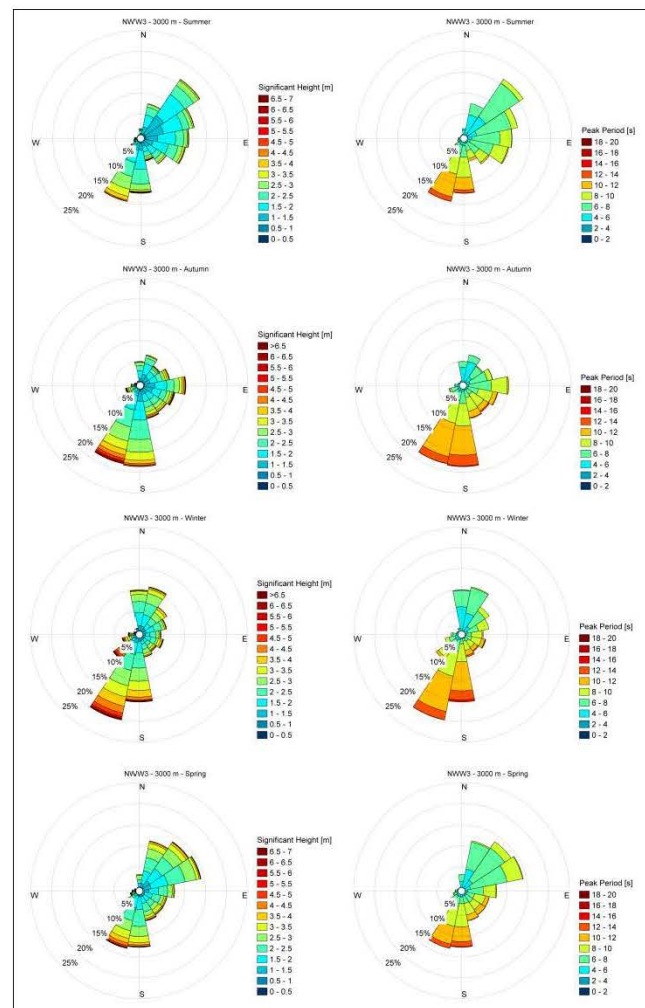


Figure 15. Directional wave roses representing the seasons in the South Hemisphere. NWW3 reanalysis data (3000 m) Left: Significant height (Hs); Right: Peak Period (Tp). Period 1997 to 2010.

The parameters shown can seasonally set the mood for waves in deep water (NWW3 - 3000 m) as: (summer) waving from 115.9° (ESE) with a mean significant wave height of 1.96 m and period peak corresponding to 7.57 s; (autumn) waving from 141.77° (SE) with a mean significant wave height of 2.31 m and period peak corresponding to 8.33 s; (winter) waving from 143.1° (SE) with a mean significant wave height of 2.58 m and period peak corresponding to 8.32 s; (spring) waving from 116.1° (ESE) with a mean significant wave height of 2.39 m and period peak corresponding to 7.94 s.

Pianca et al. (2010), from analysis of reanalysis data of the NWW3 operational model, presented the wave climate for the southern region (32° S, 48.75° W) in Brazil. According to the authors, in the summer the predominant wave directions are NE (28.4 %) and S (26.7 %). The northeast waves range from 1–2 m (18.4%) with a period of 6–8 s (16.3%). The south waves range from 1–2 m (11.4%) and 2–3 m (10.9%) with a period of 8–10 s (9.6%) and 10–12 s (8.7%), respectively. In autumn the predominant wave direction is S (36.7%), with wave height ranging between 2–3 m (14.1%) and the period between 10–12 s (15.9%). The highest undulations are from the S, reaching a maximum height of 7.3 m with a period of 15 s. In the winter the dominant wave incidence direction is S (30.2%), with heights ranging from 2–3 m (12.9%) with periods of 10–12 s (12.5%). There are also waves from the NE (26.4%) at height ranging between 2–3 m (13 %) and period of 6–8 s (17.5%). The maximum wave height this season is related to waves from the SW, reaching 6.9 m. In spring, waves from the NE (35.2%) are dominant, with heights ranging between 1– 2 m (10.4%) and 2.03 m (11.4%), with a period of 8–10 s (11%).

Araujo et al. (2003), from measurements made by a directional waverider anchored at approximately 80 m depth off the coast of Santa Catarina (Brazil), found the wave pattern at the site to be bi-modal. Data analysis showed the following characteristics: (i) waves with a period of 8 s (sea), with predominant direction E, mean significant wave height 1.25 m; (ii) waves with a period of 12 s (swell) with predominant direction S, average significant height ranging from 1.25 to 2 m, and recorded height values greater than 4 m over the year (low frequency waves).

3.3 Deep Water Waves

The time series data of waves obtained by the method of transfer were statistically analyzed to characterize the wave climate in shallow waters (D3D-W). As a result, the histogram distribution of H_s (Figure 16), the rose of directions for H_s and T_p (Figure 17 and Figure 18), are presented.

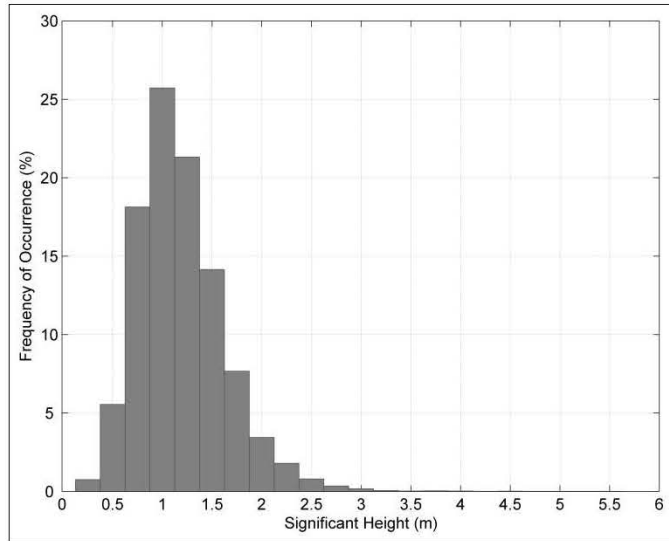


Figure 16. Histogram of significant wave height (Hs) for the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.

Figure 17 and Figure 18 show the directional roses depending on the values of significant wave height and peak period, respectively.

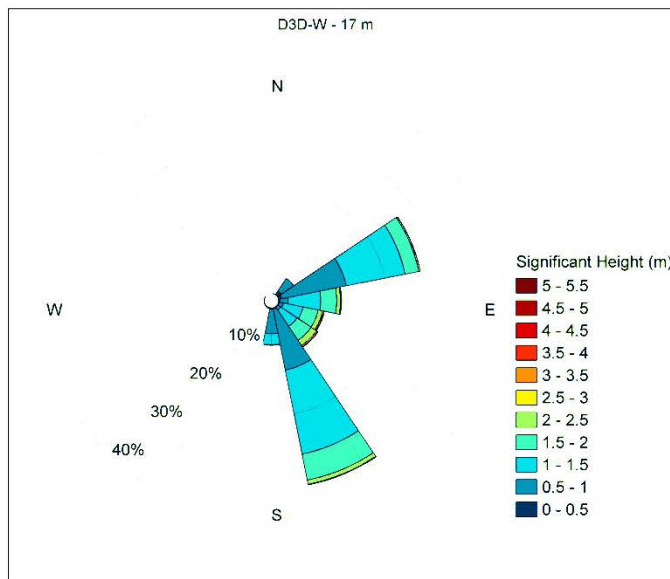


Figure 17. Rose of directional values of significant wave height (Hs) for the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.

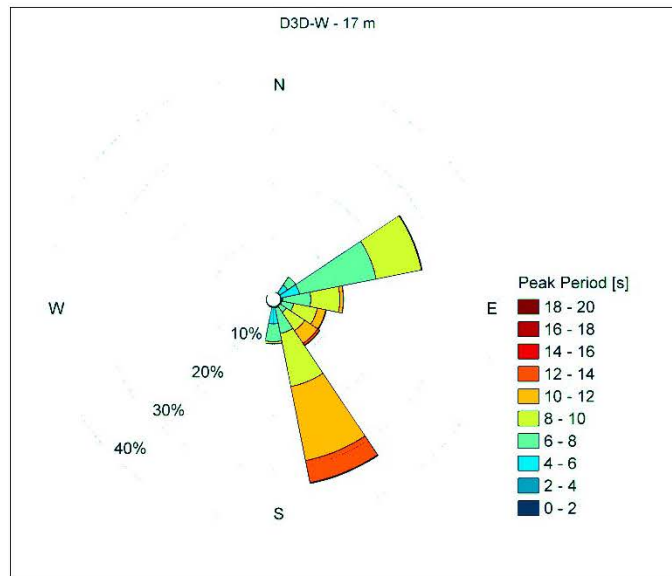


Figure 18. Rose of directional values of peak period (Tp) for the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.

Table 3 shows the diagram of the joint distribution of significant wave height (m) and direction (°) of waves in shallow water. From this, it appears that the waves with the highest frequency of occurrence are from the SSE, with 33.36% of cases, with values of significant height ranging between 0.5 and 1.5 m, representing 76.81% of the height classes. Although the SSE incidence is the most frequent, 25.60% of the waves come from the NE, with significant heights ranging between 0.5 and 1.5 m.

Table 3. Diagram of joint distribution of significant wave height (m) and direction (°) waves according to the reconstructed D3D-W time series (17 m). Period 1997 to 2010.

Hs (m) \ Dir°	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N° Casos	Freq (%)
0 - 0,5		1	359	243	78	49	34	128	112	28	8	3	3	3			1049	2,5792
0,5 - 1,0		2	1124	5055	663	337	289	4811	1861	31	24	10	2	3			14212	34,9430
1,0 - 1,5				4429	2464	1502	1489	6339	797	5	2	1	3				17031	41,8740
1,5 - 2,0				985	1157	1157	1237	1937	29	2	1						6505	15,9938
2,0 - 2,5				95	270	325	465	308									1463	3,5971
2,5 - 3,0				10	60	95	101	39									305	0,7499
3,0 - 3,5				1	19	15	19	5									59	0,1451
3,5 - 4,0					3	13	12	1									29	0,0713
4,0 - 4,5						5	3										8	0,0197
4,5 - 5,0						2	1	1									4	0,0098
5,0 - 5,5						2	5										7	0,0172
N° Casos	0	3	1483	10818	4714	3502	3655	13569	2799	66	35	14	8	6	0	0		
Freq (%)	0,0000	0,0074	3,6462	26,5982	11,5903	8,6103	8,9865	33,3620	6,8819	0,1623	0,0861	0,0344	0,0197	0,0148	0,0000	0,0000		

Observing the figures and tables presented, we conclude that the waves in shallow water are predominantly from directions between NE and SE (99.92% of records), with significant wave height ranging mainly between 0 and 3 m (98.70% of records) and peak period 4–14 s (99.73% of records). However, in the time series data, H_s up to 5.66 m and T_p up to 18.75 s also occur.

In order to characterize the seasonal climate of waves in shallow water at Tramandaí beach, Figure 19 show a simple statistical analysis, in which the parameters of basic waves were identified for each season.

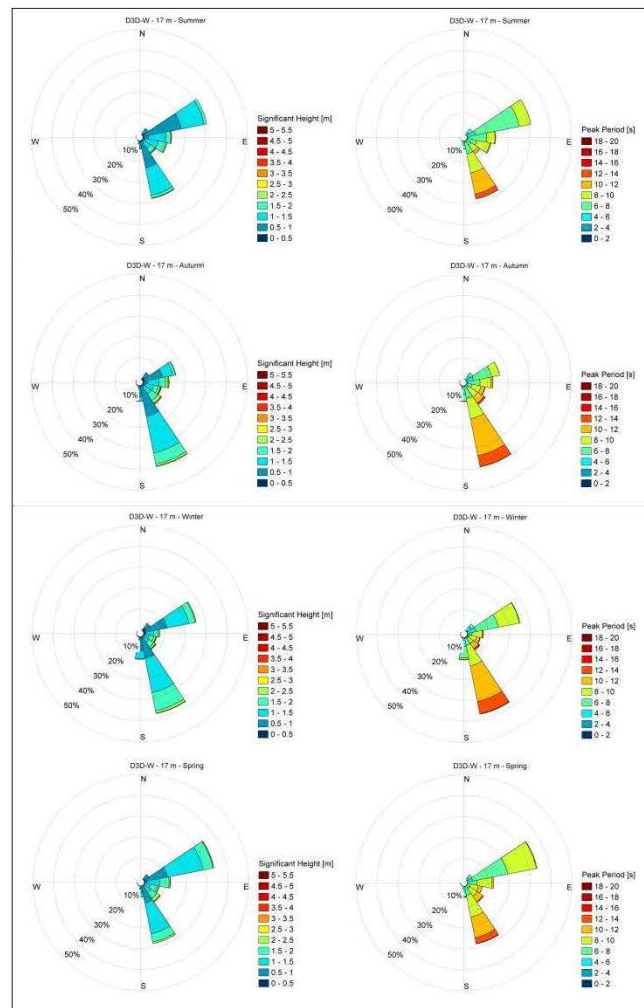


Figure 19. Directional wave roses representing the seasons in the South Hemisphere. Reconstructed D3D-W (17 m) data: left: significant height (H_s); right: peak period (T_p). Period 1997 to 2010.

From the parameters shown it is possible to seasonally set the pattern for waves in shallow water (D3D-W - 17m) as: (summer) waves from 109.9° (ESE) with a mean significant wave height of 1.09 m and peak period corresponding to 7.99 s; (autumn) waves from 125.2° (SE) with a mean significant wave height of 1.19 m and peak period corresponding to 8.68 s; (winter) waves from 121.9° (SE) with a mean significant wave

height of 1.20 m and peak period corresponding to 8.71 s; (spring) waves from 110.9° (ESE) with a mean significant wave height of 1.25 m and peak period corresponding to 8.47 s.

Strauch et al. (2009) presented the results obtained at the anchoring of the Datawell directional waverider, held in November 2006 at a depth of 17 m (the same data as used in the calibration of the model presented in this study).

The authors found that in summer at Tramandaí the incident swell is distributed between the ENE and S directions, with values of significant wave height divided proportionally between 1.5 m and 3.0 m ESE and SSE, predominantly in the SE direction. The wave periods for this time of year had a higher frequency of occurrence between 9 s and 12 s, although periods of 15 s were recorded. In autumn, the results showed a maximum significant wave height of 4.0 m, distributed between the ENE and S directions, and predominantly the SSE direction. In autumn, the maximum period of waves recorded was 19 s, this direction from the SSE.

The data obtained with the method of reconstruction of the time series of waves for shallow water (D3D-W - 17m) at Tramandaí corroborate the information provided by Strauch et al. (2009), and the patterns found for values of significant wave height, period and direction of the waves resemble the wave regime at Tramandaí.

3.4 Wave Height Trends

Significant trends in the wind wave height in different seas around the globe, reported by several authors, have been related to changes and variability of the wind regime. Carter and Draper (1988) studied ocean wave observations in the Northeast Atlantic and found a substantial increase in wave heights. The gradient of the regression line of the annual mean significant wave height for the period 1962–1983 was 0.034m/yr.

Gulev and Hasse (1999) found significant wave height increases of 0.10–0.30m/decade in the North Atlantic for the period 1964–1993, except for the western and central subtropics.

Dragani and Romero (2004) studied the impact on mean wave parameters in the upper Río de la Plata, associated with a possible future scenario in which wind frequencies

and intensities for the easterly directions would be respectively 30% and 10% higher than the present values. The results for the upper Río de la Plata show that mean easterly wave heights would be increased by 0.12 m (13%) relative to present values (0.90 m) and their frequencies would be increased by 30% (from 18.4 to 23.9%), producing larger total heights. The mean period for easterly waves would not change significantly (less than 4%, from 5.3 to 5.5 s). The results obtained are a first approximation of the problem, suggesting that within the upper Río de la Plata the wave climate is very sensitive to possible changes in the wind patterns. Dragani et al. (2008) implemented the Simulating Waves Nearshore model (SWAN) in the Río de la Plata and adjacent continental shelf in order to study maximum wave heights associated with meteorological extreme events between 1971 and 2000. A slight and significant positive trend (slope equal to 0.30 m/decade) was found in the series of simulated maximum annual wave heights. It is important to note that changes in the wave regime in this area can have a large impact not only on the ocean properties through variations of the depth of the mixed layer but also on the sedimentary regime, affecting some of the most important ports and beaches of South America.

In order to study a possible wave height increase in southern Brazil, annual root-mean-square of the significant wave height was analyzed instead of annual mean significant height, because it gives proper weight to the larger wave conditions, and will probably be a more sensitive discriminator of changes. The time series of simulated annual root-mean-square of the significant wave height (H_{rms}) at NWW3 and D3D-W can be observed in Figure 20 and Figure 21. In Figure 22 and Figure 23 monthly root-mean-square of the significant wave height (H_{rms}) at NWW3 and D3D-W can be observed. Least-square regression lines (1997–2010 period) were fitted to the data at each location and are shown in the figures. The calculated of the best fit lines were 0.02 ± 0.02 and 0.009 ± 0.01 m/year and 0.000057 ± 0.01 and 0.000028 ± 0.07 m/monthly, the determination coefficients were 0.71 and 0.35 for annual and 0.046 and 0.056 for monthly, for deep waters (NWW3-3000m) and shallow waters (D3D-W 17m), respectively.

The maximum positive (+0.09 m) and negative (-0.10) inter-annual variation at NWW3 occurs in 1997 and 2005, and maximum positive (+0.08 m) and negative (-0.09) at D3D-W occurs in 1997 and 2003, respectively. The maximum positive (+0.95 m) and negative (-0.90) inter-monthly variation at NWW3 occurs in 07/2007 and 12/2007, and

maximum positive (+0.53 m) and negative (-0.50) at D3D-W occurs in 05/2010 and 02/2003, respectively.

Across the whole 14 years, the trend of increasing wave height in deep water was 0.02 m/year, and in the shallow waters was 0.009 m/year. The wave height at point NWW3 between 1997 and 2010 increased by 0.34 m, and at point D3D-W increased by 0.21 m.

The maximum and minimum annual RMS calculated at point NWW3 was 2.66 and 2.34 m, and at point D3D-W was 1.39 and 1.17 m, respectively. The maximum and minimum monthly RMS calculated at point NWW3 was 3.47 and 1.60 m, and at point D3D-W was 1.84 and 0.74 m, respectively.

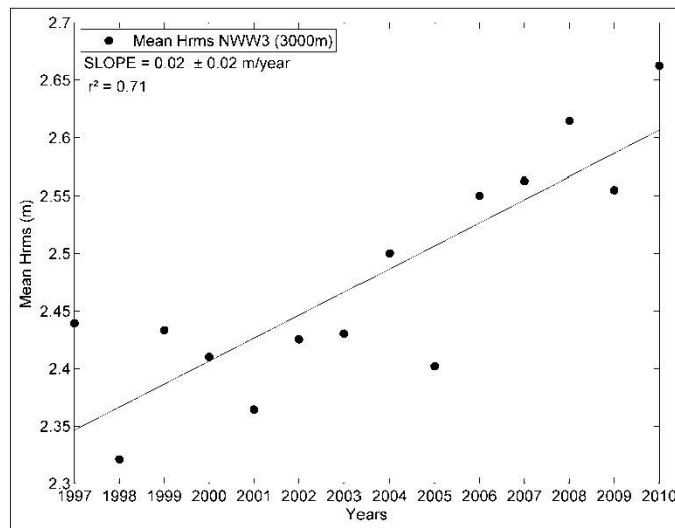


Figure 20. Annual root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for deep waters (NWW3 – 3000 m).

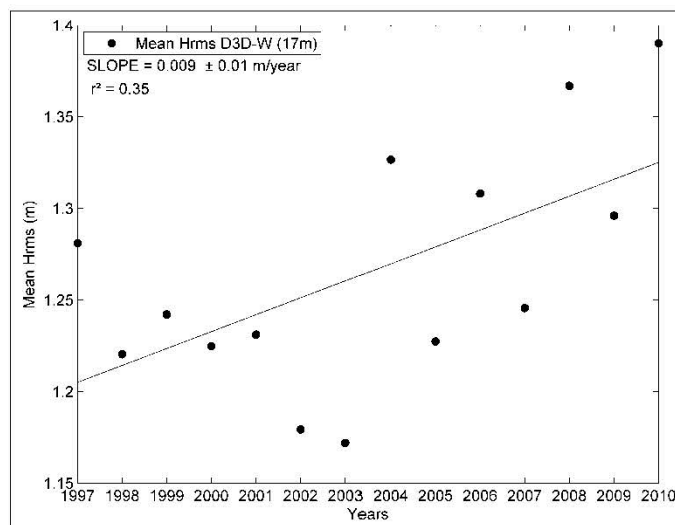


Figure 21. Annual root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for shallow waters (D3D-W – 17 m).

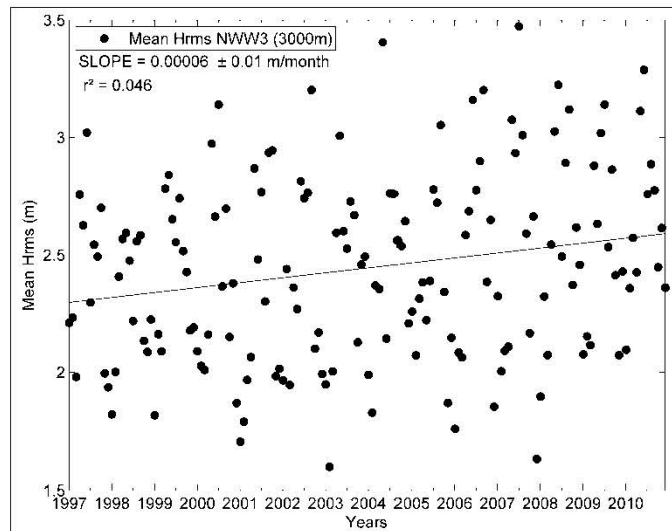


Figure 22. Monthly root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for deep waters (NWW3 – 3000 m).

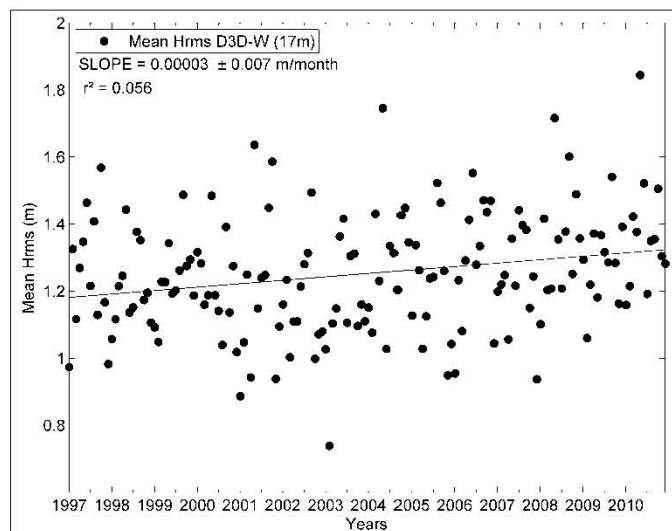


Figure 23. Monthly root-mean-square of the significant wave heights (1997–2010) for shallow waters (D3D-W – 17 m).

4 CONCLUSIONS

A hybrid methodology (statistical and dynamic) for transfer of the wave climate in deep waters to the coastal area was applied numerically, increasing the spatial resolution of the phenomena of wave transformation. From the application of the method to transfer wave reanalysis data (NWW3 – 3000 m) off the state of Rio Grande do Sul, and the subsequent validation of results (D3D-W – 17 m) obtained with instrumented in situ measured data, the time series of 14 years of wave data (Hs, Tp and Dirp) was rebuilt for the shallow water at Tramandaí beach.

The results of the propagation waves in the D3D-W model in shallow waters were calibrated and the reconstruction of the time series of waves with the transfer method was validated. The results of the application of integrated computational methods to assess the wave climate at Tramandaí beach correlated with the data measured in the field, and with the scientific work carried out on site. The linear interpolation algorithm applied to the reconstruction of the time series of waves showed high efficiency in comparison with instrumented data measured in situ.

The wave climate for deep (NWW3 – 3000 m) and shallow (D3D-W – 17 m) waters was analyzed statistically. Comparison of the data series makes evident the energy loss along the wave propagation towards the coast. An example can be seen in the autumn, where a wave with maximum significant wave height in deep water of 7.76 m focuses on the coastal area with 5.46 m, decreasing 2.36 m (70.4%) along its trajectory.

The pattern of waves in deep water off southern Brazil (NWW3 - 3000 m) can be briefly described as: (i) waves from 115.9° (ESE) with a mean significant wave height of 2.17 m and peak period corresponding to 7.75 s; (ii) waves from 142.4° (SE) with a mean significant wave height of 2.44 m and peak period corresponding to 8.32 s.

For shallow waters (D3D-W - 17 m) the pattern can be briefly described as: (i) waves from 110.4° (ESE) with mean significant height of 1.17 m and peak period corresponding to 8.23 s; (ii) waves from 123.5° (SE) with a mean significant height of 1.20 m with peak period corresponding to 8.70 s.

Finally, supported by numerical simulations carried out with Delft-3D (Wave) model forced with NCEP/NCAR and WWIII/NOAA reanalysis data, it was found that there is a positive trend in the significant increase in wave heights in southern Brazilian coast. From the calculations performed, between 1997 and 2010 there was an increase in deep waters of 0.34 m (0.02 m/year) and in shallow waters an increase of 0.21 m (0.009 m/year).

As a result, an increase in wave heights (and therefore, the wave energy density) may be able to affect the coastal processes. This will especially reflect changes in sediment transport along the coast, associated with an increased set-up of the waves and hence the erosion of the southern coast of Brazil. Therefore, the Brazilian south coast will

most often be exposed to wave effects, resulting in more intense and significant coastal processes.

The transfer methodology showed significant results to enable the description of the wave climate for the southern region of Brazil, where the unavailability of long database was supplied through an integration of numerical methods. Although the results were satisfactory, and a time series was reconstructed for a period of 14 years, as a future work, it will be necessary to assess the influence of overlapping sea states in the accuracy of the method.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by CNPq through a PhD scholarship. The third author was supported by Grant MTM2011-24766 of the MICINN, Spain, and also by the Basque Government through the BERC 2014-2017 program and by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness MINECO: BCAM Severo Ochoa excellence accreditation SEV-2013-0323.

REFERENCES

1. Araújo, C.E.S., Franco, D., Melo, E., Pimenta, F., 2003. Wave regime characteristics of southern Brazilian Coast. In: Proceedings COPEDEC VI, v. 97, p.15.
2. Bensi, M., Marinho, R.A., Maia, L.P., 2005. Wave climate and its implication to coastal erosion along the Ceara State. In: Proceedings CONBEP. pp. 802–815.
3. Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A Third Generation Wave Model for Coastal Regions. 1: Model Description and Validation. *J. Geophys. Res.-Oceans* 104 (C4), 7649–7666.
4. Corrêa, I.C.S., 1996. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP: L'exemple de la plate-forme continentale du Rio Grande do Sul, Brésil. *Marine Geology*, 130, 163-178.
5. Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A Hybrid Efficient Method to Downscale Wave Climate to Coastal Areas. *Coastal Engineering* 58 (9), 851–862.

6. Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S., 2011. Analysis of Clustering and Selection Algorithms for the Study of Multivariate Wave Climate. *Coastal Engineering* 58 (9), 453–462.
7. Carter, D.J.T., Draper, L., 1988. Has the northeast Atlantic become rougher? *Nature* 332, 494.
8. Dragani, W., Garavento, E., Simionato, C., Nuñez, M., Martín, P., Campos, M.I., 2008. Wave simulation in the outer Rio de la Plata estuary: an evaluation of SWAN model. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 134(5), 299–305.
9. Dragani, W., Romero, S., 2004. Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Rio de la Plata. *International Journal of Climatology* 24, 1149–1157.
10. Galiskova, L., Weisse, R. 2006. Estimating near-shore wave statistics from regional hindcasts using downscaling techniques. *Ocean Dynamics* 56, 26–35.
11. Gulev, S.K., Hasse, L., 1999. Changes of wind waves in the North Atlantic over the last 30 years. *International Journal of Climatology* 19 (10), 1091–1117.
12. Herman, A., Kaiser, R., Niemyer, H.D., 2009. Wind–wave variability in shallow tidal sea-spectral modelling combined with neural network methods. *Coastal Engineering* 56, 759–772.
13. Holthuijsen, L.H. et al., 2004. Swan Cycle III version 40.31, User's Manual. Delft: Delft Univ. of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section.
14. Jung, G.B., Toldo Jr., E. E., 2011. Longshore Current Vertical Profile on a Dissipative Beach. *Brazilian Journal of Geophysics* 29 (4), 691–702.
15. Kalnay, E.M., Kanamitsu, R., Kistler, W., Collins, D., Deaven, L., Gandin, M., Iredell, S., Saha, G., White, J., Woollen, Y., Zhu, M., Chelliah, W., Ebisuzaki, W., Higgins, J., Janowiak, K.C., Mo, C., Ropelewski, J., Wang, A., Leetmaa, R., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 437–470.
16. Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge Univ. Press, New York.
17. Pianca, C., Mazzini, P.L.F., Siegle, E., 2010. Brazilian Offshore Wave Climate Based on NWW3 Reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography* 58 (1), 53–70.

18. Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., Booij, N., 1999. A Third Generation Wave Model for Coastal Regions. 2: Verification. *Journal. Geophys. Res. Oceans* 104 (C04), 7667–7681.
19. Strauch, J.C., Cuchiara, D.C., Toldo Jr, E.E., Almeida, L.E., 2009. The pattern of waves of summer and autumn in the southern and northern coast of Rio Grande do Sul. *Brazilian Journal of Water Resources* 14 (4), 29–37.
20. Toldo Jr, E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S., 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. *Journal of Coastal Research* SI39, 390– 394.
21. Tolman, H.L., 1997. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151.
22. Tolman, H.L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166.
23. Tomazelli, L.J., 1993. The scheme Winds and Migration Rate Dunes Coastal Wind of Rio Grande do Sul, Brazil. *Research in Geosciences* 20 (1), 18–26.
24. WAMDIG, 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography* 18, 1775–1810.
25. Whitham, G.B., 1974. *Linear and Nonlinear Waves*. Wiley, New York.
26. WL | Delft Hydraulics, 2007. *Physical Formulation SWAN and Data for Validation: Report no. H3528*, Delft.

ARTIGO 2

WAVE POWER POTENTIAL IN SOUTHERN BRAZIL

Este capítulo apresenta o conteúdo segundo artigo que compõe esta tese e foi enviado para publicação em *Brazilian Journal of Oceanography* em 06/03/2018. O artigo foi formatado para melhor apresentação nesta tese, contudo, o conteúdo segue na íntegra o submetido à revista:

Felipe Sprovieri

De: Braz. j. oceanogr. - GNPapers <gnpapers@gnpapers.com.br>
Enviado em: terça-feira, 6 de março de 2018 13:59
Para: Felipe Caetano Sprovieri
Assunto: Artigo Submetido - Brazilian Journal of Oceanography



Ilmo(a) Sr.(a)
Prof(a), Dr(a) Felipe Caetano Sprovieri

Número do artigo: 170
Seção: Artigo Completo

Informamos que recebemos o manuscrito "Wave Power Potential in Southern Brazil". Ele será enviado para apreciação dos revisores com vistas à publicação no(a) Brazilian Journal of Oceanography. Por favor, para qualquer comunicação futura sobre o referido manuscrito cite o número do artigo apresentado acima.

O(s) autor(es) declara(m) que o presente trabalho é inédito e o seu conteúdo não foi nem está sendo considerado para publicação em outro periódico brasileiro ou estrangeiro, impresso ou eletrônico.

Obrigado por submeter seu trabalho.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Marcos César de Oliveira Santos
Editor-chefe

««« Enviado por GNPapers - Esta é uma mensagem automática - Por favor não responda este email
»»»

WAVE POWER POTENTIAL IN SOUTHERN BRAZIL

Felipe SPROVIERI ^a, Elírio E. TOLDO JR. ^a, Leandro FARINA ^{a,b},

^a Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre, RS, Brazil. CEP: 91501-970.

^b BCAM – Basque Center for Applied Mathematics, Mazarredo, 14 E48009 Bilbao, Basque Country – Spain.

Corresponding author: Felipe SPROVIERI, e-mail: felipe.sprovieri@gmail.com

Elírio E. TOLDO JR., e-mail: toldo@ufrgs.br

Leandro FARINA, e-mail: farina@mat.ufrgs.br

Abstract

Abstract

This paper presents an assessment of the energy potential of waves in southern Brazil, in deep water (3000m) off the coast of Rio Grande do Sul state, in intermediate water (17m), and in shallow water (4.2m) at Tramandaí beach based on two distinct temporal series during fourteen years (Jan /1997-Dec /2010) and analyzed separately. The time series was obtained through re-analysis data of the global operational model NOAA WaveWatch III (NWW3) before a hybrid downscale methodology, integrating numerical modeling of waves (dynamic) and mathematical tools (statistics) to reconstruct the complete time series in the coastal area was applied. The reconstruction methodology was validated by comparison with instrumented data measured in situ. Delft3D-WAVE model used in numerical modeling of waves was also compared with observational data. Information on wave energy in Brazil are limited and is mainly generated by analysis of typical waves scenarios/isolated extreme events. From the results obtained in this study it was established that there is important energy dissipation along the propagation of waves on the Brazilian south platform, although the potential energy available for extraction remains significant, with 76.3 MW m and 40.9 MW/m available per year in intermediate water depth and in Tramandaí Beach, respectively.

ADDITIONAL INDEX WORDS: Wave Power Potential, Southern Brazil, Energy Dissipation, Hybrid Downscale, Numerical Modeling, Tramandaí Beach.

1 INTRODUCTION

The ocean is a vast source of energy, which can be exploited from thermal gradients, salinity gradients, variations of the tides, tidal currents and waves, whose theme is discussed in this article (OES, 2011).

Scientific research on wave power began after the dramatic increase in oil prices in 1973 (Vicinanza, et. al., 2013). Wave energy is considered an energy resource from renewable sources, with high potential for development over the coming years (Iglesias and Carballo, 2009).

The interest in generating electricity from the waves has been sustained over the last decade by the rise in oil prices and the threat of climate change. Driven mainly by trial sector, recent and unremitting efforts aim to transform wave energy extraction in an industry, possibly able to provide a significant portion of the world's electricity needs.

To achieve this goal, supported by government funding, private equity funds and energy industries are needed. These players require market potential estimates on long-term technology in order to determine the value of investment in wave energy. (Gunn and Stock-Williams, 2012).

As wave energy is a predictable and abundant resource, detailed estimates of the energy potential become essential to support any technology implementation and subsequent operation of this resource usage.

Wave power presents a number of advantages over other free energy for CO₂ sources, such as the predictability of resources, high power density, and high utilization factor and, last but not least, low environmental impact and visual. (Henfridsson, et. Al., 1997)

Currently, the wave energy is being sold to potential customers based resources (waves) estimated (forecast) over the world, supplemented by more detailed studies for certain countries.

The total theoretical potential of wave energy is estimated at 29,500 TWh/year by Ocean Energy System (OES, 2011).

Energy potential of waves assessment has been carried out in various regions of the world including Europe (Pontes, et. al., 1998), EUA (Defne, et. al., 2009; Beyene and Wilson, 2007; Wilson and Beyene, 2007), Portugal (Mollison and Pontes, 1992; Pontes, et. al., 2005; Rusu and Soares, 2009), Sweden (Waters, et. al., 2009), Spain (Iglesias and Carballo, 2009; Iglesias, et. al., 2009; Iglesias and Carballo, 2010a; Iglesias and Carballo, 2010b; Iglesias and Carballo, 2010c), Australia (Hughes and Heap, 2010; Mark A. Hemer et. Al., 2016); Gulf of Oman (Saket and Etemad-Shahidi, 2012); Korea (Kim, et. al., 2011), Hawaii (Stopa, et. al., 2011), Canada (Dunnett and Wallace, 2009), India (Sivaramakrishnan , 1992), Mar Báltico (Henfridsson, et. al., 1997; Bernhoff, et. al., 2006), Argentina (Lanfredi, et. al., 1992), Uruguay (Teixeira, et. al., 2013), Chile (Garrad Hassan, 2009) and global assessments by Cornett (2009), Barstow, et. al. (2009), Barstow (1998) e Reguero, et. al. (2011).

The line of Brazilian south coast has moderate energy waves, influenced by the high pressure anticyclone of the South Atlantic and by the Polar Anticyclone. The waves regime in the southern Brazilian platform is constant, comprising the direction E-SE (100° and 160°) with wave heights ranging between 1 and 1.5 m. The wave period varies between 6 and 14 s, with a predominance of 8 s sea waves and 12 s swells. Measurements carried out at 17 m depth indicated maximum significant wave height of 4.0 m, distributed between the ENE and S directions, predominantly the direction SSE, with associated wave period of 19 s (Sprovieri, et. al., 2014 submitted).

The pattern of such waves and resulting energy potential is between 20 and 30 kW/m, according with annual averages obtained by Gunn and Stock-Williams (2012), by analyzing a period of 6 years (2005 to 2011) reanalysis wave data from the global model WaveWatch III (NOAA) (Figure 24).

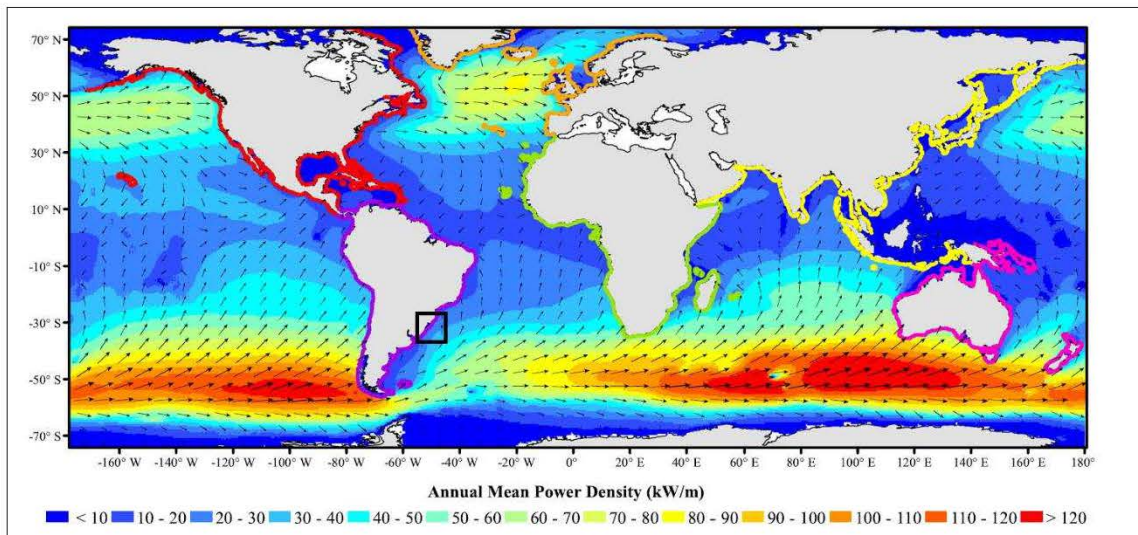


Figure 24. Annual mean wave power density (colour shades) and annual mean best direction (arrows). Adapted from Gunn and Stock-Williams (2012).

According to Brazilian Energy Balance (2014), the domestic energy supply (total energy demand in the country) reached 570 TWh in 2013. Of these, 391 TWh (68.6%) has hydroelectric origin, and only 6.6 TWh (15.1%) is wind generated. From these numbers is observed the urgent need for expansion of renewable energy sources.

The purpose of this article is to assess the potential of energy generated from the gravity waves (generated by the wind) on the south platform of Brazil, focusing on deep water (3,000 m) and shallow (17 m and 4.2 m), considering temporal and spatial variability and long-term trends.

General estimates can be useful to governments in order to determine the feasibility of extracting energy from waves in territorial waters and individualize the investment strategy for exploration. However, large scale assessment may be inadequate in the evaluation phase of the appropriate location for deployment, as well as the energy conversion method to be used in the devices design. Thus, after a rough assessment of the average power available, and the quantification of the potential of energy production in selected areas, a more detailed study is needed to provide accurate estimates of the wave energy potential in the most promising sites. Several studies have been conducted with this approach (see for instance, Iglesias and Carballo, 2010c).

This work on potential energy of the waves in southern Brazil is characterized from re-analysis data of the operational model NWW3, covering a period of 14 years (1997-2010). In addition to the energy conditions in deep water, energy patterns for shallow water are studied by numerical modeling with Delft3D (SWAN 40.72), where the

complete series of wave data is transferred to shallow water with a hybrid downscale methodology, which combines a dynamic approach (numerical models) and statistics (interpolation methods), reducing the computational effort (Sprovieri, et. al., 2014 submitted).

Section 1 shows the introduction of the work and the study area. The methodological description, including the steps of selection, propagation, calibration, wave reconstruction and validation of the method is presented in Section 2. Section 3 presents the results and discussions, where energy scatter plots combined, created to illustrate the contribution of different sea states with different significant wave heights and periods are presented and probability distributions are used to quantify the long-term energy extraction potential. Finally, Section 4 presents some conclusions about the work, with an additional consideration for the implementation of a converter in the study area.

1.1 Study Area

The southern Brazil platform is located between the Santa Marta Cape and Chui (28.5 - 34 S). Rio Grande do Sul Coastal Plain is located on this platform, with an extensive coastline with uniform NE-SO orientation and light meanders along its 630 km long, featuring the state's coastline. The absence of rocky headlands or bays along its length makes it a unique line of coast, with a sandy shore fully exposed to wave energy.

The Continental Shelf is part of a broad and passive margin, with more than 150 km long, maximum depths ranging between 100 and 140 m and gentle slope of the order of 0.06°.

In the south-central portion of the plain Tramandaí Beach (Figura 1) is located, with approximately 12 km long and oriented NNE-SSW, classified with a morphodynamic dissipative stage with bank structures and longitudinal groove (Jung et al., 2011) . The shoreface is extensive and shallow with outer boundary at a depth of 10 m, dominated by sandy deposits (Toldo et al., 2006).

In Figura 1 the location of buoy (red triangular symbol) and the energy extraction point (yellow circle symbol) locations are shown. The frames 3a and 3b show an expansion of the respective points near the beach.

The approaches in this work are delivered to the point located in deep water (3000m) and to the point in shallow water (4.2m), although we also present results for the wave measurement point at a depth of 17m.

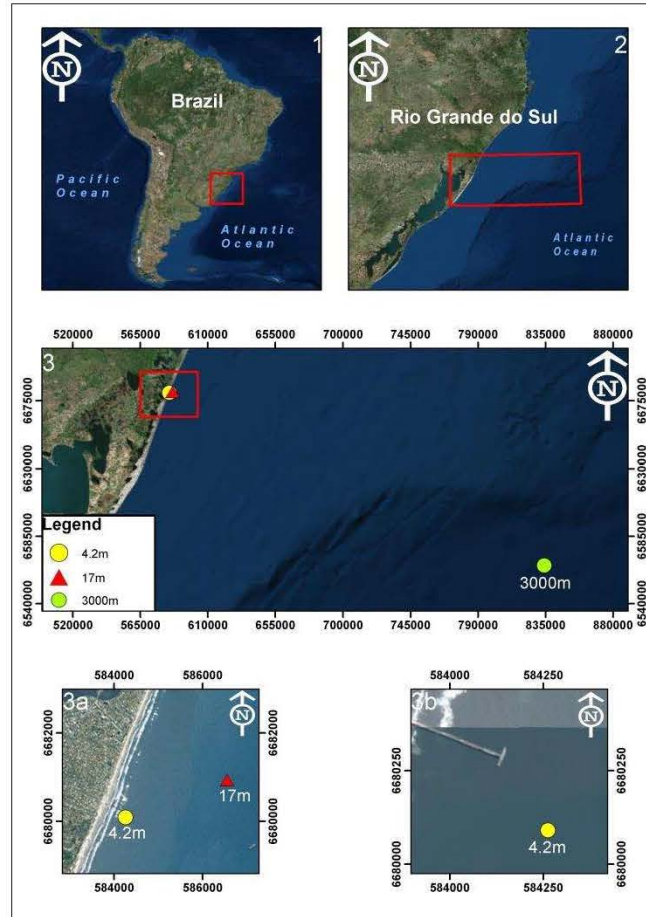


Figure 25. Map of the Rio Grande do Sul coast in south America with the location of Tramandaí beach. WGS - 84 Zone 22 S (UTM). Image: Google Earth ®.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Wave Data

This work integrates reanalysis wave data obtained from a global model (3000m), wave measurement data in situ (17m) and wave data near shore obtained by a downscale method (17m and 4.2m). The location of the points where wave data were used is presented in Figure 4.

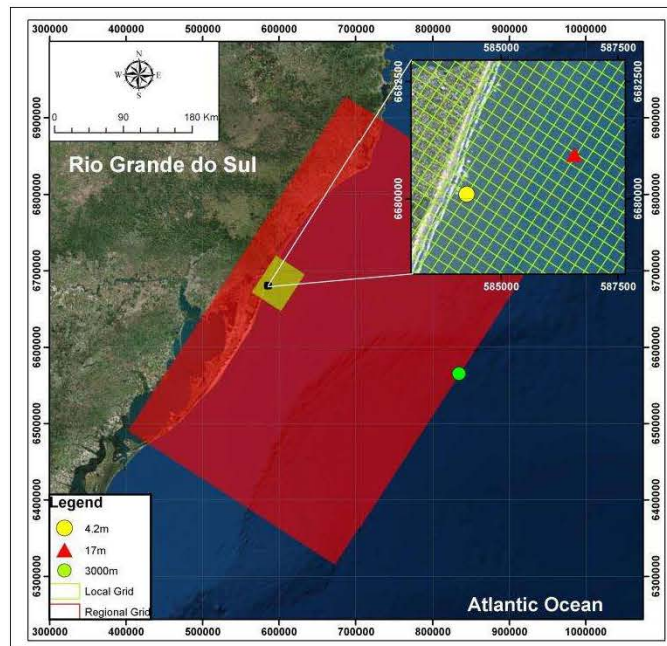


Figure 26. Location of wave resources, measuring equipment and numerical grids for wave downscale. Image: Google Earth ©.

The time series of 14 years (1997-2010) waves used is from the global model WaveWatch III (WWIII/NOAA). The output of the results provided by NOAA has a spatial resolution of $1.25^\circ \times 1^\circ$ and 3 hours time. The following output parameters were used: significant wave height (H_s); peak period (T_p) and mean wave direction (Θ_m). The parameters were selected at the point with coordinates $31^\circ 00'00''\text{S}$ and $47^\circ 30'00''\text{O}$ (WGS-84), located at a depth of approximately 3000 m (Figura 1 and Figure 4).

The WWIII model (Tolman 1997, 1999) is a model of third generation developed by NOAA/NCEP (Wardig 1988 Komen et al. 1994) that solves the equation of conservation of the wave action spectral density. The model assumes that the medium properties (depths and currents) and the wave field vary spatially and temporally. The model can simulate the generation and propagation of wave spectra forced by surface winds. The model considers the wind-wave generation processes, nonlinear wave-wave interactions, whitecapping and friction dissipation with the bottom.

Wave data were measured in 2006 with a directional Waverider buoy (Datawell®) anchored at a depth of 17 m at coordinates $30^\circ 00'42''\text{S}$ and $50^\circ 06'21''\text{W}$ (WGS 1984). As the measured data have many interruptions during the measurement period, in this work the wave measurements were used to assess the numerical model, and not to perform wave energy ratings.

Wave data near the coast were transferred from deep waters (3000m) by numerical modeling with Delft3D (SWAN 40.72), where the time series of 14 years was transferred to shallow waters to depths of 17m and 4.2m, with the hybrid downscale transfer methodology, which combines dynamic approach (numerical models) and statistics (interpolation methods), reducing the computational effort (Sprovieri, et. al., 2014 submitted).

For the calculation and characterization of energy wave for each point, it was assumed that the wave conditions (H_s , T_p and Θ_m) were maintained constant during the time between each 3 h output interval. Energy estimates are presented in kW/m and MWh/m, calculated as an annual energy means and total annual energy, respectively.

2.2 Wave Model

Processes such as refraction, diffraction, reflection, shoaling, rolling, surf and nonlinear interactions affect wave propagation from deep water to the vicinity of the coast. The result of these processes is that the wave properties and hence the energy of the waves differ significantly from deep, intermediate and shallow water.

Because of these changes, energy patterns of the waves near the coast in southern Brazil are investigated in this work by the numerical model Delft3D-WAVE (D3D-W).

The numerical model D3D-W, developed by Deltares, Delft, Holland, is part of the SWAN model (Simulating waves nearshore) which is a numerical model of waves that provides realistic estimates of wave parameters in coastal areas (Booij et al., 1999; RIS et al., 1999). Although this model is designed specifically for coastal applications, it can be applied for the generation and propagation of gravity waves on any scale. The model is based on the wave action balance equation. The spectrum considered is the density spectrum of the action, rather than the energy spectrum, where in the presence of currents the density action is conserved while the energy is negated (Whitham, 1974). A complete description of the formulations and model terms of interactions can be verified in Holthuijsen et al., (2004).

Wave energy is calculated in SWAN based on the x and y components by

$$J_x = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) C_g(f, h) \cos \theta \, df \, d\theta ,$$

$$J_y = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) C_g(f, h) \sin \theta \, df \, d\theta$$

where x and y are the geographic coordinates, ρ is the density of sea water, g is the acceleration of gravity, C_g is the group velocity, and $S(f, \theta)$ is the directional spectral density, which specifies how the energy is distributed over the frequency (f) and directions (θ) (Holthuijsen, 2007). The magnitude of the wave energy is given by:

$$J = (J_x^2 + J_y^2)^{\frac{1}{2}},$$

expressed in W/m (wave energy per unit length wavefront).

2.2.1 Computational Domain

The setting of the computational domain was performed with the Delft3D RGFGRID-module, an integrated tool to Delft3D modeling package, which allows the generation and manipulation of orthogonal and/or curvilinear numerical grids. The preparation of the numerical grids followed the required properties of orthogonality and softness in order to avoid interference of numerical noise, thus increasing the accuracy of the simulation (WL | Delft Hydraulics, 2007).

To simulate the wave propagation processes from the point at the WWIII grid to the vicinity of Tramandaí Beach, two meshes and nested calculations were carried out, with different resolutions, as shown in Figure 4.

The regional domain is a regular orthogonal grid consisting of 323 x 522 elements of calculation which presents its south contour approximately parallel to 3000 m isobath, allowing the external border of the mesh to represent an approximately constant depth along the computational domain. The spacing of the regional grid is 1000 meters. Locally, we use a regular orthogonal grid composed of 178 x 226 calculation elements spaced 250 meters, positioned in the vicinity of Tramandaí Beach, thus ensuring higher resolution calculations near the point of interest. The D3D-W model (SWAN) transfers the results obtained in regional domain automatically to the border of the mesh site.

2.2.2 Bathymetry

The depth values in the study area were obtained by scanning the Navigational Charts N°. 2200, 2100, 2010, 1911, 1910, 1900, 90 and 30, scanned and made available by the Directorate of Hydrography and Navigation of the Navy of Brazil (DHN) in digital format.

The depth data were corrected for the mean level (MSL) of the region as indicated in Nautical Chart 2100 with a difference of 0.13 meters in relation to the level of reduction of the DHN map.

2.2.3 Model comparison with buoy data

After comparing the model with observational data in one or more points, it will be possible to validate it and to extrapolate the output obtained to the entire computational domain with accuracy.

To quantify the differences between the wave data measured with the results of modeling we used the RMSE (Root Mean Square Error) according to the formula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

where P is the expected and O the observed variable.

Results in Figure 27 compare the wave data measured in situ with the results of modeling at the same point where the measurement was performed. The representation of the processes and patterns obtained by the model in relation to the measured data is satisfactory with RMSE of 6.03 kW/m.

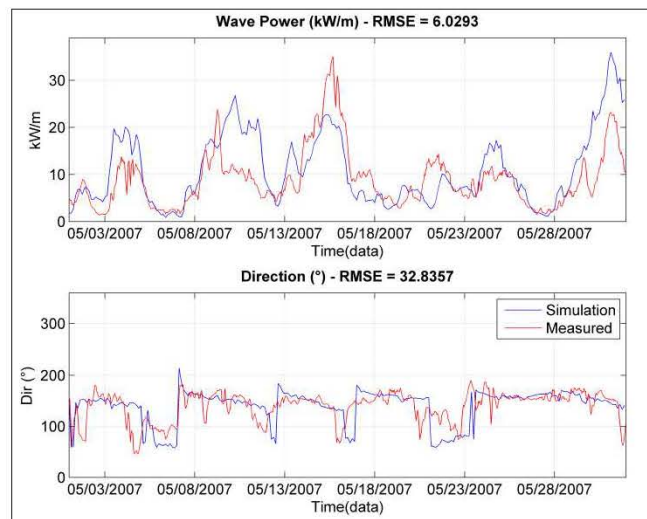


Figure 27. Differences between simulated and measured wave energy data in shallow water.

With the verified model we can propagate cases of deep water waves to shallow, and apply to transfer methodology for shallow water, quantifying the potential energy near the coast.

2.2.4 Wave Propagation

The propagation of the wave fields was performed in stationary mode, considering the effects of refraction, diffraction, dissipation with the bottom and dissipating due to wave breaking (used with the model's default coefficients). The input spectra were defined with the H_s , T_p and Θ_m data of selected cases, by adopting a JONSWAP spectrum with the gamma parameter, related to the spectrum peak sharpness, equal to 3.3.

The directional spread was set based on the peak period. Waves with longer period (swell), have a lower directional spread (4 to 15) and waves with shorter period (sea) have greater directional spread (15 to 25). The spectrum was discretized into 24 frequency components and 144 directional components. The model boundaries were set open, since wave data used as model boundary conditions affect all directions (0° to 360°) as shown in Figure 32.

The results of examples of wave energy propagation made with the D3D-W model with regional and local meshes are shown in Figure 28 and Figure 29, respectively.

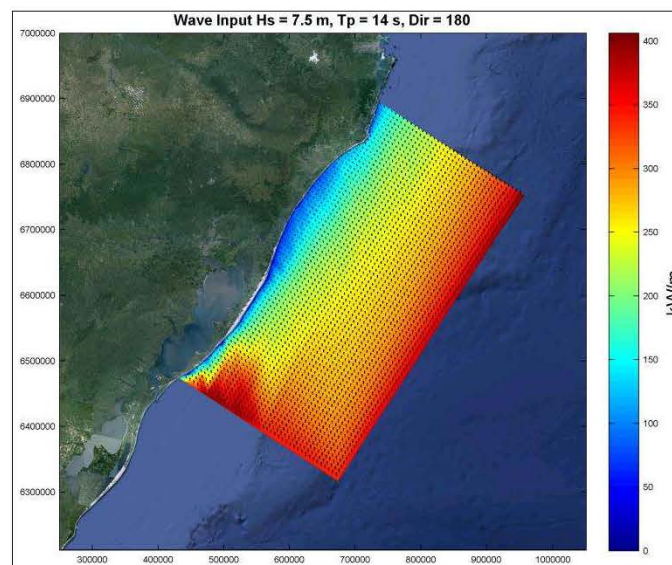


Figure 28. Results of wave energy propagation with D3D-W model on regional domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e Dirp = 180° .

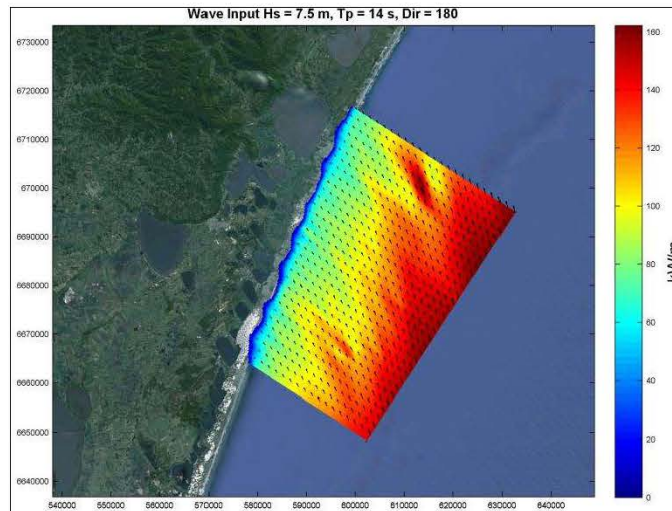


Figure 29. Results of wave energy propagation with D3D-W model on local domain. Case: $H_s = 7.5$ m, $T_p = 14$ s e $Dirp = 180^\circ$.

2.3 Time Series Reconstruction

The methodology used to transfer the climate of deep water waves to coastal areas, called Hybrid downscale, consists of: (a) wave climate determination in deep water from reanalysis data of the operating model NWW3; (B) selecting a representative subset of sea conditions (deep water); (C) propagating the subset of sea states in deep water to coastal areas through D3D-W wave propagation model (SWAN); (D) reconstruction of the time series in the coastal area using a cubic linear interpolation scheme; (E) validation of the results by comparison with observational data measured in situ. The aforementioned method is depicted in Figure 30.

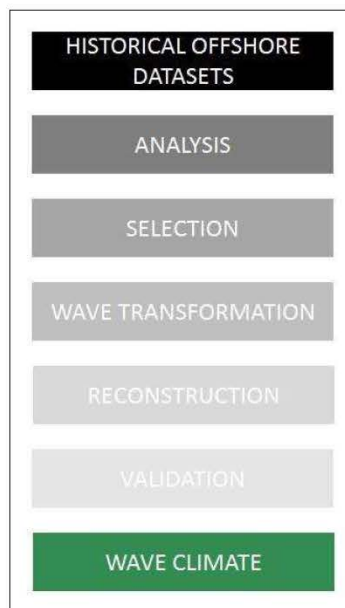


Figure 30. Methodological transfer scheme for the wave climate (downscale).

The application of this methodology makes it possible to transfer the complete time series at any point of interest in the computational domain. With the series of 14 years transferred to points at depths of 17m, and 4.2m (Figura 1), the energy characterization of the wave potential will be carried out.

2.3.1 Validation

To validate the transfer methodology employed, and to prove the effectiveness of the method, a simulation called brute-force was carried out, with the time series of WWIII for the period between 01/05/2007 and 31/05/2007 (the same period as the data measured in the field). This type of simulation is the propagation of cases obtained from WWWIII along one month, in total 240 cases propagated (H_s , T_p and Θ_m). The results of this brute-force simulation are compared with the results obtained by the transfer method, as shown in Figure 31.

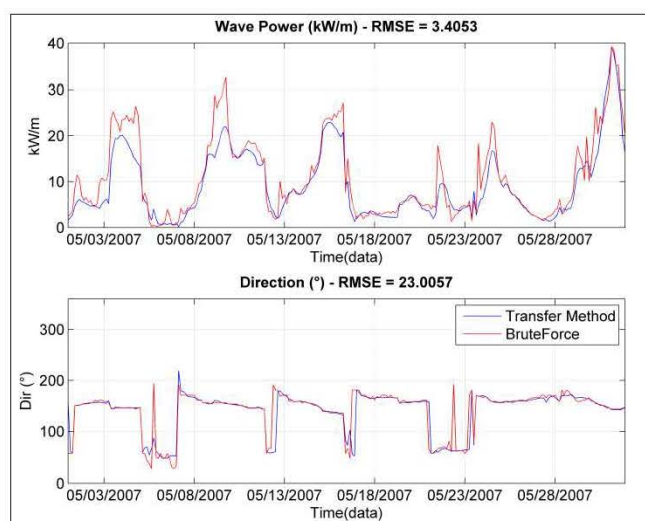


Figure 31. Comparison of the results by the brute-force simulation with WWIII (red line) versus the results obtained by the transfer method (blue line).

According to Figure 31, it is seen that the transferred series adequately reproduces the effects of time series of brute-force simulation series from deep water up to the point of interest (17 m), and therefore the use of the results to quantify the energetic potential of waves to southern Brazil is valid.

3 RESULTS

3.1 Offshore Wave Energy

Evaluation of the energy potential in deep waters was performed with a time series of 14 years (1997-2010) reanalysis data of the global model WWIII. The point chosen is located at 3,000 meters deep, as shown in Figura 1 and Figure 4.

In this work we have not executed the global model WWIII; the analyzed parameters (H_s , T_p and Θ_m) were obtained from the historical NOAA database. Thus, the wave energy was calculated according to the expression

$$P = \frac{\rho g^2 H_{m0}^2 T_e}{64\pi} \quad (5)$$

The results are shown in compass roses for wave energy in kW/m in Figure 32 and the mean annual energy distribution diagram in MWh/m, in Figure 33.

The presentation of the energy potential analysis of the waves at the 3000 m water depth will be used only as a reference in the discussion and comparison with the values obtained for shallow water.

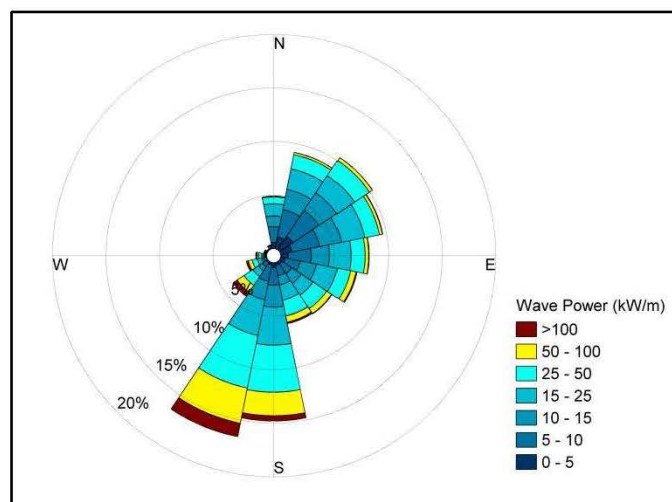


Figure 32. Rose of directions for the wave energy (kW/m) for WW3 reanalysis data (3000 m).

In Figure 32 it is observed that the largest energy magnitudes are from SSW and S, with events exceeding 100 kW/m. Wave energy of the N-S and E-E quadrant from 5 to 50 kW/m, wherein the quadrant-N and has a higher frequency of occurrence than the E-S.

Although the energy of the waves from W-S reaches high values, the frequency of occurrence thereof is less than 5%, compared to the other waves present in the analyzed time series.

The characterization of the annual wave energy resource in terms of significant wave height and wave energy period are shown in Figure 33, in the form of combined energy scatter diagram, which allows you to view the occurrence of different sea states and wave energy associated at the same time. It is important to note that these results, although based on an average of 14 years (1997-2010), are expressed in annual terms.

The color scale corresponds to annual energy by wavefront in MWh/(m/year), with the chart divided into colored squares 0.1s (ΔT_e) by 0.1 m (ΔH_s). The contour lines represent the wave energy based on the deep water approximation (Equation 5).

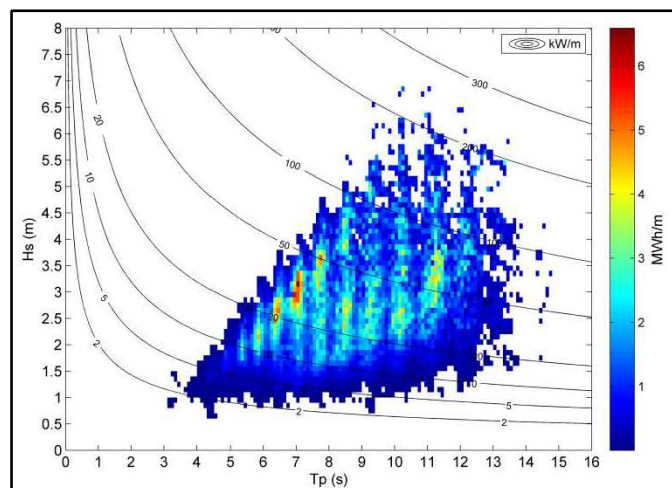


Figure 33. Characterization of the yearly mean wave energy at WW3 reanalysis data (3,000 m) in terms of significant wave height (H_s) and peaky period (T_p). The colour scale represents annual energy per meter of wave front (in MWh/m).

It is explicit in Figure 33 that the greater part of the energy is provided by the waves with significant heights between 2 and 5 m, with periods between 5 and 12 sec. The total annual energy wave by wavefront meter (based on 14 years) is 3225 MWh/m.

The value obtained is extremely high when compared to other works, eg. Iglesias and Carballo (2009), which quantified magnitudes between 289 and 462 MWh/m in the Death Coast region in Spain, with a base of 44 years of reanalysis for a depth of 88 388 m. Vicinanza, et. al., (2013) quantified magnitudes between 34 and 96 MWh/m in

the northwest region of Sardinia in Italy, through a 22 year reanalysis for a of depth 20-100 m.

The distribution of waves at the point in water of 3,000 m depth has variation in the significant wave height parameter of 0.5 to 7.76 m, and from 2.88 to 18:18 s in the wave period. In terms of energy the minimum annual observed was 647 W/m and the maximum was 2.2 MW/m.

In Figure 34 it is shown the mean annual energy wave at 3,000m water depth. The values range from 22.1 to 31.7 kW/m for the years 1998 and 2010, respectively. The annual average between 1997 and 2010 (14 years) is 26.4 kW/m.

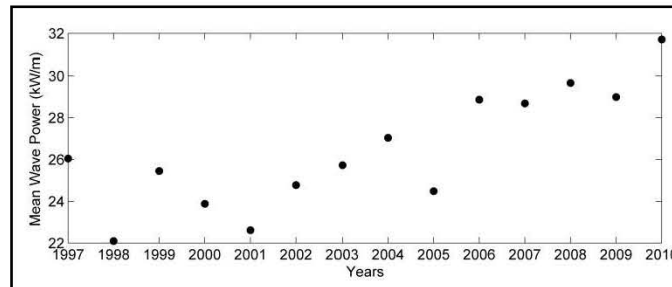


Figure 34. The yearly mean wave energy at WW3 reanalysis data (3000 m) for each year (kW/m).

Alonso (2012) through the project "URU-WAVE," assessed the energy potential of waves at the coast of Uruguay using 30 years (1980-2010) reanalysis data. The results showed an energy quantity of 30 kW/m at 200 km from the coast and 20 kW/m at 70 km. In the points near the coast an average potential of 8.5 to 9.3 kW/m was found for Punta del Este and La Paloma, and 10.4 to 3.8 kW/m for La Paloma and Chuy.

Comparing the values obtained in this work for the point located at 3,000 m depth off the coast about 275 km, with the energy potential of waves in Uruguay, at the point located 200 km from the coast, it is observed that the magnitudes are comparable, the difference between the average values of 3.6 kW/m is easily explained by the difference in temporal database used. Although the points are located at different depths, the scale of the processes is considered the same.

In Figure 35 we show the total annual wave energy at 3,000m deep. The values range from 193.5 to 277.7 MW/m, for the years 1998 and 2010, respectively. The mean annual energy between 1997 and 2010 is 230.36 MW/m.

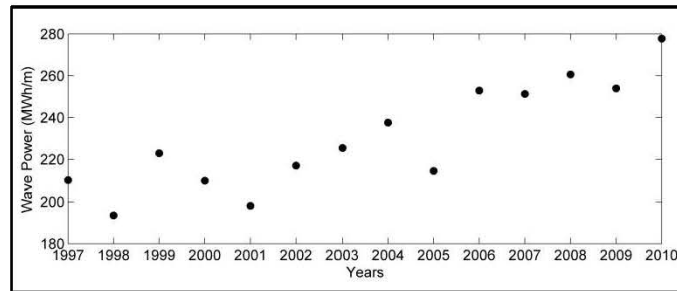


Figure 35. The yearly total wave energy at WW3 reanalysis data (3000 m) for each year (MWh/m).

3.2 Nearshore Wave Energy 17m

Quantification of energy resources generated by waves in shallow water is an essential information on the economic viability and execution of a conversion project and extraction. The economic operating conditions are controlled by the power source, the conversion efficiency, generated costs for construction and maintenance as well as investment in the transmission and distribution system.

Therefore, in the second phase, it is necessary to characterize the energy of waves in shallow water, or near shore and/or near the project implementation site, taking into account the availability of the resource measured by quantifying the available energy in deep water (3,000 m in this work).

To quantify the energy potential and possibly to develop an energy exploration project from the waves we have chosen one point at 17 m deep, near Tramandaí, a city located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil (Figure 4).

The results are shown in a compass rose for wave energy in Figure 36, expressed in kW / m and in the average annual wave energy distribution diagram in Figure 37, in MWh/m.

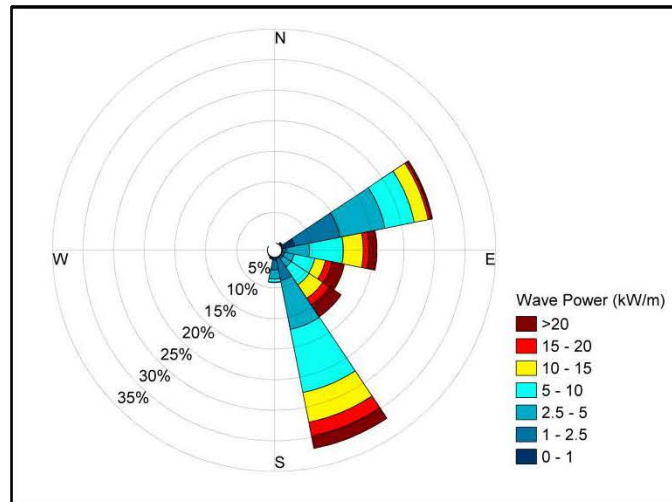


Figure 36. Rose of directions for wave energy (kW/m) for 17m wave data (17m).

The transformation processes of the waves along the propagation of deep water to shallow alter the directional and energy characteristics. As a result of this process it is seen in Figure 36 that the directions were limited to incidences between ENE and S, with respect to Figure 32.

The waves from SSE represent 32% of the occurrence and events are responsible for events with power greater than 20 kW/m. The ENE waves correspond to 25% of the occurrence and also reach magnitudes above 20 kW/m.

The other directions E, ESE and SE correspond to a total of 38% of occurrence of the events recorded in the analyzed time series (14 years), including energy values similar to the ones in other directions.

It is explicit in Figure 37 that the greater part of the energy is provided by the waves with significant heights between 1 and 2.5 m, with periods between 7 and 10 seconds. The total annual energy wave by wavefront meter (based on 14 years) is 1069 MWh/m.

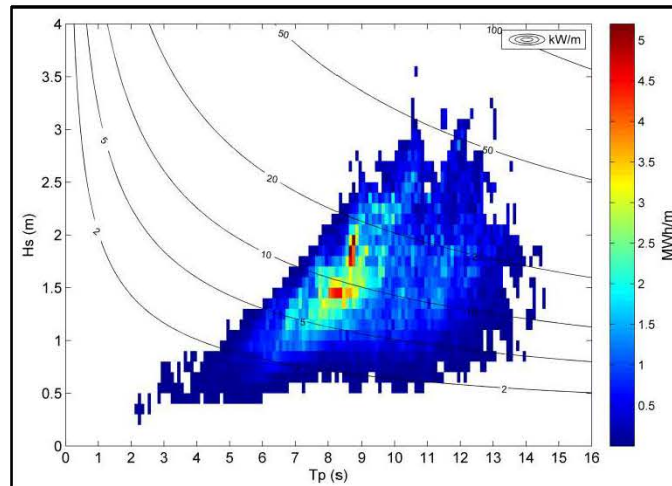


Figure 37. The yearly average wave energy at 17m wave data (17m) in terms of significant wave height (H_s) and peak period (T_p). The colour scale represents annual energy per meter of wave front (in MWh/m).

The distribution of the waves at 17 m depth presents a significant wave height variation of 0.13 m to 5.46 m, and from 2.0 to 18.16 s in the wave period. In terms of energy, the minimum annual energy observed was 52 W/m and the maximum is 1.7 MW/m.

In Figure 38 we show the mean annual wave energy at 17 m depth. The values range from 7.4 to 10.9 kW/m for the years 2003 and 2010, respectively. The annual average between 1997 and 2010 (14 years) is 8.7 kW/m.

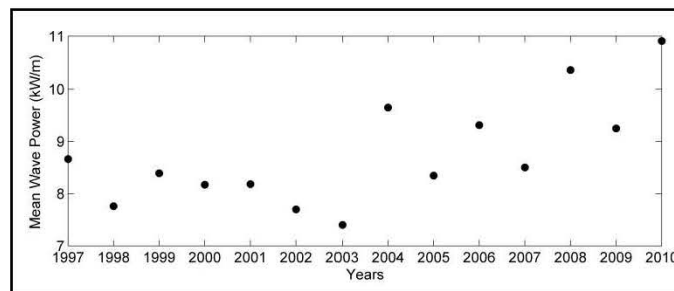


Figure 38. The yearly mean wave energy at 17m wave data (17m) for each year (kW/m).

The average value of 8.7 kW/m is found close to the calculated by Vicinanza, et. al., (2013) for various points of the coast of Sardinia, Italy, at the isobath of 20 m. The authors obtained values between 3.83 and 10.91 kW/m, with an average of 7.75 kW/m.

In Figure 39 we show the total annual energy wave at 17 m depth. The values range from 64.8 to 95.5 MW/m for the years 2003 and 2010, respectively. The mean annual energy between 1997 and 2010 is 76.33 MW/m.

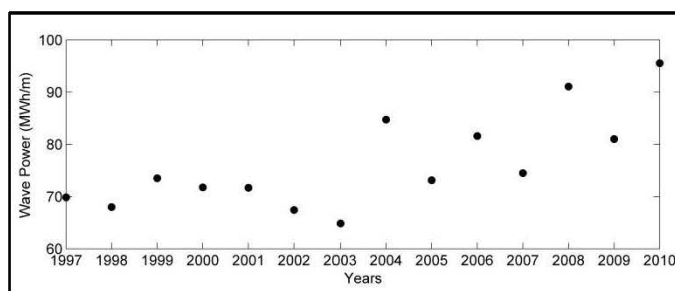


Figure 39. The yearly total wave energy at 17m wave data (17m) for each year (MWh/m).

According to the results shown, the energy reduction at the evaluated point in deep water (3,000 m) to the one located in intermediate water (17) is 154 MW/m or 67% of the wave energy are dissipated in the propagation towards the coast.

The determination of probabilistic energy potential for 50% of occurrence (kW/m50%), 90% of occurrence (kW/m90%), 99% of occurrence (kW/m99%) and the total annualized energy potential (MW_{Total}) in intermediate waters are presented in Table 1.

Table 1. Directional probability and statistics for annual wave energy of D3D-W (4.2 m).

Direction	Probability (%)	kW/m _{50%}	kW/m _{90%}	kW/m _{99%}	MW _{Total}
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NNE	0,00	0,13	0,13	0,13	0,00
NE	0,00	0,78	1,38	3,06	2,67
ENE	0,25	3,32	10,77	24,35	15,54
E	0,16	8,02	17,82	50,72	12,38
ESE	0,10	9,47	28,78	75,77	12,28
SE	0,12	10,48	26,24	48,19	26,70
SSE	0,32	6,52	16,96	44,23	6,55
S	0,04	2,50	5,62	10,79	0,19
SSW	0,00	1,01	2,43	5,07	0,02
SW	0,00	0,61	1,09	3,20	0,00
WSW	0,00	0,40	1,34	1,42	0,00
W	0,00	0,38	0,94	1,05	0,00
WNW	0,00	0,75	0,95	0,95	0,00
NW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

NNW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
------------	------	------	------	------	------

The highest energy probabilities are represented by wave from ENE and SSE, which represent 57% of the occurrence at 17 m with its energy potential of 29% (15.54 + 6.55 MW/m). But the greatest potential for energy available to this point is assigned to the SE waves, reaching 35% (26.70 MW/m). This direction corresponds to 12% of the frequency of occurrence of the cases analyzed in the time series.

3.3 Beach Wave energy 4.2m

After evaluating the energy potential of waves in deep and intermediate water we present an evaluation for Tramandaí Beach at 4.2 m depth.

The quantification of the resources in this location was chosen to support information for future conceptual design of wave energy extraction from the device installed on the fishing platform of Tramandaí (Figure 3, Table 3b).

The design and converter specifications to be used will then be established after this research.

In this analysis stage the results obtained in 4.2 m (Tramandaí Beach) will be compared with the results in intermediate water (17 m), quantifying the energy variations and potential directional patterns for the adoption of a conceptual project of extraction.

The results are shown by a compass rose for wave energy in Figure 40, expressed in kW/m and by the average annual wave energy distribution diagram in Figure 41, in MWh/m.

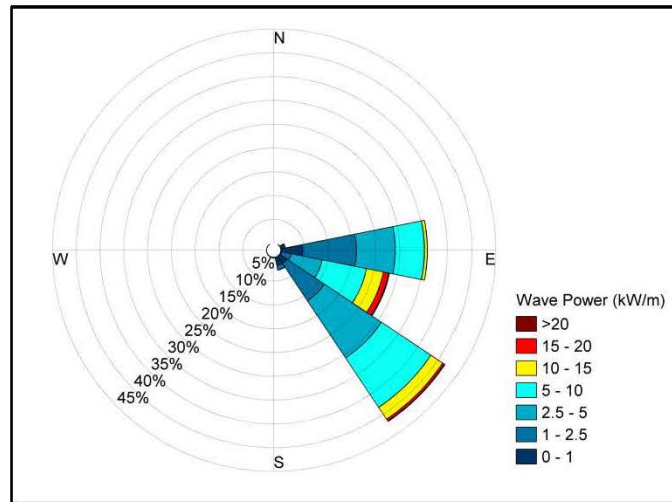


Figure 40. Rose of directions for wave energy (kW/m) for 4.2m wave data (4.2m).

The propagation of waves from intermediate to shallow water further limited the incident directions at 4.2 m depth, as is seen in Figure 40: the incidence directions were limited only between E and SE, compared to Figure 36.

The waves from SE represented 42% frequency of occurrence of cases and are responsible events with power greater than 20 kW/m. The waves from E correspond to 31% and those from ESE, 23% of frequency of occurrence, although these waves exhibit events limited to 20 kW/m.

The three directional ranges described above sum 96% of the frequency of occurrence recorded in the time series of 14 years. The other directions, which is ENE and SSE, correspond to the remaining 4% of the events recorded in the time series, but do not have high energy levels.

It is explicit in Figure 41 that the greater part of the energy is provided by the waves with significant heights between 0.7 and 2.3 m with periods between 7 and 12 sec. The average annual energy quantity between 1997 and 2010 is 573 MWh/m.

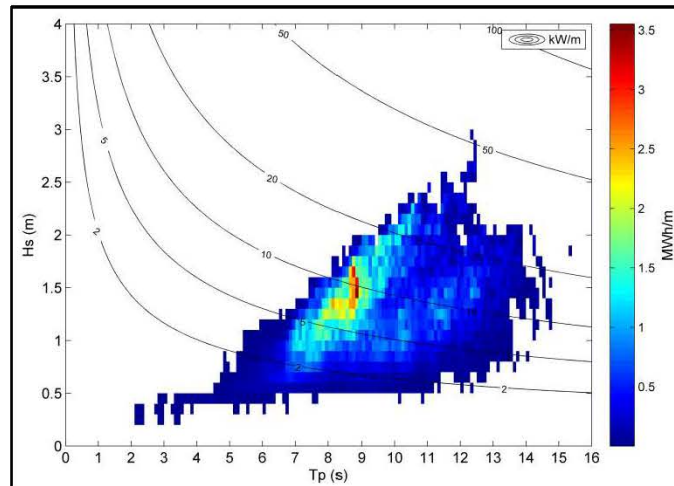


Figure 41. The yearly mean wave energy at 4.2m (4.2m) in terms of significant wave height (Hs) and peak period (Tp). The colour scale represents annual energy per meter of wave front (in MWh/m).

The distribution of the waves at 4.2 m depth has variation in the significant wave height parameter from 0.13 to 5.46 m, and from 2.0 to 18.16 s in the wave period. In terms of energy, the minimum annual energy observed was 45 W/m and the maximum was 1.2 MW/m.

In Figure 42 we show the mean annual energy wave at 4.2 m depth. The values range from 4.1 to 5.6 kW / m for the years 2003 and 2010, respectively. The annual average between 1997 and 2010 (14 years) is 4.7 kW m.

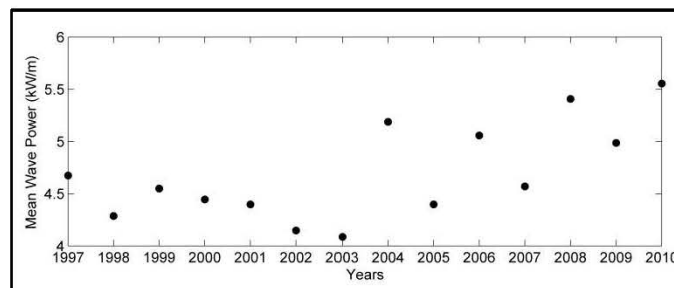


Figure 42. The yearly average wave energy at 4.2m wave data (4.2m) for each year (kW/m).

In Figure 43 shows the total annual energy wave at 4.2 m depth. The values range from 37.8 to 48.7 MW/m for the years 2003 and 2010, respectively. The annual average between 1997 and 2010 (14 years) is 40.94 MW/m.

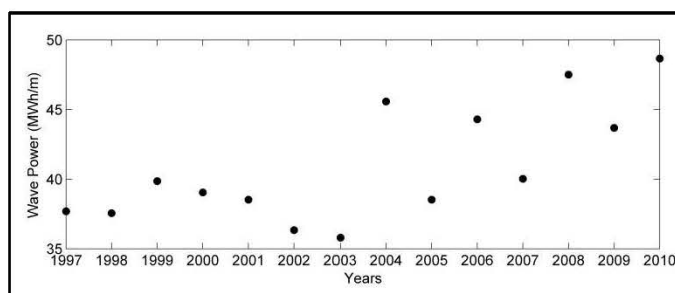


Figure 43. The yearly total wave energy at 4.2m wave data (4.2m) for each year (MWh/m).

The determination of probabilistic energy potential for 50% of occurrence (kW/m50%), 90% of occurrence (kW/m90%), 99% of occurrence (kW/m99%) and the total annualized energy potential (MWTota) in water shallow are presented in Table 2.

Table 2. Directional probability and statistics for annual wave energy of D3D-W (4.2 m).

Direction	Probability (%)	kW/m _{50%}	kW/m _{90%}	kW/m _{99%}	MW _{Total}
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NNE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NE	0,00	0,23	0,50	0,50	0,00
ENE	0,01	0,35	0,75	1,71	1,38
E	0,31	2,42	6,67	11,80	14,13
ESE	0,23	6,15	13,22	18,89	20,80
SE	0,42	3,99	9,46	15,98	4,60
SSE	0,03	0,79	1,75	2,54	0,02
S	0,00	0,23	0,92	4,13	0,00
SSW	0,00	0,26	1,03	1,26	0,00
SW	0,00	0,25	1,16	1,51	0,00
WSW	0,00	0,16	0,55	0,61	0,00
W	0,00	0,17	0,60	0,60	0,00
WNW	0,00	0,09	0,42	0,42	0,00
NW	0,00	0,13	0,13	0,13	0,00
NNW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

The highest probability of energy occurrence is represented by waves from SE, which represent 42% of the occurrence at 4.2 m with energy potential of 11% (4.60 MW/m). But the greatest potential for energy available to this point is assigned the waves from ESE, reaching 51% (20.80 MW/m). This direction corresponds to 23% of the frequency of occurrence of the cases analyzed in the time series.

4 CONCLUSIONS

A hybrid methodology (dynamic and statistical) for wave climate transfer in deep water to coastal area was applied numerically increasing the spatial resolution of the wave transformation phenomena. From the application of the transfer method for the wave reanalysis data (NWW3 - 3000m) of Rio Grande do Sul state, and the subsequent validation of the results (D3D-W - 17m) obtained from observational data measured in situ, the time series with 14 years of wave data (Hs, Tp and dirp) was rebuilt in intermediate and shallow waters near Tramandaí Beach.

The results of wave propagation with the model D3D-W model in shallow waters were compared with measured data and the reconstruction of the time series of waves with the transfer method has been validated. The results of applying integrated computational methods to assess the energy potential of waves on Tramandaí Beach - RS correlated with the measured data in the field, and with previous scientific work carried out on site. The linear interpolation algorithm applied in the reconstruction of the time series of waves showed high efficiency in relation to the comparison with the observational data measured in situ.

The energy potential of waves decreases toward the coast because of the energy dissipation of wave propagation processes on the South Brazilian Shelf. The refraction, diffraction, nonlinear interactions between waves, wind and wave interaction, among others, contribute to the energy dissipation process.

In general, the propagation of deep water waves at 3.000m toward the shore, specifically to the point located at intermediate water depth of 17 m, entails a 67% power dissipation. The waves propagated from the point at intermediate water to the point located in shallow water at 4.2 m depth suffer an energy dissipation of 46%.

Three points were investigated in detail in this research (i) deep water at 3.000 m; (ii) intermediate in 17 m water; (iii) shallow water at 4.2 m.

The calculated energy power density ranges between 230.36 MW/m/year for deep water, 76.33 MW/m/year for intermediate waters and 40.94 MW/m/year for shallow water.

The operating productivity by 50% of the time for converting the calculated feature for intermediate water is 10.48 kWh/m is 6.15 kWh/m to shallow waters, these assigned to swell from SE and ESE, respectively. The maximum calculated production is 75.77 and 18.89 kWh/m, respectively, but this power is achieved only 1% of the annual operating time.

Both points evaluated in intermediate and shallow waters have a high potential for future energy extraction projects of gravity waves.

If the project is set out in point located 17 m deep in intermediate waters, the layout of the energy converter must be oriented ENE or SSE. Both directions had a high frequency of occurrence of wave, 25% and 32%, with an annual energetic potential 15.54 and 6.55 MW/Year, respectively. However the waves from SE fosters greater energy potential, with a contribution of 26.70 MW/Year, due to higher significant wave heights of incident waves, approximately 42% higher than the waves from ENE.

The waves from SE showed the greatest energy potential in 17 m, but the frequency of occurrence of the same is only 12%, considerably limiting the operating time and possibly not meeting the needs of a possible power plant.

If the project is set out in a point located at 4.2 m depth, shallow water in Tramandaí Beach, the layout of the conversion structure should be directed to SE. This direction has a high frequency of occurrence of waves in relation to the other direction, with 42% of occurrence, with an energy potential of 4.60 MW/Year. However the waves from ESE fosters greater energy potential in this place, with a contribution of 20.80 MW/Year, due to higher significant wave heights, approximately 78% higher than the SE waves.

A third option in determining the design layout for implementation in 4.2 m depth is to use the waves from E, which have 31% frequency of occurrence and an annual energy potential of 14:13 MW/Year. This scenario is promising for the successful extraction

plant, since it meets the operational requirements of working frequency and the amount of energy available for conversion.

Thinking effectively in the design and implementation of a pilot project for energy extraction waves in Tramandaí - RS, in addition to determining the energy conversion method, what kind of Wave Energy Converters (WEC) to use, it will also be very important for success developing a mechanical structure sturdy to the physical action of waves and to chemical factors due to the corrosive nature of sea water. The converter ideally could modify hydro-dynamically the direction of incoming waves on the WEC by a hydrodynamic set of retro alignment with main direction of the incident wave train, enabling constant capture and consequent energy generation.

The magnitude of the energy potential of waves estimated in this work allows the prospect of wave energy as an alternative capable of performing a significant contribution to a sustainable national energy matrix, once technological, economic and environmental aspects are integrated for the development of the coastal zone, and the consequent expansion of the Brazilian renewable energy resources.

The transfer methodology showed significant results to allow the description of the energy potential of waves in the southern region of Brazil, in two distinct points of analysis, where the unavailability of a temporal database was suppressed by integrating numerical methods. Although the results are satisfactory, and a time series was reconstructed for a period of 14 years, as a future work it will be necessary to evaluate the influence of the energy system of the waves acting on an energy converter device prototype (WEC).

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by CNPq through a PhD scholarship.

REFERENCES

1. Akpınar, A., Kömürçü, M. I. Wave energy potential along the South-east coasts of the Black Sea. *Energy* 2012;42:289-302.

2. Araújo, C.E.S., Franco, D., Melo, E., Pimenta, F., 2003. Wave regime characteristics of southern Brazilian Coast. In: Proceedings COPEDEC VI, v. 97, p.15.
3. Bensi, M., Marinho, R.A., Maia, L.P., 2005. Wave climate and its implication to coastal erosion along the Ceara State. In: Proceedings CONBEP. pp. 802–815.
4. Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A Third Generation Wave Model for Coastal Regions. 1: Model Description and Validation. *J. Geophys. Res.-Oceans* 104 (C4), 7649–7666.
5. Brazilian Energy Balance 2014 Year 2013. 2014. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 288 pg.
6. Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A Hybrid Efficient Method to Downscale Wave Climate to Coastal Areas. *Coastal Engineering* 58 (9), 851–862.
7. Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S., 2011. Analysis of Clustering and Selection Algorithms for the Study of Multivariate Wave Climate. *Coastal Engineering* 58 (9), 453–462.
8. Carter, D.J.T., Draper, L., 1988. Has the northeast Atlantic become rougher? *Nature* 332, 494.
9. Corrêa, I.C.S., 1996. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP: L'exemple de la plate-forme continentale du Rio Grande do Sul, Brésil. *Marine Geology*, 130, 163-178.
10. Dragani, W., Garavento, E., Simionato, C., Nuñez, M., Martín, P., Campos, M.I., 2008. Wave simulation in the outer Rio de la Plata estuary: an evaluation of SWAN model. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 134(5), 299–305.
11. Dragani, W., Romero, S., 2004. Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Rio de la Plata. *International Journal of Climatology* 24, 1149–1157.
12. Galiskova, L., Weisse, R. 2006. Estimating near-shore wave statistics from regional hindcasts using downscaling techniques. *Ocean Dynamics* 56, 26–35.
13. Gulev, S.K., Hasse, L., 1999. Changes of wind waves in the North Atlantic over the last 30 years. *International Journal of Climatology* 19 (10), 1091–1117.
14. Gunn K, Stock-Williams C. 2012. Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*; 44:296-304.

15. Herman, A., Kaiser, R., Niemeier, H.D., 2009. Wind–wave variability in shallow tidal sea-spectral modelling combined with neural network methods. *Coastal Engineering* 56, 759–772.
16. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press; 2007.
17. Holthuijsen, L.H. et al., 2004. *Swan Cycle III version 40.31, User's Manual*. Delft: Delft Univ. of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section.
18. Iglesias G, Carballo R. Wave energy potential along the Death Coast (Spain). *Energy* 2009;34(11):1963-75.
19. Jung, G.B., Toldo Jr., E. E., 2011/ Longshore Current Vertical Profile on a Dissipative Beach. *Brazilian Journal of Geophysics* 29 (4), 691–702.
20. Kalnay, E.M., Kanamitsu, R., Kistler, W., Collins, D., Deaven, L., Gandin, M., Iredell, S., Saha, G., White, J., Woollen, Y., Zhu, M., Chelliah, W., Ebisuzaki, W., Higgins, J., Janowiak, K.C., Mo, C., Ropelewski, J., Wang, A., Leetmaa, R., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 437–470.
21. Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge Univ. Press, New York.
22. Mark A. Hemer et. al., 2016. A revised assessment of Australia's national wave energy resource" *Renewable Energy* xxx (2016) 1-23.
23. Ocean Energy Systems (OES). 2011. International Energy Agency. *An International Vision for Ocean Energy*.
24. Pianca, C., Mazzini, P.L.F., Siegle, E., 2010. Brazilian Offshore Wave Climate Based on NWW3 Reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography* 58 (1), 53–70.
25. Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., Booij, N., 1999. A Third Generation Wave Model for Coastal Regions. 2: Verification. *Journal. Geophys. Res. Oceans* 104 (C04), 7667–7681.
26. Strauch, J.C., Cuchiara, D.C., Toldo Jr, E.E., Almeida, L.E., 2009. The pattern of waves of summer and autumn in the southern and northern coast of Rio Grande do Sul. *Brazilian Journal of Water Resources* 14 (4), 29–37.
27. Toldo Jr, E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S., 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. *Journal of Coastal Research* SI39, 390– 394.

28. Tolman, H.L., 1997. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151.
29. Tolman, H.L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166.
30. Tomazelli, L.J., 1993. The scheme Winds and Migration Rate Dunes Coastal Wind of Rio Grande do Sul, Brazil. *Research in Geosciences* 20 (1), 18–26.
31. Vicinanza, D., Contestabile, P., Ferrante, V. Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*. 2013:50:506-521.
32. WAMDIG, 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography* 18, 1775–1810.
33. Whitham, G.B., 1974. *Linear and Nonlinear Waves*. Wiley, New York.
34. WL | Delft Hydraulics, 2007. *Physical Formulation SWAN and Data for Validation: Report no. H3528*, Delft.

ARTIGO 3

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PRAIAL NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL

Este capítulo apresenta o conteúdo terceiro artigo que compõe esta tese e será enviado à revista *Pesquisas em Geociências*. A seguir o conteúdo submetido é apresentado com ajustes na formatação a fim de melhorar a apresentação do mesmo.

Felipe Sprovieri

De: Felipe Sprovieri <felipe.sprovieri@gmail.com>
Enviado em: segunda-feira, 5 de março de 2018 14:26
Para: 'pesqgeoc@ufrgs.br'
Cc: 'Elirio Ernestino Toldo Junior'
Assunto: Modelagem do Transporte de Sedimentos Praial no Litoral Norte do Rio Grande do Sul
Anexos: Carta_Editor.pdf; SPROVIERI_TOLDO_Modelagem_Transporte_Sedimentos_RS-REV00.pdf

Prezado Editor Chefe,

Venho através deste encaminhar o manuscrito anexo para vossa apreciação, e solicitar intensão de publicação na Revista Pesquisas em Geociências.

Encaminho também anexo a Carta ao Editor, cujas informações são confirmadas, bem como, os possíveis revisores são indicados.

Agradeço pela oportunidade e me coloco a disposição para quaisquer esclarecimentos.

Cordialmente,

Felipe Sprovieri

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PRAIAL NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL

Felipe SPROVIERI ^a, Elírio E. TOLDO JR. ^a, Leandro FARINA ^{a,b},

^a Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre, RS, Brazil. CEP: 91501-970.

Felipe SPROVIERI, e-mail: felipe.sprovieri@gmail.com

Elírio E. TOLDO JR., e-mail: toldo@ufrgs.br

ABSTRACT

O presente trabalho apresenta o transporte de sedimentos e a evolução morfológica anual ao largo da costa norte do estado do Rio Grande do Sul, com base em uma série temporal de dados de onda de quatorze anos (Jan/1997-Dez/2010), a qual foi obtida através de dados de reanálise do modelo operacional NWW3 (águas profundas), e posteriormente foi aplicada uma metodologia híbrida (dinâmica + estatística) de transferência (downscale), integrando modelagem numérica de ondas (dinâmica) e ferramentas matemáticas (estatística), para reconstruir a série temporal completa na área costeira. A metodologia de reconstrução foi validada através da comparação com dados instrumentados medidos in situ. O modelo DELFT3D-WAVE utilizado na modelagem numérica de ondas também foi calibrado com dados instrumentados. A partir deste foi aplicado à técnica de redução de casos de onda através do Fluxo Médio de Energia e foram selecionados 36 cenários representativos para modelagem do transporte sedimentar. Cada cenário foi representado pela frequência de ocorrência em relação à série temporal, possibilitando assim a quantificação das taxas referentes a cada propagação. A determinação das taxas foi calculada em uma área de 45 km de linha de costa, limitada entre o Perfil 30N até 15S, com extensão até a profundidade de fechamento. O fluxo resultante é para norte, com uma taxa líquida de 1.098.945 m³/ano, onde o valor médio ao longo do ano foi de 2.849 m³/m/ano. As magnitudes obtidas pelas simulações numéricas, condizem com os gradientes de transporte de sedimentos ao longo da costa, segundo estudos anteriores realizados por outros autores. Em geral, os resultados da variação

volumétrica dos perfis de praia demonstram que a maior parte da área estudada está com aporte sedimentar, provenientes do sul para norte, apresentando uma tendência acresciva, com taxa de sedimentação média de 1,8 m³/m ao ano. Os resultados obtidos neste trabalho condizem com estudos anteriores realizados por outros autores na área.

1 INTRODUÇÃO

A abordagem dos estudos sobre o transporte de sedimentos em ambientes costeiros deixou de ser apenas descritiva, partindo de simples modelos analíticos para sofisticados modelos numéricos. Embora o nível tecnológico atual possibilite o uso de computadores potentes, aliado a novas técnicas de processamento numérico, o cálculo do transporte sedimentar em praias ainda apresenta incertezas consideráveis. Isso é explicado pelo complexo comportamento hidrodinâmico das ondas e correntes, associado aos mecanismos de movimentos dos sedimentos, atuantes na zona de surfe e espraiamento das praias (Sprovieri, 2010 e 2011).

Basicamente o processo de transporte em praias dissipativas consiste na migração longitudinal dos sedimentos paralelamente a linha de costa, em ambos os sentidos, e ocorre principalmente devido a incidência oblíqua das ondas, responsáveis pela geração de correntes hidráulicas longitudinais, com capacidade de mobilizar e transportar grandes volumes de sedimento. A arrebentação da onda sobre o perfil ativo da praia coloca em suspensão os sedimentos, e a corrente longitudinal induzida movimenta o material suspenso através de forças hidrodinâmicas, realizando o transporte do material em suspensão turbulenta ou por arrasto de fundo.

Como os mecanismos que governam o processo de transporte, bem como, as taxas, afetam diretamente a qualidade, durabilidade, segurança e custos (gerenciamento) envolvidos em obras costeiras e de infraestrutura, é imprescindível a necessidade de aprimorar ainda mais as técnicas utilizadas nesta área do conhecimento (Sprovieri, et al., 2012).

Nos últimos anos, simulações numéricas multidecadais (reanálise ou hindcasts) de ondas do mar foram desenvolvidas para melhorar o conhecimento do clima de ondas em águas profundas, especialmente em locais onde os dados instrumentais não estão disponíveis (Camus et al., 2011). Os modelos de reanálises de ondas têm permitido

uma detalhada descrição do clima de ondas em locais onde medições de longo prazo não estão disponíveis ou não existem. Desta forma, a aplicação deste recurso proporciona registros temporais longos e contínuos, com resolução espacial satisfatória.

A partir das bases de dados de reanálise de ondas associado à metodologia híbrida de transferência de ondas de águas profundas para rasas, e técnicas numéricas de modelagem é possível quantificar as taxas de transporte de sedimentos na zona de surfe e pós-praia.

Neste estudo foi utilizada uma série temporal de ondas de 14 anos (Jan/1997-Dez/2010) obtida através da metodologia de downscale híbrida. A metodologia consiste em reduzir o número de casos de onda para aplicar o downscale dinâmico, sem alterar a representação da série temporal original em águas profundas, a qual foi reconstruída em águas rasas, através da abordagem estatística. Portanto, os dados de reanálise horária de onda de longo prazo em águas profundas são selecionados em um número reduzido de casos, estes são propagados com modelo Delft3D-WAVE, capaz de simular os complexos processos de transformação, e por fim, a série temporal completa é transferida através de um algoritmo de interpolação para águas rasas.

O objetivo deste trabalho é determinar as taxas de transporte de sedimento e consequente às variações morfológicas anuais para o litoral médio norte do estado do Rio Grande do Sul, principalmente para a Praia de Tramandaí, através da integração de métodos numéricos, medições direcionais de ondas in situ e modelagem numérica de ondas, correntes e transporte de sedimentos.

Na Seção 1 é apresentada a introdução do trabalho e a área de estudo. A descrição metodológica, incluindo as etapas de seleção, propagação, calibração, reconstrução de ondas, validação do método e a modelagem do transporte de sedimentos é apresentada na Seção 2. Na Seção 3 são apresentados os resultados e discussões. Finalmente, na Seção 4 são apresentadas algumas conclusões sobre o trabalho.

1.1 Área de Estudo

A plataforma do sul do Brasil está localizada entre o Cabo de Santa Marta e o Chuí (28,5 – 34° S). A Planície Costeira do estado do Rio Grande do Sul está localizada nesta plataforma, onde uma extensa costa com orientação uniforme NE-SO e leve sinuosidade ao longo dos seus 615 km de extensão, caracterizam a linha de costa do estado. A ausência de promontórios rochosos e/ou baías ao longo de sua extensão a torna uma linha de costa singular, sendo uma costa arenosa totalmente exposta à energia incidente do ambiente oceânico. Toda esta extensão é constituída por depósitos quaternários inconsolidados que não recebem contribuições de areias modernas, pois toda carga de tração transportada pela rede de drenagem interior é retida nas lagoas e outros ambientes costeiros, como por exemplo, a Lagoa dos Patos (32° S). A Plataforma Continental é parte de uma ampla e passiva margem, com mais de 150 km de extensão, profundidades máximas variando entre 100 e 140 m e suave declividade da ordem de 0,06°. Na porção centro-sul da planície está localizada a Praia de Tramandaí (Figura 1), com aproximadamente 12 km de extensão e orientação NNE–SSO, classificada no estágio morfodinâmico dissipativo com estruturas de banco e cava longitudinal (Jung et al., 2011). A antepraia é extensa e rasa com limite externo na profundidade de 10 m, onde predominam depósitos arenosos (Toldo et al., 2006).

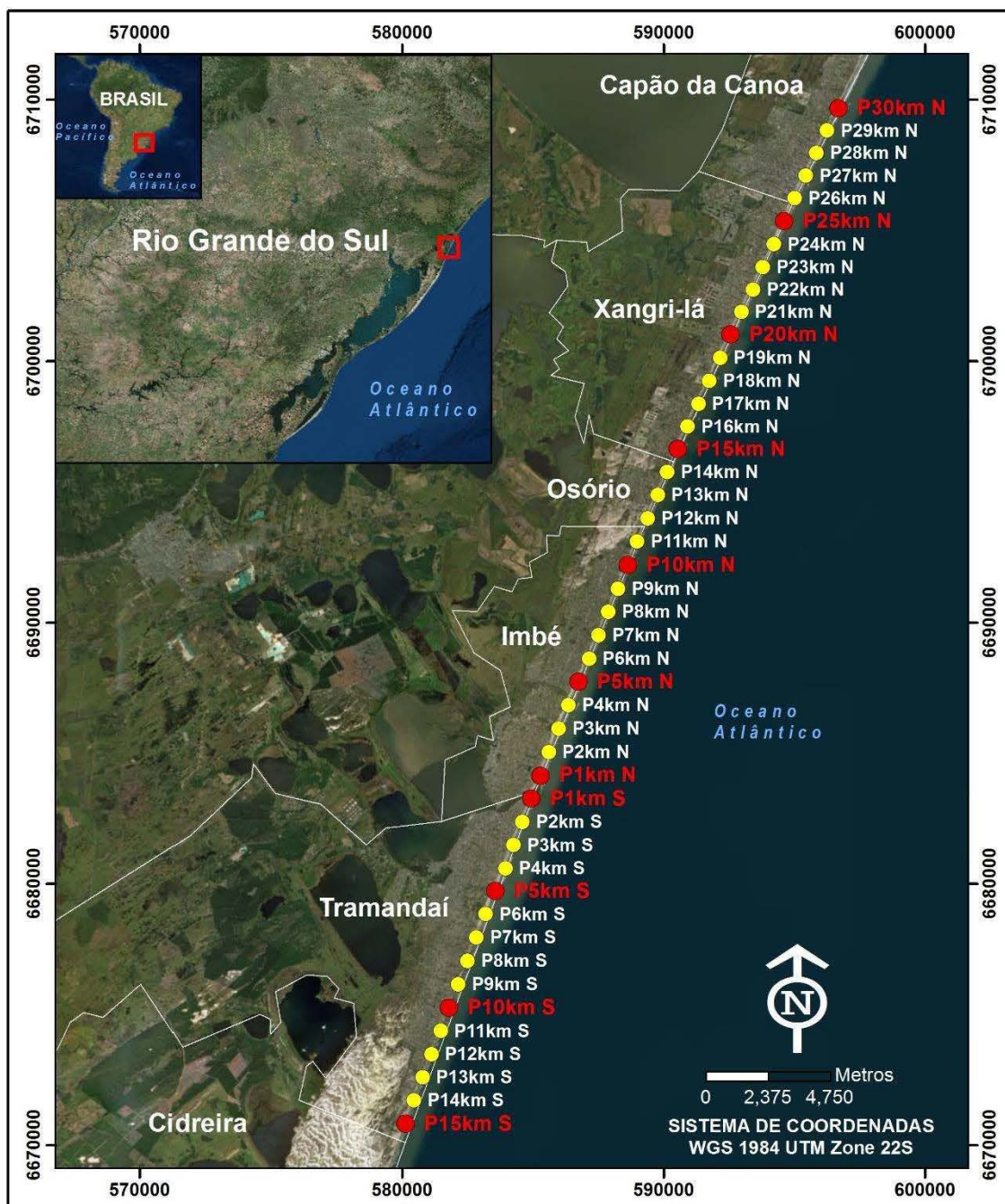


Figura 44. Localização da área de estudo, mostrando os perfis virtuais do transporte no sistema praiial. Imagem: Google Earth®.

Os sedimentos praiiais da região norte do estado consistem principalmente de areias finas bem selecionadas (tamanho médio de 0.2 mm), (Nicolodi et al. 2002, Gruber 2002). Sendo retrabalhados pelas ondulações geradas no Oceano Atlântico Sul e vagas geradas pelos fortes ventos locais de verão e primavera, provenientes de NE. Exceto pela passagem de frentes frias de S e SE, a agitação marítima é caracterizada por ondas de média a elevada energia, sendo a altura significativa de 1,4 m e período entre 7 e 9 s (Almeida e Toldo, 1997). A maré astronômica é semidiurna, com altura

média de 0,30 m, sendo que a maré meteorológica pode alcançar 1,20 m (Almeida et al., 1997). A profundidade de fechamento é estimada em 7,5 m, calculada com base em dois conjuntos de dados coletados nos anos de 1963 e 1996 no Litoral Norte do estado (Almeida et al., 1999). Conseqüentemente, o transporte e a deposição dos sedimentos ao longo da costa são primariamente dominados pela ação da onda.

As taxas do transporte sedimentar foram calculadas para uma área longitudinal de 45 km de linha de costa, abrangendo os municípios de Capão da Canoa, Xangri-lá, Osório, Imbé e Tramandaí, região Norte do estado do Rio grande do Sul respectivamente. A limitação da distância transversal do cálculo das taxas de transporte se deu ao longo de aproximadamente 1 km, contemplando toda zona de surfe, bem como as zonas da antepraia e pós-praia. Ou seja, a seção transversal corresponde ao perfil praiado ativo, desde a interação da onda sobre o fundo até a região final do espraiamento. Este trecho foi delimitado, por ter o território com as maiores taxas de densidade demográfica da região (Stroahaecker e Toldo, 2007), bem como, ser a faixa do litoral gaúcho mais procurada pelo turismo, e portanto, um trecho com necessidade iminente de planejamento e gestão integrados sobre questões de ocupação da orla e mobilidade praiado.

2 METODOLOGIA

2.1 Síntese Metodológica

A metodologia proposta para quantificar as taxas anuais de transporte de sedimentos e evolução morfológica consiste em: (a) definição do clima de ondas em águas profundas a partir de dados de reanálise do modelo operacional NWW3; (b) seleção de um subconjunto representativo de estados do mar (águas profundas); (c) propagação do subconjunto de estados do mar representativos de águas profundas para áreas costeiras através de modelo de propagação de ondas D3D-W; (d) reconstrução da série temporal na área costeira utilizando um esquema de interpolação linear cúbico; (e) validação dos resultados a partir da comparação com dados instrumentados medidos in situ; (f) seleção de casos representativos; (g) modelagem do transporte de sedimentos. O produto desta metodologia resultou na definição de 36 cenários de agitação representativos, os quais foram aplicados para possibilitar a quantificação das taxas de transporte de sedimentos. Outros exemplos

de aplicação da metodologia em questão podem ser encontrado em Sprovieri et. al., 2017a e Sprovieri et. al., 2017b.

2.2 Ventos

Os ventos regionais que afetam a costa do estado do Rio Grande do Sul são relacionados principalmente com dois sistemas de alta pressão, o Anticiclone do Atlântico Sul, mais ativo durante os meses de verão, e o Anticiclone Móvel Polar, mais influente durante os meses de inverno, os quais determinam a predominância de ventos de NE nos meses de primavera e verão, e dos ventos de W-SW nos meses de inverno. Segundo Tomazelli (1993), análises de ventos caracterizam a região como de alta energia e de baixa variabilidade direcional.

A compilação dos registros de ventos para forçar o modelo D3D-W foi realizada através de dados provenientes do programa de reanálise do NCEP/NCAR Reanalysis Project (Kalnay et. al., 1996). Esta base é composta a partir de modelos globais alimentados com dados observacionais, e como produto apresenta o campo de componentes do vento para 10 m de altitude.

A série temporal de vento foi obtida para o elemento de grade de cálculo localizado nas coordenadas 31°00'00"S e 47°30'00"O (DATUM WGS-84). Os registros foram extraídos de uma malha global com resolução de 1,25° x 1°. O período extraído consistiu entre janeiro de 1997 até dezembro de 2010, totalizando 14 anos. A série temporal de vento extraída (NCEP/NCAR) foi aplicada como condição de contorno no modelo D3D-WAVE.

2.3 Ondas

O regime de ondas predominante no estado do Rio Grande do Sul é composto por ondulações de direção E-SE, com altura de onda entre 1 e 1,5 m. O período de onda varia entre 6 e 14 s, com predomínio de ondulações de 8 s (vaga) e 12 s (ondulação).

Segundo Strauch et al., (2009), a partir de dados medidos na Praia de Tramandaí em 2006 e 2007 com ondógrafo direcional Waverider (Datawell), no verão a ondulação incidente é distribuída entre as direções ENE e S, com valores de altura significativa proporcional dividida até 1,5 m e 3,0 m de ESE e SSE, com predomínio daqueles de SE. Os períodos de onda para esta época do ano apresentaram maior frequência de ocorrência com 9 s até 12 s, contudo existem registros de 15 s. No outono, os resultados indicaram altura significativa máxima de onda de 4,0 m, distribuídas entre

as direções ENE e S, com predomínio para a direção SSE. No outono o período de onda máximo registrado foi de 19 s, este proveniente de SSE. Com o objetivo de conhecer o clima de ondas a partir de uma maior série de dados, foi realizado um estudo inicial a partir de águas profundas, com dados do módulo de reanálise do modelo de geração e propagação de ondas em águas profundas WWIII (Tolman 1997, 1999).

Os parâmetros de ondas utilizados neste estudo correspondem a uma série temporal de altura significativa de ondas (H_s), período de pico (T_p) e direção associada ($Dirp$), obtidos a partir das simulações do modelo WWIII, alimentado com dados de vento provenientes da NCEP/NCAR. Neste trabalho este modelo não foi rodado, pois os resultados utilizados foram extraídos do banco de dados global disponibilizado pela NOAA. O modelo WWIII (Tolman 1997, 1999) é um modelo de terceira geração desenvolvido pela NOAA/NCEP (Wamdig 1988, Komen et al. 1994) que resolve a equação da conservação da densidade espectral da ação de onda. O modelo assume que as propriedades do meio (profundidades e correntes), bem como o campo de ondas, variam em escalas espaciais e temporais muito superiores às variações de uma única onda. O modelo permite simular a geração e propagação de espectros de ondas com base em dados de vento, através de interações não-lineares onda-onda, dissipação por whitecapping (“encarneiramento”) e fricção com o fundo.

Uma série temporal de ondas com abrangência de 14 anos foi extraída do banco de reanálise da NOAA, e a partir desta, o clima de ondas foi analisado. A localização do ponto de extração dos registros de ondas em águas profundas foi o mesmo utilizado nos registros de ventos, localizado a uma profundidade de aproximadamente 3000 m (Figura 45). A série extraída é composta por Ano, Mês, Dia, Hora, Minuto, H_s em metros, T_p em segundos e $Dirp$ em graus, com resultados diários a cada três horas, totalizando 40.692 registros.

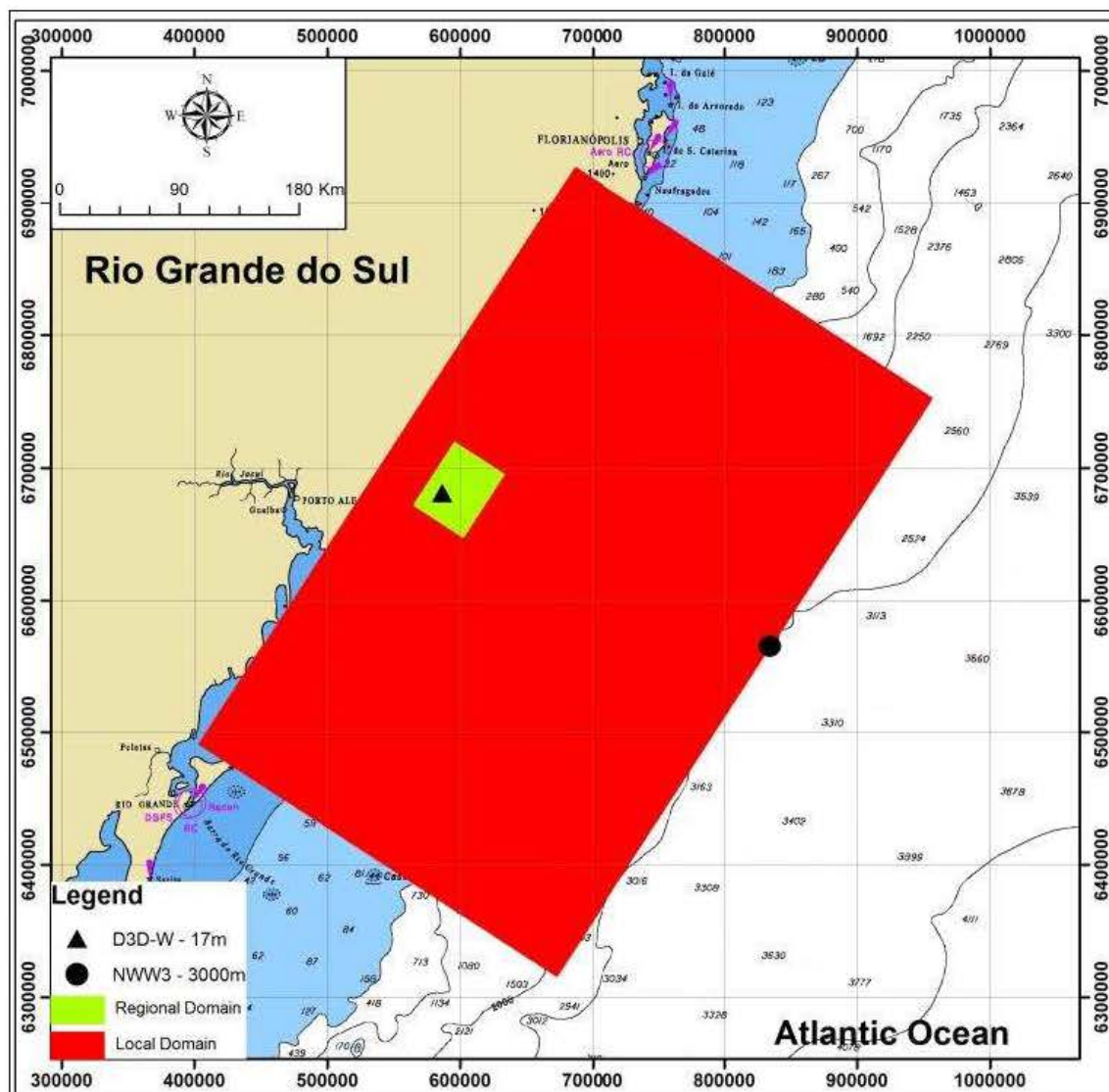


Figura 45. Localização do ponto de extração da série temporal de dados de onda em águas profundas (3.000 m).

2.4 Modelagem

Neste estudo foi utilizado o modelo numérico DELFT3D, desenvolvido pela Deltares, em Delft, Holanda, o qual é um sistema 2D/3D (duas e três dimensões) que inclui vários módulos para possibilitar a simulação de processos costeiros complexos, tais como geração e propagação ondas, evolução hidrodinâmica, transporte de sedimentos e alterações morfológicas (erosão e deposição sedimentar, variação da linha de costa).

2.4.1 DELFT3D - FLOW

O módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW resolve um sistema de equações de águas rasas em modo bidimensional (integrado em vertical) ou tri-dimensional, que consiste na discretização horizontal de momentum (conservação da quantidade de

movimento), na equação de continuidade, e nas equações de transporte. A equação vertical de momento é reduzida à relação de pressão hidrostática, e as acelerações verticais são assumidas como sendo muito pequenas em relação à aceleração da gravidade. Isso faz com que o Delft3D-FLOW seja adequado para a predição de fluxos em mares rasos, áreas costeiras, estuários, lagos, rios e lagoas. No Delft3D as equações hidrodinâmicas podem ser resolvidas em grades cartesianas retangulares, curvilineares ortogonais (boundary fitted) ou esféricas (LESSER et al., 2004). Este modelo foi extensivamente calibrado e validado através de experimentos de campo e de laboratório e é considerado o estado-da-arte em modelagem hidrodinâmica.

2.4.2 DELFT3D - WAVE

O SWAN foi desenvolvido na Delft University of Technology (Holanda) e é especificado como o novo padrão em estudos de modelagem de ondas e proteção costeira. Por este motivo, a Deltares® (antiga WL | Delft Hydraulics) integrou o modelo SWAN no pacote de modelos Delft3D. Este modelo é baseado na equação de conservação da ação espectral da onda. Isso significa que um campo de ondas de cristas curtas, aleatório, propagando-se simultaneamente a partir de diferentes direções, pode ser bem representado (e.g. uma ondulação - sobreposto por um mar de vento local). O SWAN computa a evolução de um campo de ondas, em águas profundas, intermediárias e rasas, assim como em ambientes com presença de correntes (e.g. desembocaduras). O modelo calcula os processos de refração provocados por correntes ou por mudanças na profundidade e representa os processos de geração de ondas pelo vento, dissipação por whitecapping, fricção com o fundo e quebra induzida pela profundidade, assim como interações não-lineares onda-onda (frequency shift, quadruplets e triads), explicitamente, com as formulações que representam o “estado-da-arte” em modelagem de ondas. Ondas bloqueadas por correntes são também representadas explicitamente no modelo. Muito importante em estudos de engenharia costeira e portuária são os processos de difração, transmissão, bloqueio e reflexão em obstáculos, também incluídos nas formulações do modelo. O SWAN tem sido validado e verificado com sucesso em uma gama de experimentos complexos de campo e laboratório (RIS et al., 1999; WL | DELFT HYDRAULICS, 1999).

2.4.3 DELFT3D - MOR

O modelo Delft3D-MOR foi elaborado para simular o comportamento morfodinâmico de rios, estuários e áreas costeiras, na escala de dias a anos, resolvendo o complexo

processo de interação entre ondas, correntes, transporte de sedimentos e batimetria. A conexão entre os módulos envolvidos no processo ocorre via acoplamento morfodinâmico é apresentado na Figura 46.

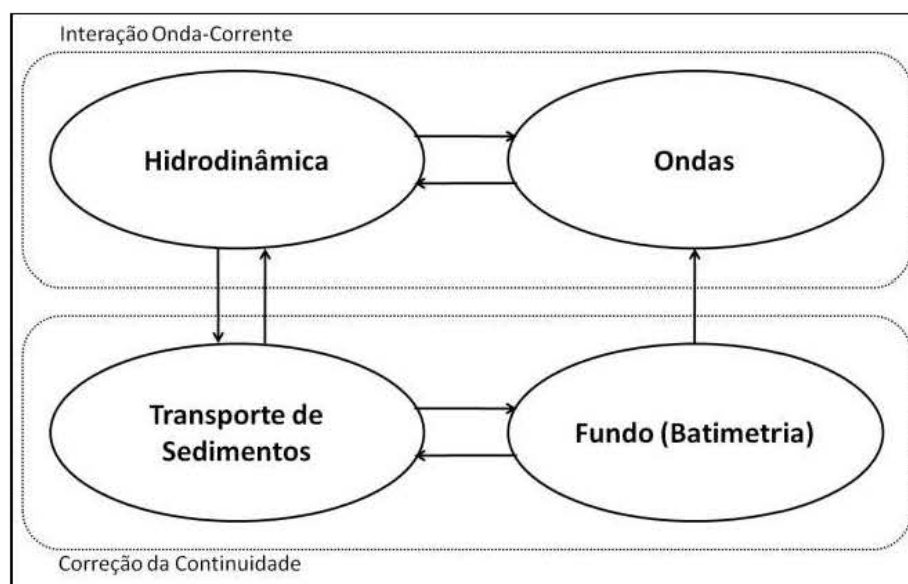


Figura 46. Fluxograma esquemático do modelo Delft3D-MOR.

Embora computacionalmente o transporte tridimensional seja calculado da mesma forma que qualquer outro constituinte conservativo, tal como salinidade, temperatura e traçadores, a modelagem de sedimentos diferencia-se por resolver os processos de troca de sedimento entre a camada de fundo e a coluna d'água, pela velocidade de sedimentação da partícula em decorrência da gravidade, pela influência do sedimento na densidade local e no processo turbulento, além da contínua alteração da batimetria e subsequentemente sua influência nos processos hidrodinâmicos.

O transporte de fundo é determinado para todas as frações do tipo "sand" e "bed-load", primeiramente calculando-se a magnitude e direção e, posteriormente, as taxas na malha numérica, determinadas e corrigidas de acordo com o efeito da declividade de fundo, composição do leito e disponibilidade de sedimento. A formulação de van Rijn (1993) distingue os componentes de transporte entre transporte de fundo em decorrência de correntes (Bed), transporte de fundo em decorrência da ação de ondas (BedW) e transporte em suspensão em decorrência da ação de ondas (SusW). Os parâmetros Bed, BedW e SusW podem ser calibrados independentemente. Outro coeficiente de calibração é o fator de correlação entre o transporte em suspensão e as correntes (Sus).

2.4.4 Domínio Computacional

A elaboração do domínio computacional foi realizada com o módulo DELFT3D-RGFGRID, que permite a geração e manipulação de grades numéricas ortogonais e/ou curvilíneas. O processo de elaboração das grades numéricas seguiram as propriedades exigidas de ortogonalidade e suavidade, a fim de evitar interferências de ruídos numéricos, aumentando consequentemente a acurácia do modelo (WL | Delft Hydraulics, 2007). Para simular os processos de propagação das ondas desde o ponto de reanálise do modelo WWIII até as proximidades da Praia de Tramandaí, foram criadas duas (02) malhas de cálculos acopladas (aninhadas), com resoluções distintas, como apresentado na Figure 4. A malha regional é uma malha ortogonal regular composta por 323 x 522 elementos de cálculo, que apresenta seu contorno sudeste aproximadamente paralelo à isóbata de 3.000 m, permitindo que a fronteira externa da malha represente uma profundidade aproximadamente constante ao longo do domínio computacional. O espaçamento da malha regional é de 1.000 m. A malha local é ortogonal regular composta por 178 x 226 elementos de cálculo com espaçamento de 250 m, posicionada nas adjacências da Praia de Tramandaí, desta forma garantindo maior resolução dos cálculos nas proximidades do ponto de interesse. O modelo D3D-W (SWAN) transfere os resultados obtidos na malha regional automaticamente para a fronteira da malha local.

Para simular os processos hidrodinâmicos, transporte de sedimentos e evolução morfológica nas proximidades da Praia de Tramandaí, foi criada uma malha de cálculo curvilínea, composta por 251 x 247 elementos de cálculo com espaçamento variável.

2.4.5 Batimetria

Os valores de profundidade na área de estudo foram obtidos através da digitalização das Cartas Náuticas N°. 2200, 2100, 2010, 1911, 1910, 1900, 90 e 30, disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) em formato digital raster.

Os dados de profundidade foram corrigidos para o nível médio (MSL) da região conforme indicado na Carta Náutica 2100 como uma diferença de 0,13 m em relação ao nível de redução da carta (DHN).

2.4.6 Calibração

Depois de calibrado o modelo em um ou mais pontos, é possível extrapolar as informações obtidas para todo o domínio computacional com confiabilidade. O

procedimento de calibração do modelo numérico D3D-W consistiu em comparar as séries temporais medidas in situ com os resultados da modelagem de ondas no mesmo ponto. Através das comparações é possível ajustar os parâmetros de calibração do modelo com o intuito de obter a melhor similaridade entre os registros.

A série temporal de dados de onda utilizada para comparar os resultados da modelagem é proveniente da campanha realizada no Convênio UFRGS/PETROBRAS (2006), onde um ondógrafo direcional Waverider (Datawell®) foi fundeado na zona de influência do Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra, a uma profundidade de 17 m, nas coordenadas 30°00'42"S e 50°06'21"W (WGS 1984). Para quantificar as diferenças entre as séries temporais de dados de ondas medidos in situ com os resultados da modelagem de ondas foi utilizado o erro médio quadrático ou RMSE (*Root Mean Square Error*), de acordo com a fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

onde: P é a variável prevista e O é a variável observada.

A Figure 5 apresenta as comparações entre os dados de onda medidos (linha azul) e modelados (linha vermelha), indicando boa representação dos processos e padrões obtidos pelo modelo em relação aos dados medidos, com RMSE de 0,28 m para Hs, 2,67 s para Tp e 35,87° para Dirp. Com o modelo calibrado é possível propagar os casos de e aplicar a metodologia de reconstrução da série temporal de dados de ondas em águas rasas.

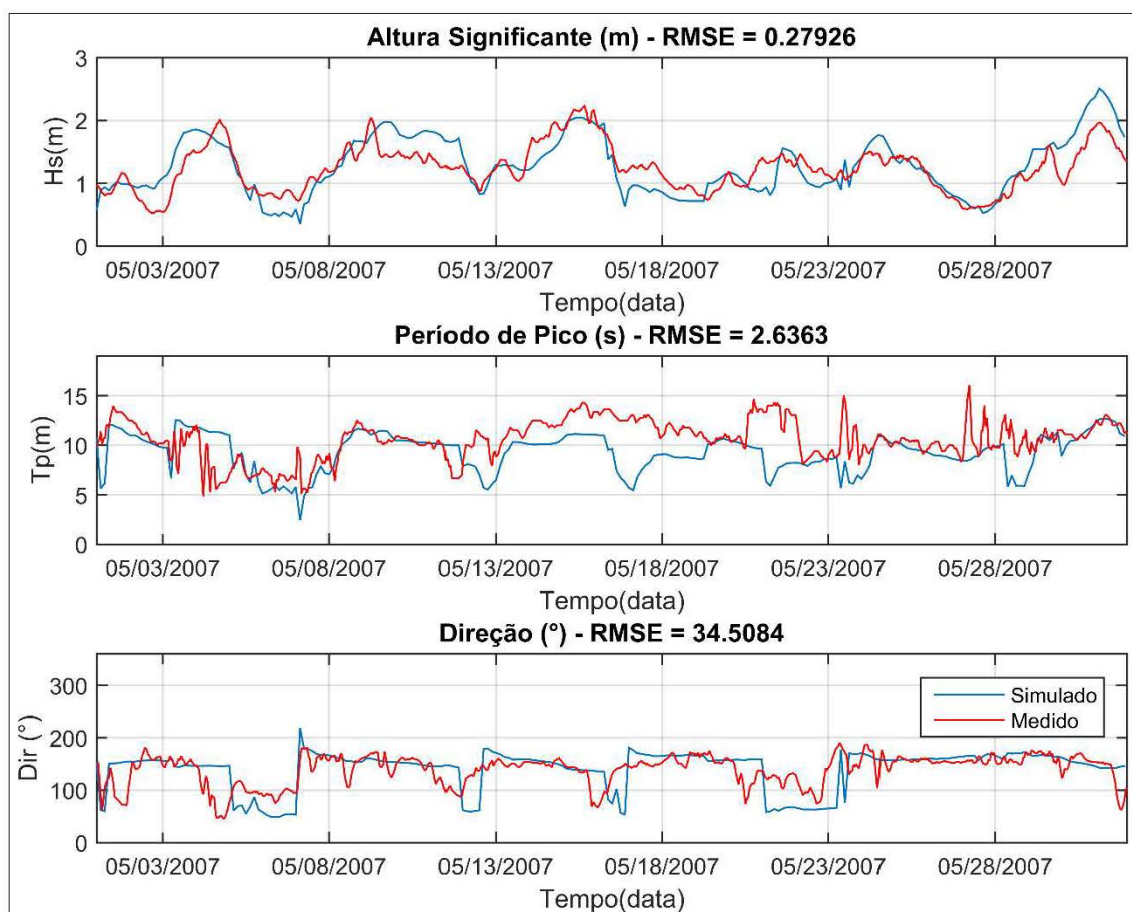


Figura 47. Comparação e calibração dos parâmetros de onda.

2.4.7 Seleção de Casos

A grande maioria das regiões ao redor do mundo, principalmente nos países em desenvolvimento, carece de longas séries temporais de dados de ondas medidos em águas rasas. Para suprir essa deficiência, Camus, et. al., (2010) desenvolveram uma metodologia baseada no uso de séries temporais de dados de onda, provenientes dos programas de reanálise em águas profundas (e. g. WWIII), modelos de propagação em águas rasas, assim como técnicas de interpolação que permitem gerar uma série temporal de dados de ondas em águas rasas com igual comprimento da série temporal original de águas profundas.

Esta metodologia de transferência da série original de águas profundas para rasas funciona como uma técnica de interpolação linear em 3 dimensões (Hs, Tp e Dir), aplicada aos parâmetros de onda e coeficientes de propagação com características direcionais. Possibilita construir a série temporal de águas rasas com o mesmo número de casos originais. Detalhes da metodologia podem ser encontrados em Sprovieri et. al., 2017a e Sprovieri et. al., 2017b.

O conceito do método é representado esquematicamente na Figure 6, que permite obter os parâmetros de onda em um determinado ponto (H_{si} , T_{pi} , Dir_{ip}), a partir da interpolação dos resultados de diferentes combinações de H_s , T_p e Dir_p .

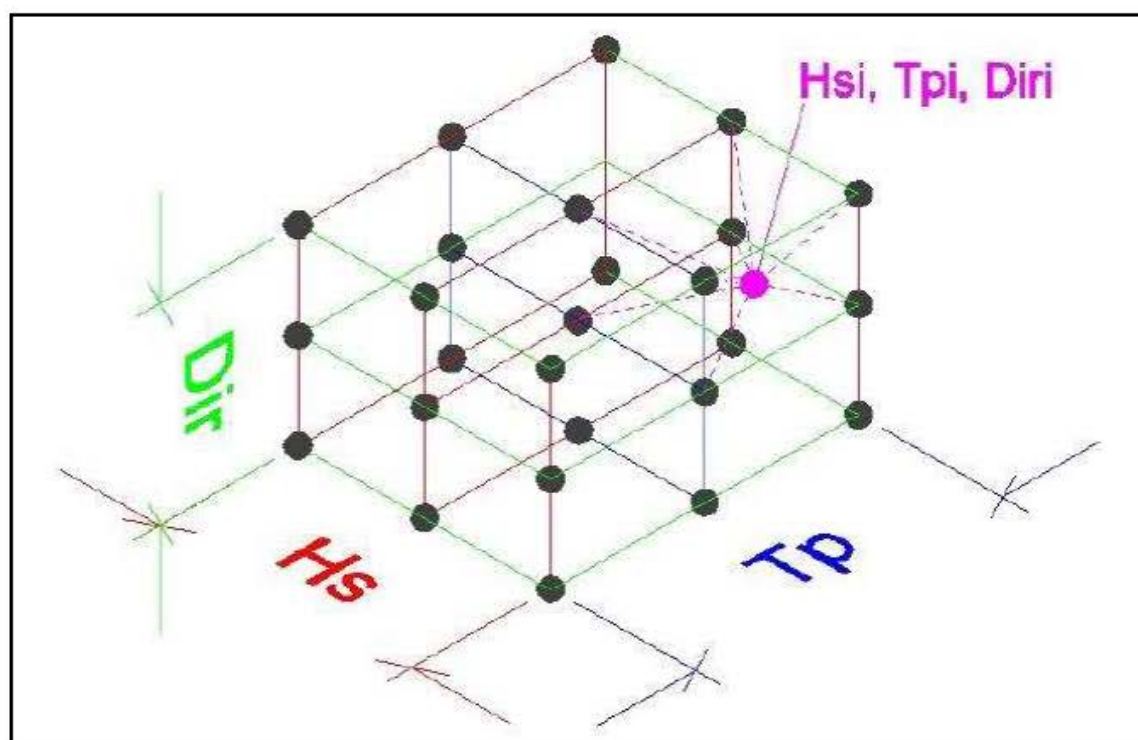


Figura 48. Esquema da metodologia de transferência, que permite obter os parâmetros de onda no ponto de interesse para um dado estado de mar (H_{si} , T_{pi} e Dir_{ip}), a partir da interpolação dos resultados da propagação de casos com diferentes combinações de H_s , T_p e Dir_p .

A série temporal de ondas obtida de reanálise da NOAA foi utilizada para aplicação da metodologia citada. O número total de registros contidos na série temporal é de 40.692 casos em 14 anos. Devido à inviabilidade computacional de propagar todos os 40.692 casos de estados de mar extraídos do modelo WWIII, desde águas profundas até águas rasas, foi feita uma prévia seleção. O critério adotado na escolha dos casos foi selecionar as ondas possíveis de ocorrerem na área de estudo. Para isso os 40.692 casos foram visualizados, conforme Figure 7, e a partir destes foram escolhidos limites de seleção para cada classe de 0,5 m na distribuição das alturas (H_s), 2 s na distribuição dos períodos (T_p) e 22,5° na distribuição das direções incidentes (Dir_p). Os 947 casos selecionados são representados pelos pontos vermelhos simbolizados na Figure 7.

Estes casos permitem a interpolação de todas as combinações de $H_s - T_p - Dir_p$ que ocorrem na série temporal em águas profundas, e são representativos para todas as direções entre 0° e 360°.

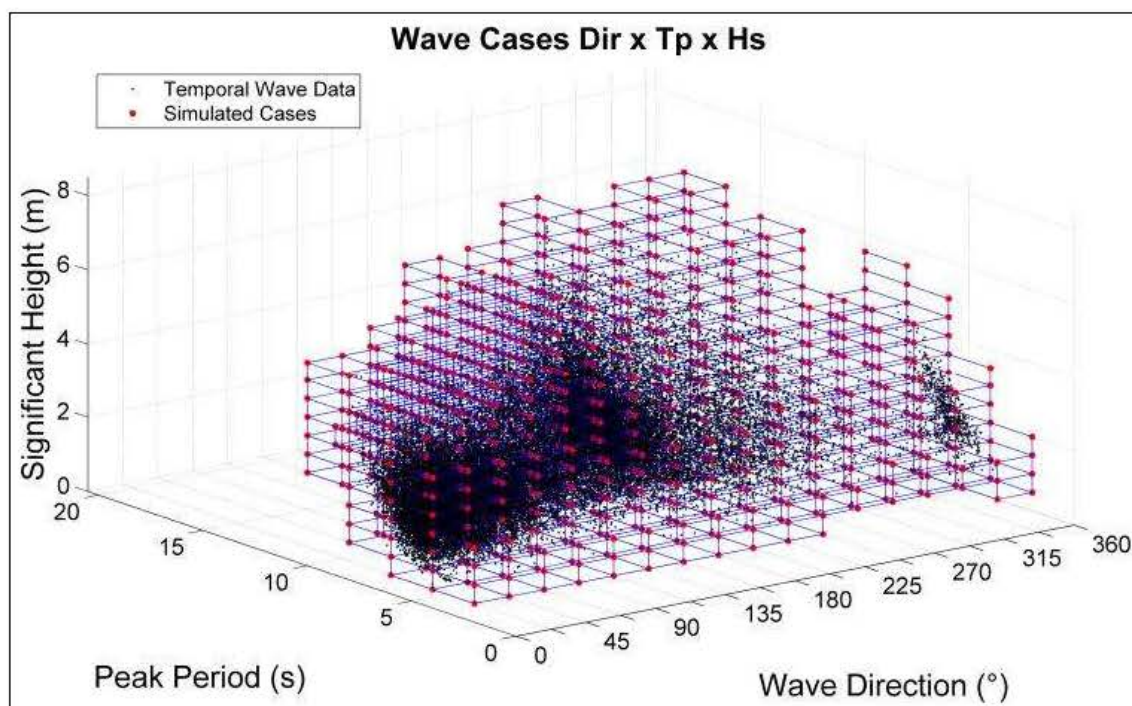


Figura 49. Combinações de direções (Dirp), altura significativa (Hs) e período de pico (Tp) selecionados para as simulações de propagação de ondas. Os pontos em preto indicam os dados de reanálise NWW3 (3000 m) e a linha preta delimita a área considerada na interpolação para a transferência.

2.4.8 Propagação dos Casos

Os 947 casos de ondas representativos foram propagados utilizando o modelo numérico D3D-W. O modelo foi executado em modo estacionário, considerando os efeitos de refração, difração, dissipação com o fundo e dissipação por quebra (coeficientes definidos como padrão). Os espectros de entrada foram definidos com os dados de Hs, Tp e Dirp dos casos, adotando um espectro JONSWAP com parâmetro gama de agudeza de pico do espectro igual a 3,3.

O espalhamento direcional foi definido com base no período de pico. Ondas com maior período (ondulação), apresentam um menor espalhamento direcional (4 até 15) e aquelas de menor período (vagas) possuem maior espalhamento (15 até 25). O espectro foi discretizado em 24 componentes de frequência e 144 direcionais.

Como nas condições de contorno do modelo as ondas incidirem de todas as direções as fronteiras externas foram configuradas como condição livre. Os exemplos de resultados das propagações realizados com o modelo D3D-W, para as malhas de cálculo regional e local, são apresentados nas Figure 8 e Figure 9, respectivamente.

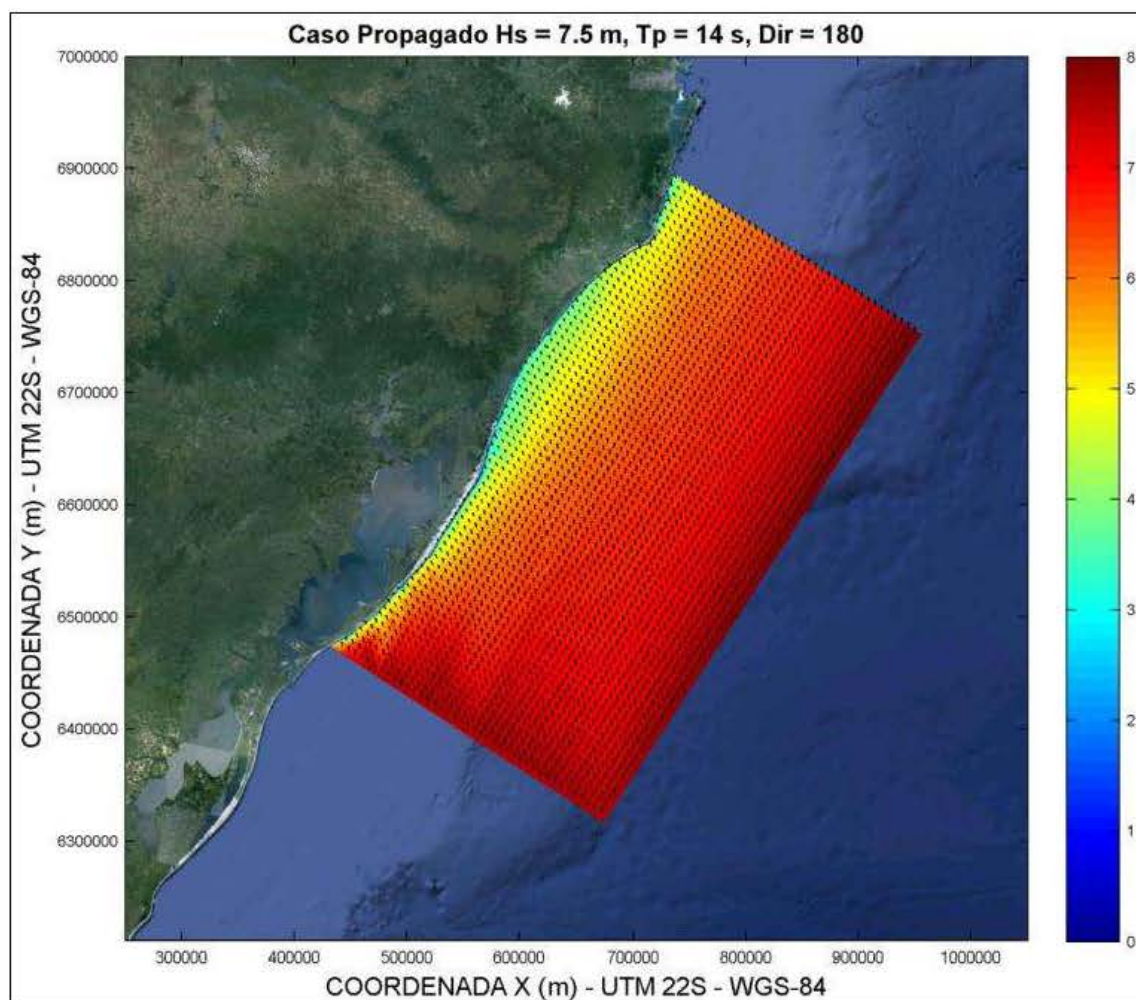


Figura 50. Resultados de propagação de ondas com o modelo D3D-W sobre base batimétrica regional. Caso: $H_s = 7,5$ m, $T_p = 14$ s e Dirp = 180°.

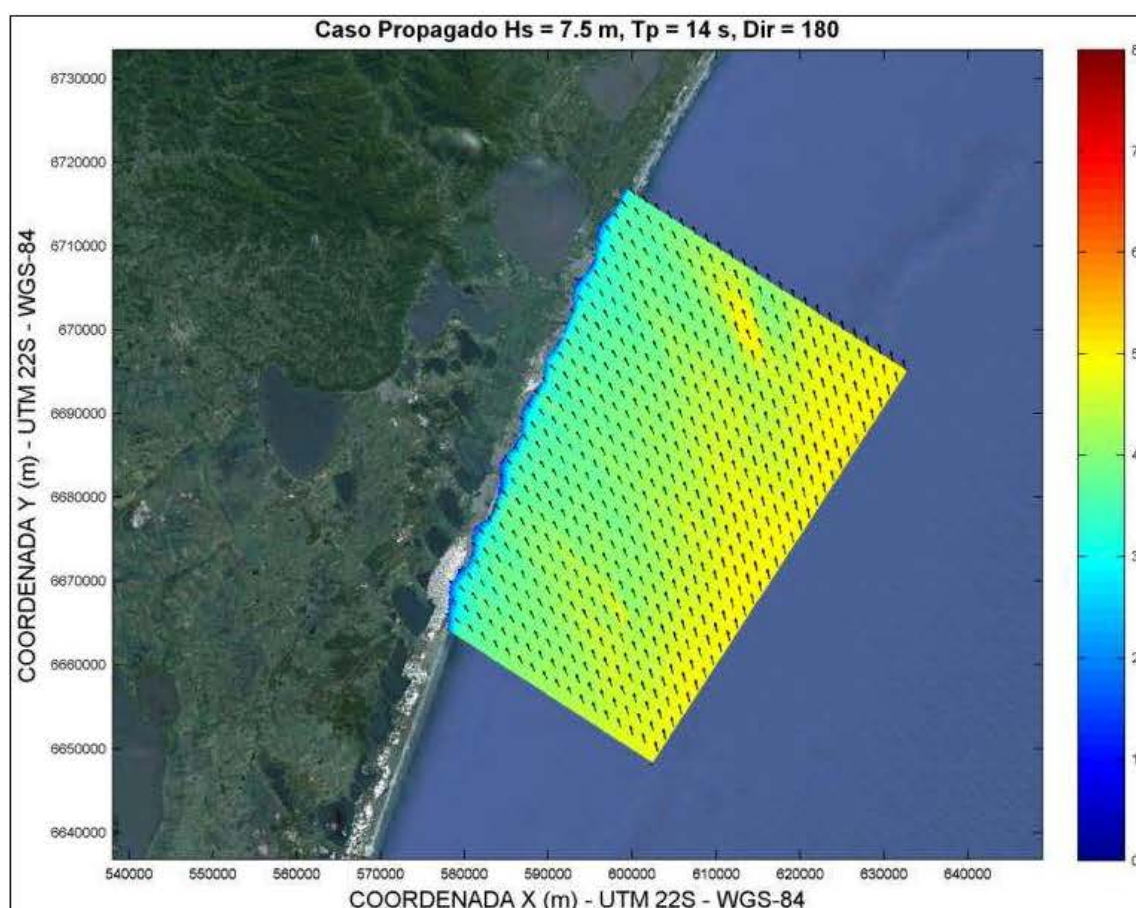


Figura 51. Resultados de propagação de ondas com o modelo D3D-W sobre base batimétrica local. Caso: $H_s = 7,5$ m, $T_p = 14$ s e $Dir_p = 180^\circ$.

2.4.9 Reconstrução da Série Temporal

Com os resultados de H_s , T_p e Dir_p obtidos na propagação dos 947 casos de onda (D3D-W), foram calculados os coeficientes de propagação de ondas (Eq. 2) e as direções associadas a cada um dos casos. Com os valores dos coeficientes de propagação (K_p) correspondentes a cada caso, juntamente com a direção, foi realizada a interpolação linear na série temporal de águas profundas. Conhecendo o coeficiente de propagação (K_p), é possível obter o valor de altura de onda no ponto de interesse (Eq. 3).

$$K_p = \frac{H_{\text{ponto}}}{H_0} \quad 2$$

$$H_{\text{ponto}} = K_p \times H_0 \quad 3$$

Após aplicar as técnicas de interpolação foi possível reconstruir a série temporal em águas rasas. Esta metodologia permite reconstruir a série temporal para qualquer elemento do domínio computacional. Neste estudo o ponto escolhido é

propositalmente localizado onde foi fundeado o ondógrafo Waverider (Datawell), possibilitando assim comparações dos resultados. Com a série temporal reconstruída no ponto em águas rasas, para o período de 14 anos (30/01/1997 a 31/12/2010), é possível caracterizar o clima de ondas nas proximidades da Praia de Tramandaí.

2.4.10 Validação

Para validar a metodologia de transferência, e comprovar a eficácia do método, foi realizada uma simulação chamada de brute-force (caso a caso), com a série temporal do WWIII para o período compreendido entre 01/05/2007 e 31/05/2007 (mesmo período de calibração do modelo como os dados medidos em campo). Este tipo de simulação consiste na propagação dos casos obtidos do WWIII (caso a caso) ao longo de um mês, totalizando 240 casos propagados (Hs, Tp e Dirp). Os resultados são comparados com os resultados do método de transferência. Analisando a Figure 10 verifica que a série reconstruída reproduz adequadamente os efeitos da propagação da série de ondas desde águas profundas até o ponto de interesse (17 m) e, portanto, a utilização dos seus resultados para determinação do clima de onda para a Praia de Tramandaí é válida.

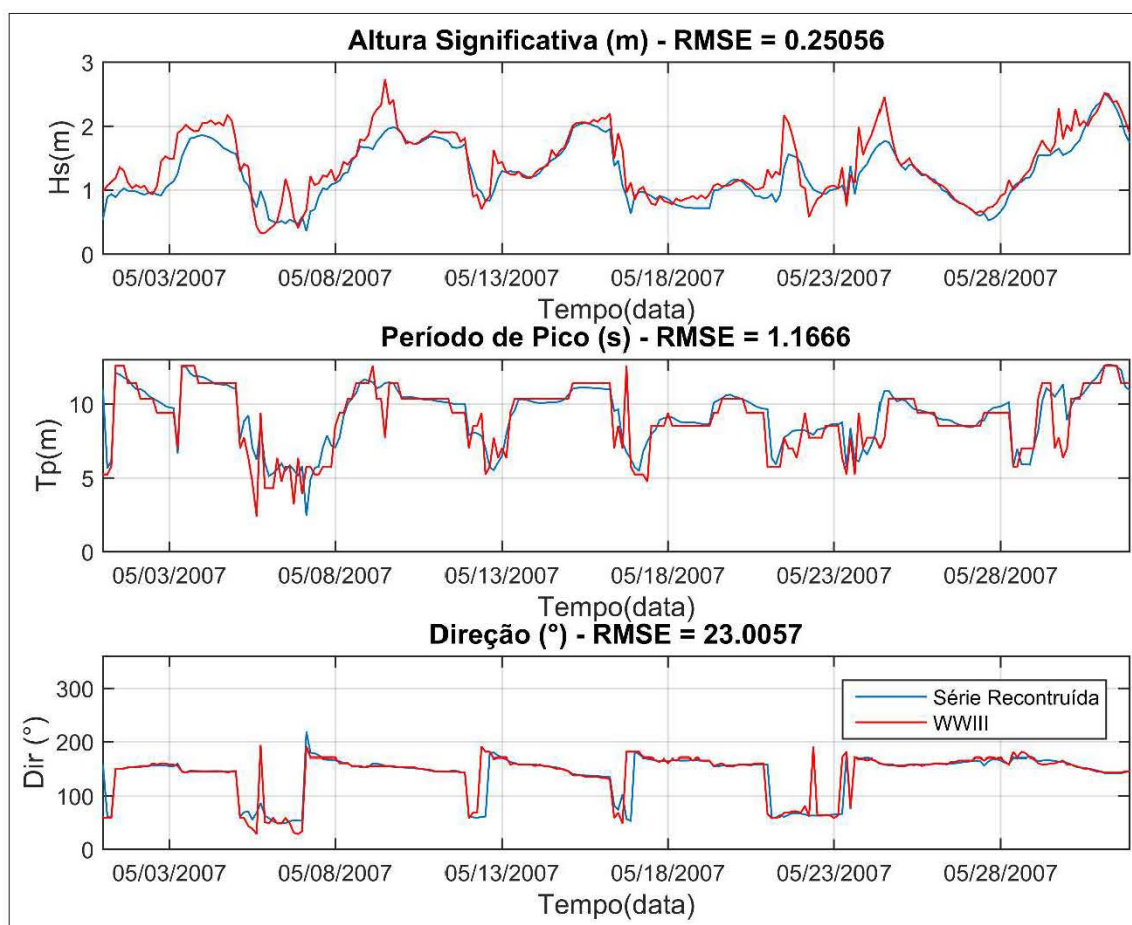


Figura 52. Comparação dos resultados da propagação da série temporal do WWIII (linha vermelha) com os resultados da série reconstruída (linha azul).

2.5 Simulação Morfológica

Após a obtenção do clima de ondas em águas rasas com o método da transferência, são selecionados os casos de ondas em águas profundas que sejam significativos em relação a dinâmica sedimentar do ambiente em águas rasas e portanto relevantes ao estudo de modelagem do transporte de sedimentos e evolução morfológica. Para selecionar os casos de ondas é aplicado o conceito do Fluxo Médio de Energia, descrito nas seções a seguir.

2.5.1 Fluxo de Energia

O método do Fluxo Médio de Energia, desenvolvido por Dobrochinski (2009), é utilizado para definir casos de ondas significativos em águas profundas para representar as forçantes de ondas em simulações numéricas morfológicas. O fluxo de energia de cada condição de onda da série temporal de dados é calculado com a seguinte equação:

$$E_f = \left(\frac{\rho g H_s^2}{8} \right) C_g \quad 4$$

onde ρ é a densidade da água (1025 kg/m³), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), H_s é a altura significativa de onda (m) e C_g é a celeridade de grupo de ondas (m/s), em águas profundas obtida por:

$$C_g = 1,56 * \frac{T}{2} \quad 5$$

T é o período de onda (s).

2.5.2 Seleção de Casos

Primeiramente é avaliada a janela direcional de ondas em águas profundas que influenciam significativamente a área de estudo. Por exemplo, dependendo da posição geográfica da região de estudo e de obstáculos ocasionados pela geometria da linha de costa adjacente, ondulações em águas profundas com certas direções quando são propagadas até a linha de costa apresentam pouca energia quando comparada com sua energia em águas profundas. Neste caso a classe de direção dessa ondulação é removida da análise. Desta forma são analisadas apenas direções de ondas offshore que quando somadas representem ao menos 95% da energia observada na praia. Para avaliar a energia na praia são aplicados os resultados da transferência de ondas de águas profundas para rasas, apresentado na Seção 2.4.10.

A Figura 53 ilustra o histograma de energia na área de estudo para classes direcionais de ondas em águas profundas.

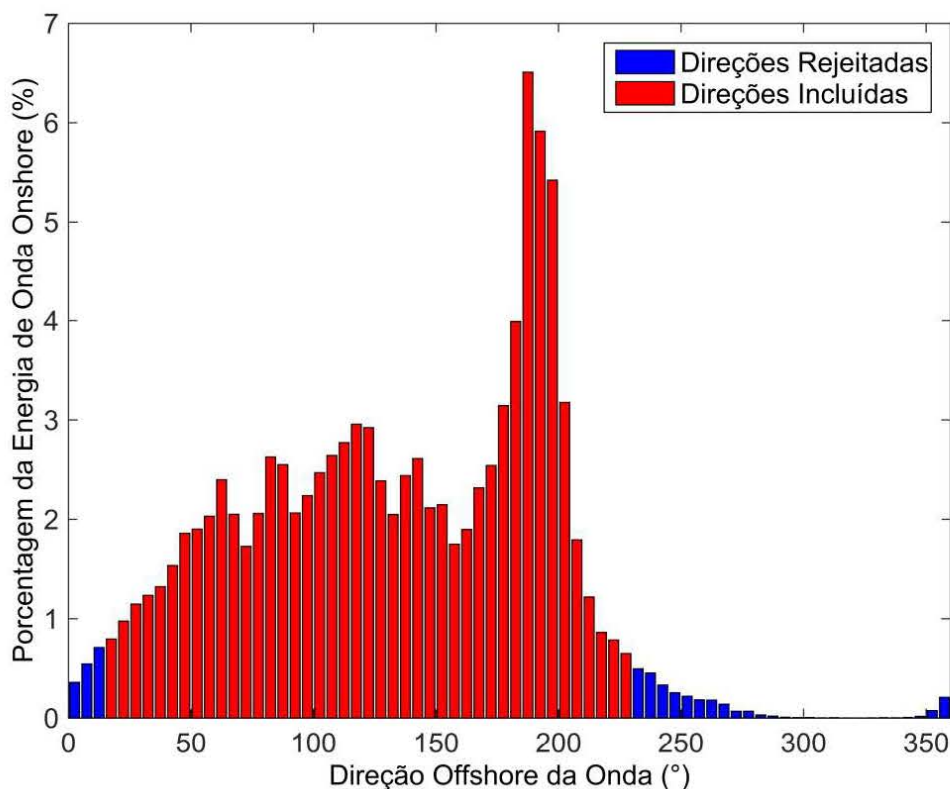


Figura 53. Intervalo de direções em águas profundas que cobrem 95% da energia observada na praia.

A próxima etapa da metodologia compreende a divisão da energia total de ondas em águas profundas em classes de direção e altura significativa de mesma quantidade de energia acumulada. Primeiramente os dados são varridos direcionalmente e a quantidade total de energia é dividida pelo número de classes direcionais pré-definidas. Em seguida, cada classe de direção é dividida novamente pelo número de classes de Hs. Isso significa que somatório do fluxo de energia dos casos de ondas encontrados dentro das classes é aproximadamente o mesmo.

Em seguida um caso de onda representativo é selecionado para cada classe, assim como a frequência de ocorrência associada. Os casos de ondas representativos também são calculados utilizando o conceito de fluxo de energia de ondas. A direção corresponde aquela do fluxo médio de energia da classe, o mesmo para o período encontrado dentro da classe e a altura significativa é calculada de acordo com o fluxo médio de energia, aplicando a média quadrática do Hs dos casos da classe.

A seleção dos casos representativos deste estudo foi composta por 6 classes de direção e 6 de altura significativa para cada condição de mar, resultando em 36 casos de ondas representativos. A Figura 54 ilustra as classes de energia calculadas onde

os pontos em vermelhos correspondem a altura significativa e direção dos casos representativos selecionados pela metodologia do Fluxo Médio de Energia.

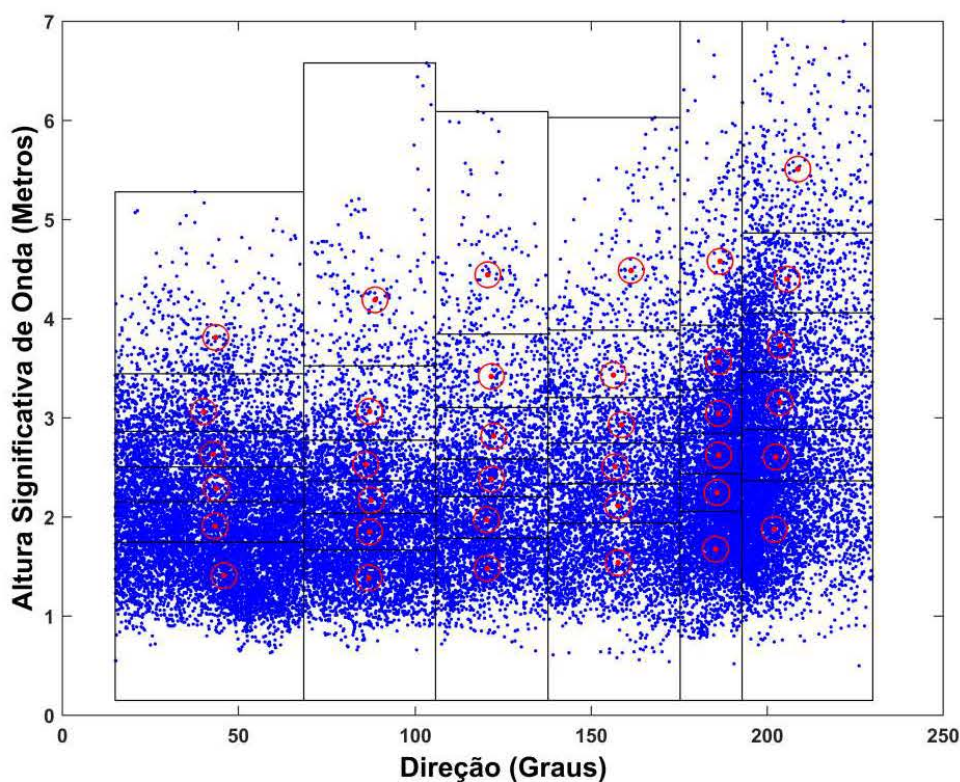


Figura 54. Classes selecionadas pelo método do fluxo de energia e casos representativos de cada classe (pontos vermelhos).

A frequência de ocorrência de cada classe calculada é utilizada no cálculo no parâmetro de aceleração morfológica (MORFAC), que é descrito em detalhe na Seção 3. O parâmetro de aceleração morfológica é aplicado em conjunto com o número de ciclos de maré que cada caso de onda é simulado. No caso das simulações numéricas morfológicas as oscilações astronômicas de nível de água na área de estudo são representadas pela chamada maré morfológica, que também é descrita na Seção 3.

2.5.3 Maré Morfológica

O objetivo de redução dos dados de maré utilizados como forçante no modelo morfológico é substituir o padrão irregular da maré real por uma maré simplificada, ou maré morfológica. Idealmente, a maré simplificada, deve produzir o mesmo transporte residual de sedimentos e padrão de mudanças morfológicas que a maré real, ao longo da região de interesse (LESSER, 2009).

A redução dos dados de maré real a uma senoidal com periodicidade constante permite que cada caso de onda seja propagado por, no mínimo, um ciclo completo de

variação do nível d'água. Dessa forma, todos os casos de onda sofrem influência da mesma amplitude e fase de maré.

A metodologia de redução utilizada no presente estudo considera uma onda com ciclo semi-diurno, com período equivalente à componente principal lunar M2 (12,42107 horas) e amplitude variando entre os níveis correspondentes a Média de Baixa-Mares (MLW - Mean Low Water) e Média das Preamares (MHW - Mean High Water), oscilando em relação ao nível médio.

2.5.4 Aceleração Morfológica

Simulações caso a caso são usadas para investigar com detalhe a evolução cronológica das variações morfológicas. No entanto, esse tipo de modelagem é extremamente dispendioso computacionalmente. Dependendo das dimensões do domínio computacional, da diversidade de processos simulados e da capacidade do hardware do computador disponível, as simulações são freqüentemente executadas em uma velocidade 10 vezes maior que o tempo real (e.g. 100 dias de simulação requereriam 10 dias de computação). Quando estamos interessados em resolver processos de mudanças morfológicas da ordem de meses ou anos, técnicas de aceleração morfológica do modelo são necessárias para reduzir o tempo de processamento.

A abordagem utilizada no presente estudo considera o parâmetro de aceleração morfológica (morfac – morphological acceleration factor), que resulta num tempo computacional consideravelmente inferior em relação ao método brute-force. O morfac é atrativo porque é numericamente eficiente, robusto e simples de implementar. A abordagem do morfac trabalha multiplicando o fluxo de erosão/sedimentação dos sedimentos em suspensão e os gradientes das componentes vetoriais de transporte (bed load transport) por um fator espacialmente constante (morfac). Esse procedimento efetivamente multiplica todas as mudanças de elevação do fundo que ocorrem durante um passo de tempo do modelo hidrodinâmico pelo fator morfac e, de modo que o passo de tempo morfológico torna-se “morfac vezes” maior que o passo de tempo do modelo hidrodinâmico. Essa abordagem é adequada para simulações morfológicas de longo-prazo (anos ou décadas), pois estas mudanças ocorrem em escalas temporais distintas das variações na hidrodinâmica (LESSER et al., 2004; LESSER, 2009). Como nas simulações são

inclusos diferentes casos de ondas, que possuem frequências de ocorrência distintas, é são atribuídos diferentes valores de morfac a cada caso de onda simulado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta sessão apresenta as simulações morfológicas utilizando o modelo numérico Delft3D (WAVE+FLOW), as quais são ilustradas com análises das taxas anuais de transporte bruto e residual, evolução da morfologia praial, e variação volumétrica do perfil praial para o Litoral Norte. A escolha desta área se deve principalmente a existência de diversos trabalhos realizados no âmbito da dinâmica sedimentar, fornecendo informações significativas para comparações, entre os quais podemos citar Lima et. al., (2001), Toldo, et. al., (2006) e. Motta et. al., (2015). Embora os estudos citados tenham aplicados conceitos e métodos básicos, os resultados gerados fornecem grande potencial para as comparações e discussões.

Nas simulações do transporte de sedimentos, o Litoral Norte foi delimitado como uma grande célula regional, numa adaptação ao modelo de Rosati e Kraus (2001) e Motta et al (2015), para análise do balanço sedimentar regional. Os limites costeiros e oceânicos correspondem às posições geográficas do pé da duna frontal e a profundidade de fechamento, respectivamente, os quais delimitam a extensão do sistema praial por onde se desenvolve a deriva litorânea.

A referida célula possui uma extensão total de 45 km entre as praias de Capão da Canoa e Tramandaí (Figura 1), e ao longo da linha de costa foram dispostos perfis de referência espaçados a cada quilometro e sequencialmente numerados a partir da desembocadura da lagoa de Tramandaí. Cada perfil corresponde a um local virtual, no qual foram expressos e discutidos as taxas do transporte. A distribuição dos perfis nos municípios se deu conforme: (i) Tramandaí: P 15S – P 3S; (ii) Imbé: P 2S – P 11N; (iii) Osório: P 12N- P 14N; (iv) Xangrilá: P 15N – P 25N; e (v) Capão da Canoa: P 26N – P 30N.

3.1 Transporte Bruto de Sedimentos

O fluxo de sedimentos para o norte foi definido como sendo positivo. Na Figura 55 é possível identificar três diferentes cenários de magnitude: (a) Perfis 30 N a 13 N com variação média de 12.199 m³/m e com equilíbrio nas taxas; (b) Perfis 12 N a 3 S com variação média de 21.240 m³/m, sem equilíbrio nas taxas e com redução para o norte; e (c) Perfis 3 S a 15 S com variação média de 23.600 m³/m e com equilíbrio nas taxas.

O total de sedimentos transportados para norte ao longo do ano foi de 4.879.161 m³, com variabilidade nas taxas. Os volumes máximo e mínimo foram de 29.239 m³/ano e 7.181 m³/ano, nos perfis Perfil 2 N e Perfil 30 N, respectivamente. O volume médio foi de 18.370 m³/ano, entre Jan/1997 e Dez/2010.

As taxas apresentam um padrão diferenciado, com maior magnitude do transporte entre os Perfil 2 N e Perfil 3 S. Neste trecho foi registrado um transporte bruto de 27.492 m³/ano, possivelmente pela regularidade na morfologia do fundo nas proximidades da desembocadura da Lagoa de Tramandaí. De uma maneira geral, o volume de sedimentos transportados decresce em direção ao norte do estado, acompanhando o gradiente batimétrico observado na plataforma continental interna do estado, onde na porção central a declividade varia em torno de 0,03° em contrapartida da porção norte, a qual é de 0,06° (Dillenburg, et. al., 2003). Também corroborando com a interpretação obtida, Guimarães et. al., (2014), estudando eventos extremos na região sul do Brasil originados pela passagem de ciclones extra tropicais entre 2000 e 2010, concluíram que as maiores ondulações estão relacionadas com os maiores gradientes batimétricos.

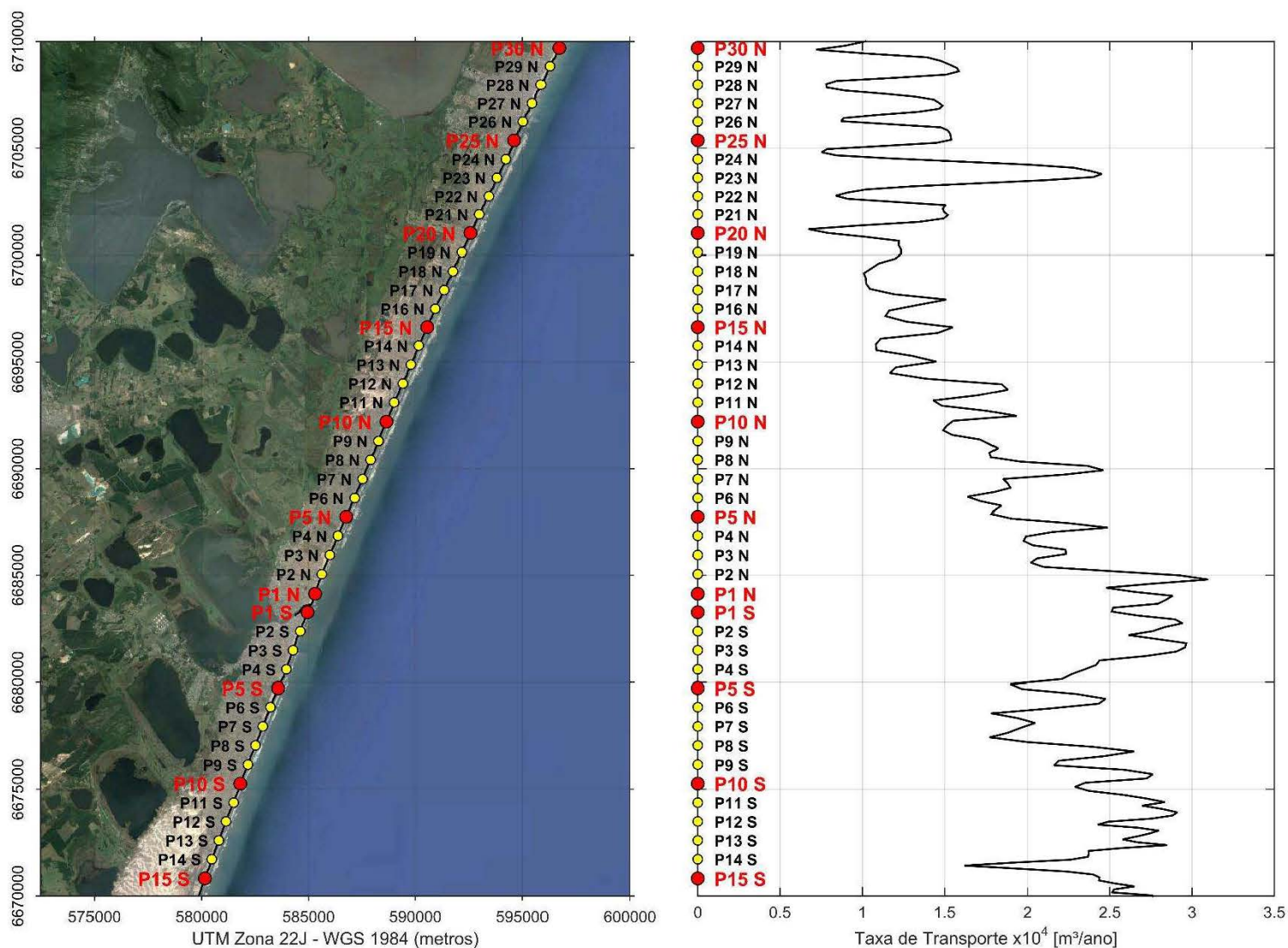


Figura 55. Taxa anual de transporte de sedimentos para norte [m³/ano].

O padrão variável nas taxas de transporte na zona de surfe podem ser atribuídos pela configuração morfológica do fundo, a geometria e orientação da linha de costa, a qual apresenta uma mudança no alinhamento na ordem de 3,7° ao longo dos 45 km da área estudada (Toldo, et. al.. (2006), Siegle e Asp (2007), e Motta, et. al., (2015)). Por fim, somam-se a estes fatores os diferentes regimes anuais de agitação marítima (Sprovieri, et. al., (submetido), que ocasionam maior ou menor intensidade no fluxo de energia das ondas paralelo a praia entre o inverno e verão.

O fluxo de sedimentos para sul, definido como negativo, não apresenta um padrão definido (Figura 56). Embora fica evidente que o volume de sedimentos transportados para sul apresente um incremento nessa direção, como pode ser observado na Figura 56.

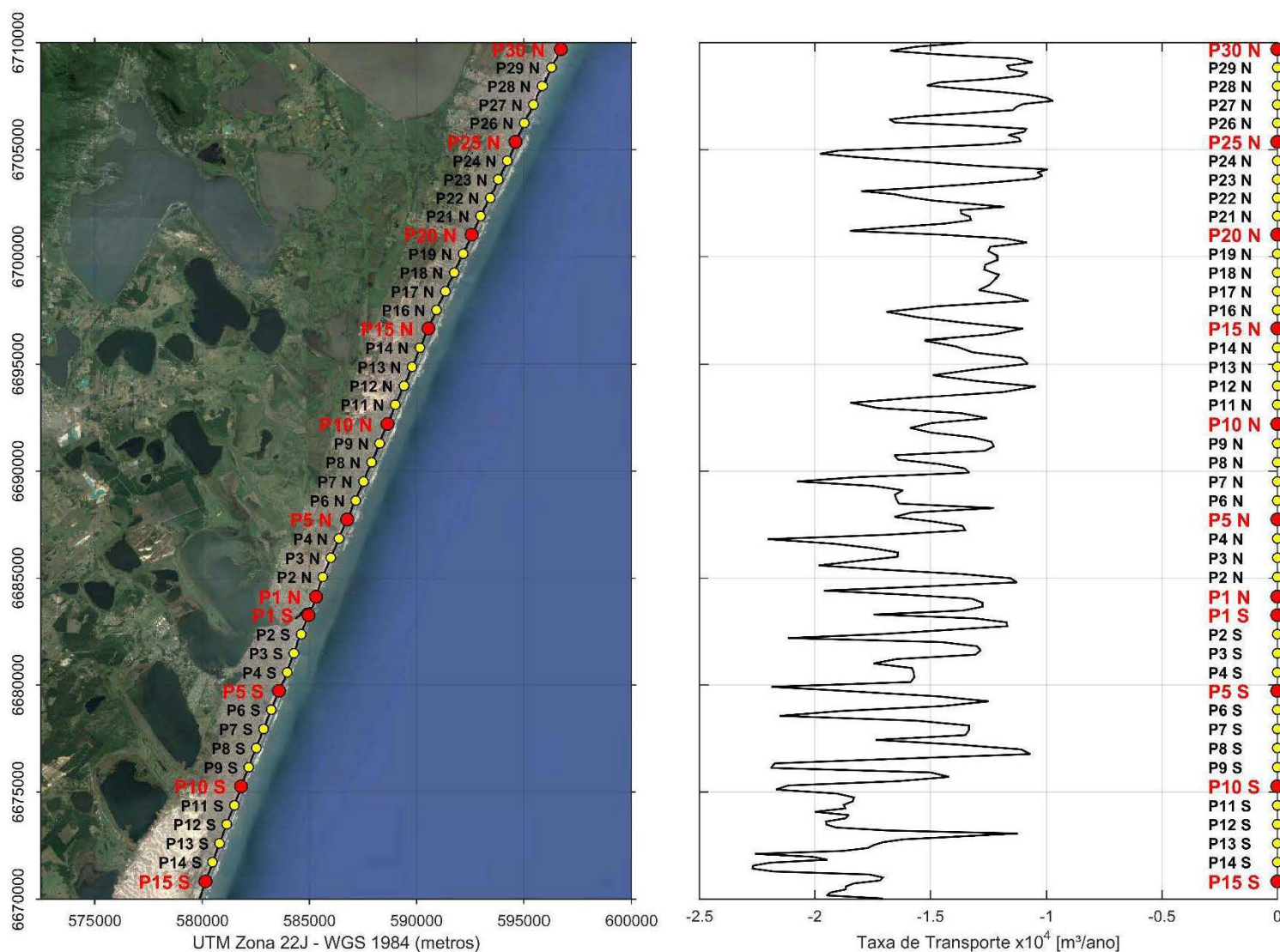


Figura 56. Taxa anual de transporte de sedimentos para sul [m³/ano].

O total de sedimentos transportados para sul ao longo do ano foi de 3.780.215 m³/ano, cujas taxas variam entre os perfis virtuais ao longo da área estudada. O volume máximo e mínimo calculado foi de 22.042 m³/ano e 10.455 m³/ano para o Perfil 4 N e Perfil 12 N, respectivamente, este localizado sobre o Perfil 4 N, o volume mínimo para norte foi de 10.455 m³/ano sobre o Perfil 12 N. O volume médio foi de 15.520 m³/ano.

O fluxo para o sul, indica que o volume observado na região sul é superior a região norte, conseqüentemente favorecendo a disponibilidade de sedimentos para deposição na região norte, devido ao padrão hidrodinâmico da região ter a componente resultante para norte, favorecendo assim a progradação da linha de costa do Litoral Norte.

As mudanças nas taxas observadas próximo ao Perfil 2 N, também podem ser atribuídas pelos processos da deriva litorânea local, que atuam forçando o fechamento da desembocadura, e em oposição, os escoamentos lagunares controlados pela

precipitação na bacia do Rio Tramandaí associados ao prisma de maré forçam a abertura e manutenção do canal (Silva, et. al., 2017). Esta associação de processos hidrodinâmicos e sedimentares formam os deltas de maré vazante, sendo estes depósitos um dos principais responsáveis no fornecimento de sedimentos para as praias adjacentes.

3.2 Transporte Resultante de Sedimentos

O transporte resultante equivale a taxa total proveniente de norte e sul, (Figura 55). Esta variável, representa as taxas totais sobre a linha de costa ao longo da célula praial contida entre os municípios de Tramandaí e Capão da Canoa, sendo resposta direta da interação energética do clima de ondas e das correntes induzidas por ondas sobre a complexa geometria do sistema praial.

O transporte resultante de sedimentos é apresentado na Figura 57. A taxa líquida calculada foi de 1.098.945 m³/ano com sentido para norte (positivo). A região que apresentou maior mobilidade está associada a área do Perfil 2 N, cujo volume máximo foi de 17.675 m³/ano, e para sul a área do Perfil 24 N com 12.253 m³/ano. A taxa média resultante ao longo do ano para a região estudada é de 2.849 m³/m/ano, com sentido para norte.

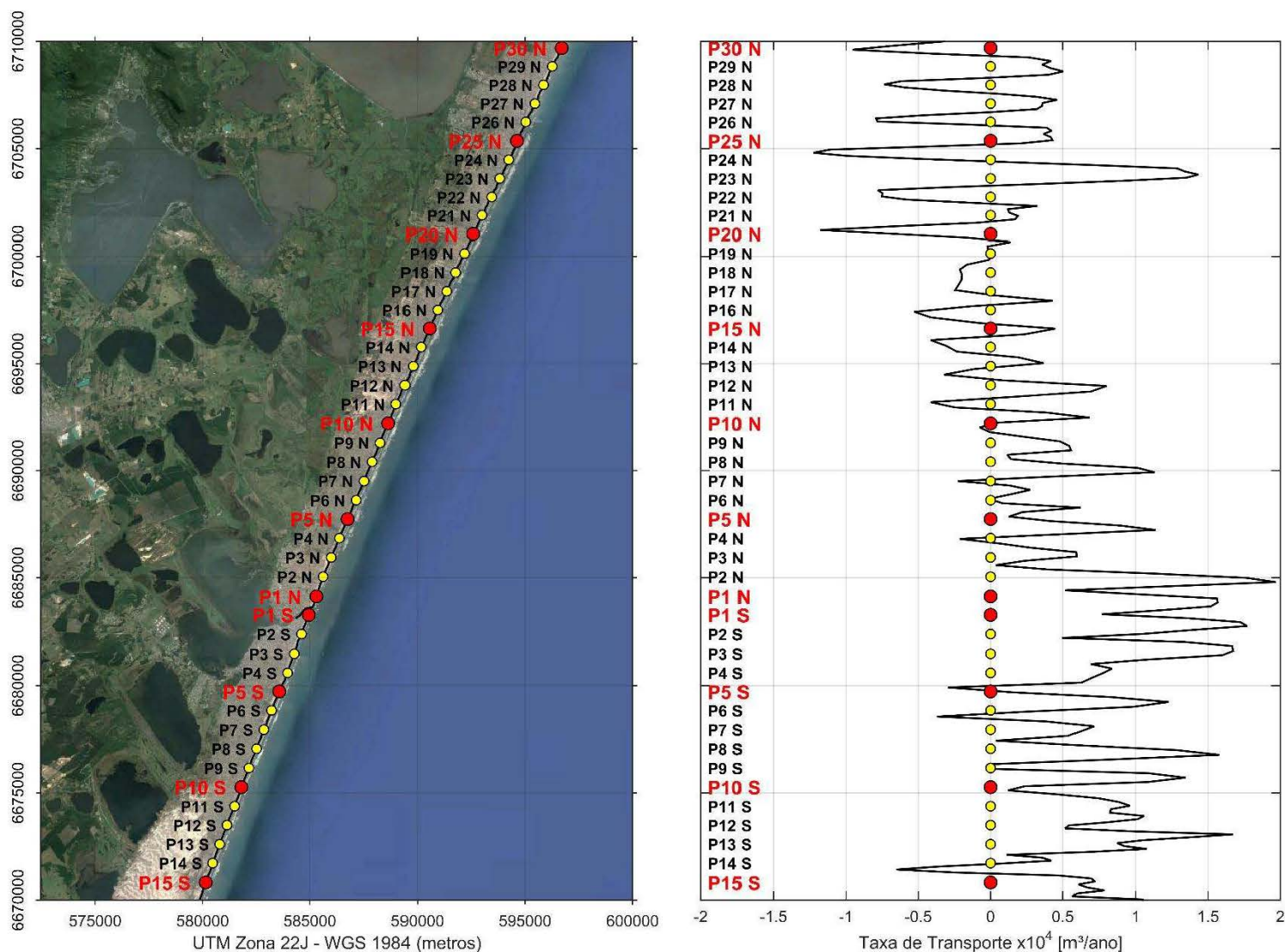


Figura 57. Taxas de transporte resultantes de sedimentos [m³/ano]

Motta et. al., 2015, estimaram as taxas de transporte sedimentar para o litoral médio do estado, subdividindo a linha de costa em células e aplicando o método do fluxo de energia, através das relações empíricas sugeridas pelo Shore Protection Manual (1984). Os parâmetros ondulatórios em águas profundas foram obtidos do modelo global de previsão de ondas WAVEWATCH III da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e transferidos para o ponto de quebra a partir da teoria linear de ondas conforme metodologia sugerida por Herbich (2000). Os resultados obtidos pelos autores corroboram as taxas calculadas através da modelagem numérica aliada as técnicas de análise aplicadas. Em Motta et. al., 2015, as taxas resultantes para a mesma célula praial, segundo a formulação de CERC foi de 908.333 m³/ano, quando comparado com a taxa obtida de 1.098.945 m³/ano, foi verificado uma semelhança de 82,7%.

A diferença nas taxas obtidas entre os estudos, pode ser facilmente explicada pelo método de aproximação das ondas utilizado em Motta et. al., 2015, no qual as mesmas são propagadas para a costa através da metodologia empírica sugerida por Herbich (2000), não considerando os efeitos de interação batimétrica, dissipação de energia, refração, difração, interações onda-onda, e também sem considerar os efeitos das correntes longitudinais induzidas pelas ondas na zona de arrebenção.

No estudo atual, utilizando modelagem numérica, a propagação das ondas para a costa contempla os processos de refração provocados por correntes e por mudanças na profundidade, os processos de geração de ondas pelo vento, dissipação por whitecapping (“encarneiramento”), fricção com o fundo e quebra induzida pela profundidade, assim como interações não-lineares onda-onda (frequency shift, quadruplets e triads), explicitamente, com as formulações que representam o “estado-da-arte” em modelagem de ondas. Desta forma, os resultados das taxas apresentados são mais sofisticados e integram aspectos energéticos complexos relacionados com a dinâmica do movimento.

Lima et. al., 2001, também realizou a quantificação do transporte de sedimentos para o estado do Rio Grande do Sul, através da aplicação do Fluxo Médio de Energia, contudo, diferentemente de Motta et. al., 2015, foram utilizados dados de ondas provenientes de navios comerciais, organizados por Hogbem e Lump em 1967.

Embora o período de análise dos dados de onda utilizados para calcular as taxas sejam distintos, o fluxo resultante através do emprego da formulação de CERC obtido por Lima et. al., 2001, apresenta grande semelhança com os valores obtidos neste estudo. Aqueles autores calcularam um valor de 1.060.000 m³/ano para norte. Um valor que apresenta 96,5% de semelhança com as taxas obtidas através da modelagem numérica.

O volume líquido de sedimentos exportado pelo limite norte da célula praial, representado como transporte na direção de sul para norte, foi de 1.342.076,03 m³/ano, e pelo limite sul, representado pelo transporte na direção norte para sul, foi de 243.130,59 m³/ano.

Como o ataque das ondas, na costa do Rio Grande do Sul, está principalmente relacionado às ondulações dominantes provenientes do quadrante sudeste, a porção sul é submetida a uma maior energia em relação a norte. E como a declividade da

plataforma interna adjacente favorece uma menor e uma maior energia de onda ao longo das variações de orientação da linha de costa, resposta evidente pela variação no sentido onde a costa é côncava (declividades menores) e convexa (declividades maiores), respectivamente (Dillenburg, et. al., 2003).

Portanto, os processos de propagações de ondas e principalmente de dissipação energética são variáveis ao longo da plataforma continental (Guimarães, e. al., (2014)), determinando a existência de diferentes taxas de transporte no Litoral Norte do estado, bem como, possivelmente para o Litoral Central e Sul.

3.3 Evolução Morfológica

Na Figura 58 constam os resultados da evolução morfológica da linha de costa, para o período de um ano. O quadro esquerdo representa a variação volumétrica anual, no mapa de erosão-sedimentação. O quadro direito desta figura mostra a variação volumétrica anual, calculada a partir da integração dos perfis de praia. As mudanças morfológicas estão indicadas como ganhos ou perdas de volume de sedimentos, expressos em m^3/m , onde os valores negativos indicam erosão (cor vermelha) e os positivos indicam sedimentação (cor verde).

A partir desta informação foi possível verificar a existência de três locais com intensa erosão ao longo da área estudada, os quais tem padrões de variação distintos das áreas adjacentes. Os perfis P23 N, P3 S e P12 S apresentam tendência volumétrica negativa, indicando erosão, na ordem de $-603 m^3/m$, $-407 m^3/m$ e $-443 m^3/m$, respectivamente. Embora tais perfis caracterizem um padrão extremo de erosão, se trata de um processo costeiro localizado, não abrangendo o restante da linha de costa. Em contrapartida, existem quatro locais que apresentam sedimentação bem definida, representados pelos perfis P25 N, P3 N, P6 S e P14 S, com uma variação volumétrica positiva, ou seja, indicando ativa sedimentação, na ordem de $352 m^3/m$, $356 m^3/m$, $277 m^3/m$ e $237 m^3/m$, respectivamente.

Analisando a média anual das mudanças morfológicas, na qual foi avaliada a parte emersa e submersa do perfil de praia, existe um incremento positivo de $22,38 m^3/m$, sinalizando sedimentação e conseqüente acresção do perfil praiar. As informações contidas no quadro esquerdo da Figura 58, sobre a geometria do perfil de praia, indicam um estágio morfodinâmico de praia de banco e cava longitudinal, demonstrado

pela presença da calha, em vermelho, adjacente a face de praia e em seguida, o banco, em verde. Este padrão morfodinâmico foi observado em toda extensão da linha de costa estudada, exceto para os pontos de erosão acentuada e corresponde ao estágio morfodinâmico modal deste sistema praiado identificado anteriormente por Toldo et. al., (1993) e Jung e Toldo (2011).

A evolução morfológica simulada, pelo período de um ano, demonstra que a região possui variações volumétricas constantes e com padrão de retro-alimentação, indicando estabilidade morfológica ao longo de toda linha de costa. Entretanto, este padrão não foi constatado nos pontos de erosão, devido a não ocorrer retro-alimentação do perfil, e os sedimentos serem transportados para fora da área ativa do perfil, visto que não existe taxas de sedimentação na mesma ordem de magnitude das taxas de erosão calculada.

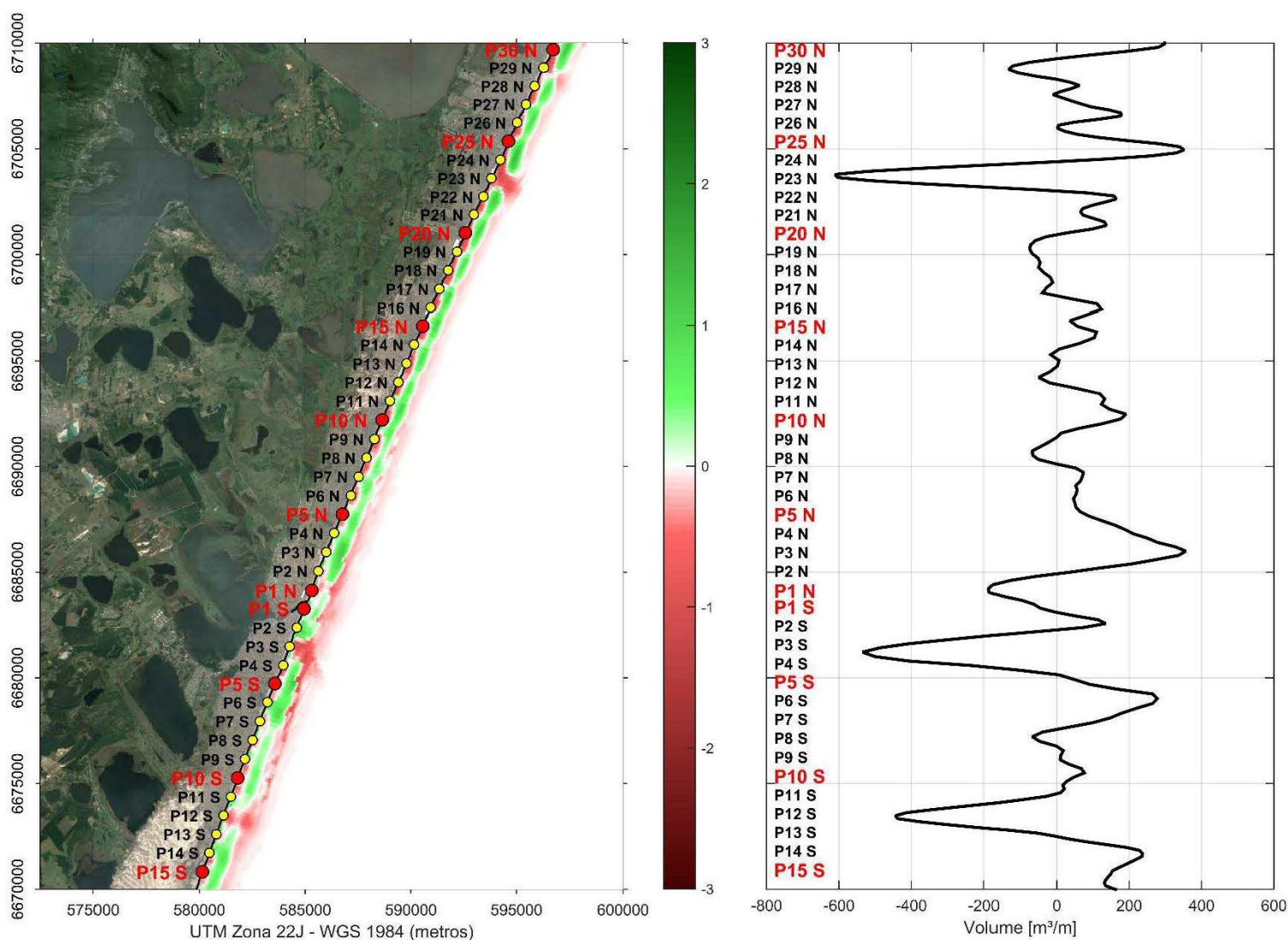


Figura 58. (Esquerda) Evolução morfológica após o período de 1 ano. Tons de verde indicam sedimentação, tons de vermelho erosão. (Direita) Variação volumétrica absoluta [m^3/m] ao longo da área de estudo.

A Figura 59 ilustra a variação volumétrica anual ao longo do período analisado. As taxas de variação absoluta calculadas corroboram com o padrão de evolução morfológica apresentado na Figura 58.

Em geral, os resultados de variação volumétrica obtidos demonstram que a área estudada está em equilíbrio, apresentando uma tendência acresciva ao longo dos perfis de praia, com taxa de transporte média de $1,8 \text{ m}^3/\text{m}$. Embora, nos perfis erosivos observados, exista uma perda máxima de sedimentos na ordem de $48,6 \text{ m}^3/\text{m}$, taxa está associada ao perfil P23 N. Valores positivos, que indicam incremento de volume no perfil de praia, foram observados na maior parte da área, sendo encontrado a taxa máxima de acresção na ordem de $28,7 \text{ m}^3/\text{m}$ no perfil P3 N.

Os valores obtidos para as variações volumétricas ao longo da linha de costa são corroborados com o estudo realizado por Lopes et. al., 2008, onde os autores a partir de levantamentos de campo com DGPS realizados em 1997 (Toldo, 1999), e análises de imagens aéreas retificadas de 1974 e 1981, mapearam a mobilidade da linha de praia para o Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul, utilizando a linha d'água para o monitoramento espaço-temporal da praia (Toldo e Almeida, 2003). Neste, os autores confirmam que o Litoral Norte está recebendo mais sedimentos ao longo das últimas décadas, resultando em uma maior taxa de avanço da praia, comparado aos demais trechos central e sul. Também foi verificado o comportamento erosivo da região ao sul de Tramandaí e nas proximidades de Capão da Canoa, validando os resultados volumétricos apresentados na Figura 57, associados aos perfis P3 S e P12 S (Tramandaí) e P23 N (Capão da Canoa), respectivamente.

O diagnóstico erosivo verificado nas regiões ao sul de Tramandaí e Capão da Canoa, melhor abordado como zonas de erosão, devido ao caráter pontual da variação volumétrica, conforme Figura 58 e Figura 59, possivelmente pode estar relacionado com a presença de sangradouros na linha de praia. Feições estas que são caracterizadas pela descontinuidade do cordão de dunas frontais ao longo do litoral do Rio Grande do Sul, e ocorrem em média de 6 a 10 sangradouros a cada 10 km, diminuindo para 4 nas proximidades da Laguna de Tramandaí, onde a drenagem é direcionada para este corpo d'água e, novamente, aumentando para 10 a 14 em direção a Torres (Figueiredo & Calliari, 2005). Paralelamente aos sangradouros, nas áreas onde foi observado erosão (Perfis P3 S e P12 S em Tramandaí e P23 N em

Xangrilá) também estão correlacionadas com locais de maior mobilidade do perfil de praia, conforme demonstrado nas Figura 57 e Figura 58. Contudo, para a região de Tramandaí as taxas são positivas, não apresentando equilíbrio entre acreção/erosão, distintamente da região norte de Xangrilá, onde existe o equilíbrio no transporte.

As variações volumétricas calculadas (Figura 59) oscilam em torno do zero, confirmando o equilíbrio no balanço sedimentar da região norte do estado, fato este corroborado com estudos anteriores que mostram variações sazonais no perfil de praia, onde existe a tendência erosiva nos meses de outono e inverno, decorrente das maiores energia das ondas e maior frequência das tempestades (Sprovieri et. al., 2018 submetido), e nos meses de primavera e verão a acreção (e.g. Calliari & Toldo, 2006; Barletta, 2000; Weschenfelder et al., 1997).

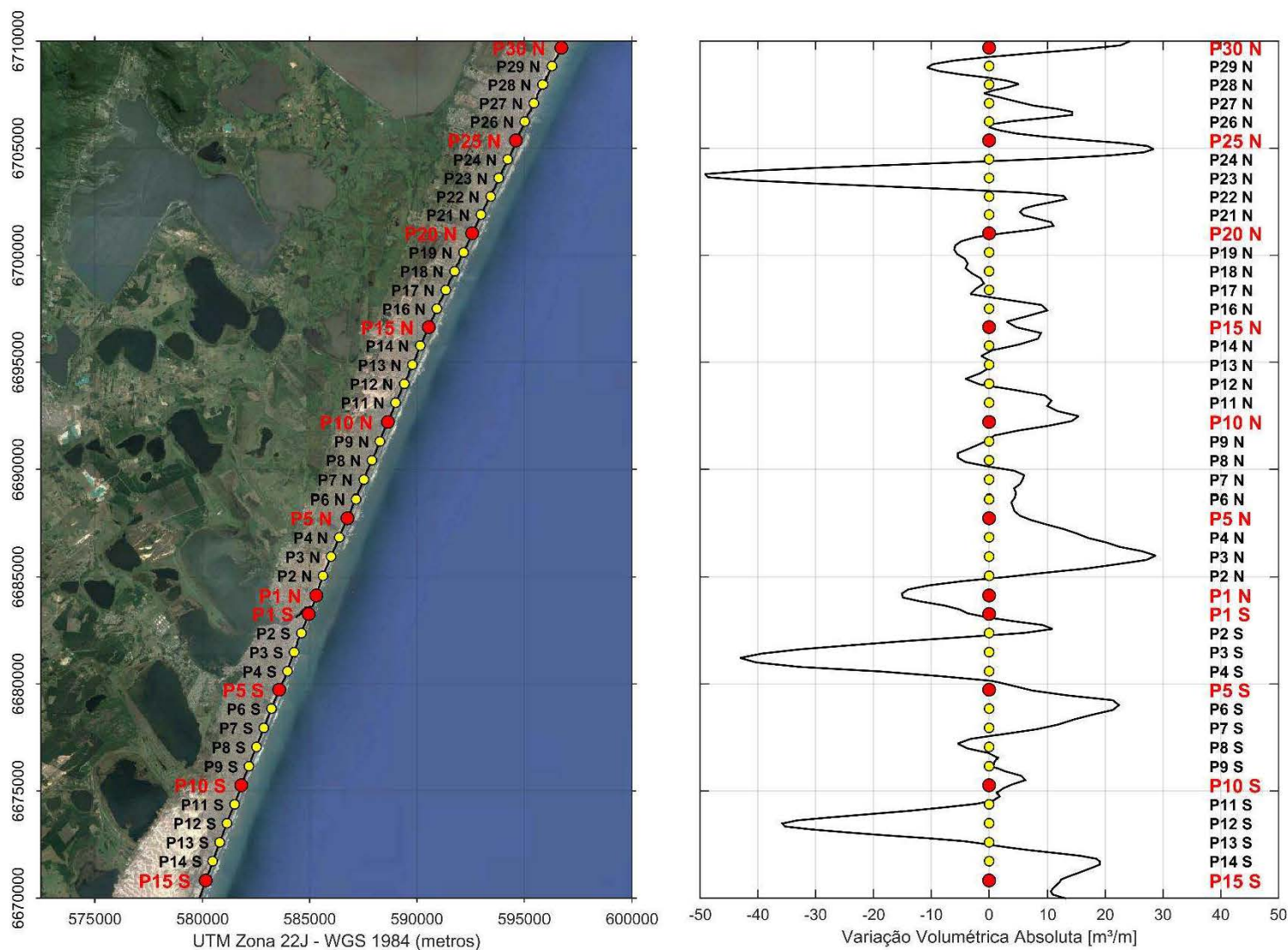


Figura 59. Variação volumétrica absoluta [m³/m].

O balanço sedimentar na região norte do estado foi observado por Esteves (2004), sendo que a escala temporal mapeada para que o processo de erosão-acresção entre em equilíbrio foi de 19 meses. Período superior que os demais trechos do litoral gaúcho, onde foram determinados períodos máximos de 12 meses. Esta distinção temporal para estabilização das condições de equilíbrio da linha de praia na região norte, pode ser atribuída pela orientação da linha de costa deste segmento, pois nesta área existe uma inflexão da costa, gerando uma descontinuidade na orientação retilínea da linha de costa.

Sintetizando estas informações com os valores obtidos nas modelagens numéricas, existe um padrão definido para a região norte do estado, onde as praias de Tramandaí e Imbé atuam como reservatório de sedimentos, padrão explicado pelo comportamento no balanço resultante ser positivo nestas praias (Figura 57), onde a partir destas, os sedimentos são redistribuídos para as praias de Osório, Xangrilá e Capão da Canoa, onde o balanço do transporte é em torno de zero.

Adjunto a geometria singular da linha de costa do Litoral Norte, com sua configuração regional em forma de baía aliada ao baixo gradiente da plataforma interna adjacente, favorece a redução do nível de energia da ondulação incidente, induzindo o balanço positivo no estoque de sedimentos entre os Perfis 30 N e 15 S. Em contraste na porção costeira onde a configuração da costa resulta em um alto gradiente da plataforma interna, favorecendo maiores níveis energéticos de onda, o balanço no estoque de sedimentos é negativo.

Conforme detalhado em Toldo et. al., (2006), a variabilidade do estoque arenoso da antepraia é intensamente controlada pelas variações no fluxo de energia dentro da zona de arrebentação das praias, devido a pequenas modificações na posição linha de costa. Como exemplo, os autores apontaram para o Litoral Médio, nas praias de Mostardas e Dunas Altas, que uma variação de 10° e 12° na orientação do alinhamento é suficiente para reduzir o potencial do transporte líquido de sedimentos em 20% e 35%, respectivamente. Este mesmo comportamento foi observado nas praias de Tramandaí e Imbé, onde uma pequena variação no alinhamento proporciona um comportamento acrescivo no perfil de praia, mesmo com uma elevada taxa de transporte nesta área (Figura 57), a capacidade suporte do estoque arenoso é mantida. Embora a presença da desembocadura da Lagoa de Tramandaí exerça um papel crucial na distribuição hidro-sedimentar local, são as modificações no sentido

da linha de costa que governam a distribuição espacial dos estoques arenosos ao longo do litoral.

4 CONCLUSÕES

Uma metodologia híbrida (dinâmica e estatística) de transferência do clima de ondas de águas profundas para área costeira foi aplicada, para aumentar numericamente a resolução espacial dos fenômenos de transformação de ondas e possibilitar a determinação das taxas de transporte de sedimentos no Litoral Norte do RS. A partir da aplicação do método deste método e a posterior validação dos resultados através de dados instrumentados medidos in situ, a série temporal com 14 anos de dados de onda foi reconstruída nas proximidades da Praia de Tramandaí.

O produto das propagações de ondas com o modelo D3D-W em águas rasas foram calibrados e a reconstrução da série temporal de ondas com o método de transferência foi validada. Os resultados da aplicação de métodos computacionais integrados, para avaliar o potencial do transporte de sedimentos apresentaram correlação com os trabalhos científicos realizados no local.

O transporte resultante no litoral centro-norte do Rio Grande do Sul é para norte, apresentando uma taxa líquida de 1.098.945 m³/ano. Os valores médios ao longo do ano foi de 2.849 m³/m/ano, com sentido para norte. O volume líquido de sedimentos exportado pelo limite norte da célula praial foi de 1.342.076,03 m³/ano, e pelo limite sul de 243.130,59 m³/ano.

Foi constatado um incremento positivo de 22,38 m³/m/ano na variação volumétrica anual, sendo avaliado a parte emersa e submersa do perfil de praia, sinalizando sedimentação e consequente acresção do perfil da área estudada. Embora a região apresente variações morfológicas constantes e com padrão de retro-alimentação positivo, indicando estabilidade morfológica da linha de costa, existem três locais em que foram identificadas Zonas de Erosão, possivelmente relacionadas com concentração energética das ondas em função dos gradientes batimétricos, onde não deve existir retro-alimentação do perfil, e os sedimentos provavelmente devem ser transportados para fora da área ativa do perfil.

Em geral, os resultados da variação volumétrica dos perfis de praia demonstram que a maior parte da área estudada está com aporte sedimentar, provenientes do sul para norte, apresentando uma tendência acresciva ao longo da área, com taxa de sedimentação média de $1,8 \text{ m}^3/\text{m}$ ao ano.

Embora exista um padrão peculiar no balanço sedimentar na região norte do estado, onde as praias de Tramandaí e Imbé atuam como reservatório de sedimentos, e a partir destas, os sedimentos são redistribuídos para as praias de Osório, Xangrilá e Capão da Canoa, fato este verificado pela estabilização das condições de transporte e equilíbrio sedimentar, e atribuído pela inflexão da linha de costa neste trecho, gerando uma descontinuidade na orientação retilínea costa.

As magnitudes de erosão e sedimentação calculadas, através das simulações numéricas, condizem com os gradientes ao longo da costa, segundo estudos anteriores realizados por outros autores.

Os efeitos morfológicos possuem magnitude relativamente baixa (i.e., ordem de variabilidade natural), fato este observado nas taxas e na variação volumétrica do perfil de praia, devido a geometria da linha de costa ser suavemente retilínea, com ausência de promontórios rochosos e/ou estruturas de retificação e bloqueio de sedimentos.

A quantificação das taxas que envolvem o transporte sedimentar na região possibilita, bem como, as direções resultantes relacionadas a estas taxas, o entendimento prático em curto, médio e longo prazo espaço-temporal da mobilidade da linha de praia, assim subsidiando informações úteis ao gerenciamento costeiro do litoral centro-norte do estado.

O conhecimento das taxas que regem o transporte sedimentar na região centro-norte do Rio Grande do Sul é de extrema importância, pois está diretamente relacionada com o gerenciamento costeiro da região, bem como a mitigação de futuros impactos produzidos pelas obras costeiras e portuárias presentes e em desenvolvimento futuro. Neste contexto, as taxas resultantes são fundamentais, pois apresentam o balanço geral da movimentação dos sedimentos dentro de uma escala espaço-temporal adequada.

ACKNOWLEDGMENTS

Este artigo foi desenvolvido com auxílio do CNPq através de bolsa de estudos. Processo 159691/2012-5.

REFERENCIAS

1. Almeida, L. E. S. B., N. M. L. Rosauero, E. E. Toldo Jr., and N. L. S. Gruber. 1999. Avaliação da profundidade de fechamento para o Litoral Norte do Rio Grande do Sul, em Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 13, Belo Horizonte, MG. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil: Associação Brasileiro de Recursos Hídricos.
2. ALMEIDA, L.E.S.B., TOLDO Jr. E.E., 1997. Relatório Técnico – Projeto Estudos Ambientais em Áreas Costeiras e Oceânicas na Região Sul do País – Região de Osório, RS. IPH, UFRGS, Porto Alegre. 110 p.
3. Almeida, L.E.S.B.; Rosauero, N.M.L.; e Toldo Jr., E.E. 1997. Análise Preliminar das Marés na Barra do Rio Tramandaí, RS. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, Resumos, p. 560-566.
4. Araújo, C. E. S.; Franco, D.; Melo, E.; Pimenta, F. 2003. Wave regime characteristics of southern Brazilian Coast. In: Proceedings COPEDEC VI, v. 97, p.15.
5. ARAUJO, R. S. ; SPROVIERI, F. C. ; FREITAS, D. ; KLEIN, A. H. F. 2010. Variação da morfologia praias e identificação de zonas de erosão acentuada (ZEA) na Envagada do Itapocoroy - SC. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology (Impresso) , v. 14, p. 29-38.
6. BARLETTA, R.C. 2000. Efeitos da Interação Oceano-Atmosfera Sobre a Morfodinâmica das Praias do Litoral Central do Rio Grande do Sul, Brasil. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (Rio Grande, RS), Dissertação de Mestrado, 160p.
7. Bensi, M.; Marinho, R. A.;Maia, L. P. 2005. Clima de ondas e sua implicação com a erosão costeira ao longo do Estado do Ceará. In: Proceedings CONBEP. p.802-815.
8. Booij, N.; Ris, R. C.; Holthuijsen, L. H. 1999. A Third Generation Wave Model for Coastal Regions. 1: Model Description and Validation. Journal. Geophys. Res.-Oceans, v.104 , C4, p. 7649-7666.

9. Calliari, L. J.; Toldo Jr., E.E. 2016. Ocean Beaches of Rio Grande do Sul In: *Brazilian Beaches Systems*. Springer, v.17:507-541.
10. Camus, P.; Mendez, F. J.; Medina, R. 2011. A Hybrid Efficient Method to Downscale Wave Climate to Coastal Areas. *Coastal Engineering*, Volume 58, Issue 9, September, p. 851-862.
11. Camus, P.; Mendez, F. J.; Medina, R.; Cofiño, A. S. 2011. Analysis of Clustering and Selection Algorithms for the Study of Multivariate Wave Climate. *Coastal Engineering*, Volume 58, Issue 9, September, p. 453-462.
12. Candella, R. N. 1997. Estudo de casos de ondas no Oceano Atlântico Sul através de modelagem numérica. *Dissertação UFRJ, Brazil*. 80 p.
13. Coli, A. B. 1994. Análise das Alturas de Onda ao Longo de Rio Grande do Sul: Dados Históricos e Altimétricos. *Monografia, FURG, Rio Grande*, p.58.
14. Coli, A. B. 2000. Estudo Sobre o Clima de Onda em Rio Grande, RS. *Dissertação, FURG, Rio Grande*, p.80.
15. Dillenburg, S. R.; Tomazelli, L. J.; Clerot, L. C. P. 2003. Gradientes de energia de onda: o principal fator controlador da evolução costeira no Rio Grande do Sul durante o holoceno superior. *IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. 3pp.
16. ESTEVES, L.S. 2004. Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul. *UFRS, Instituto de Geociências (Porto Alegre, RS), Tese de Doutorado*, 139p.
17. Figueiredo, S. A., and L. J. Calliari. 2006. Washouts in the central and northern littoral of Rio Grande do Sul State, Brazil: Distribution and implications. *J. Coastal Res., Spec. Issue*, 39, 366–370.
18. Figueiredo, S.A. Calliari, L. J. 2005. Sangradouros, Distribuição Espacial, Variação Sazonal, Padrões Morfológicos e Implicações no Gerenciamento Costeiro. *Gravel vol 3*, p. 47-58.
19. Galiskova, L., Weisse, R. 2006. Estimating near-shore wave statistics from regional hindcasts using downscaling techniques. *Ocean Dynamics* 56, 26–35.
20. GRUBER, N.L.S. 2002. A antepraia na região de Tramandaí , RS. *Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Geociências. UFRGS*. 221 p.
21. Guimarães, P. V.; Farina, L.; Toldo Jr., E. E. 2014. Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil. *Natural Hazards Earth System Sciences*.14, 3195-3205.

22. Herbich, J. B. 2000. Handbook of Coastal Engineering. New York: McGraw-Hill, 1152 pp.
23. Herman, A., Kaiser, R., Niemeier, H.D. 2009. Wind-wave variability in shallow tidal spectral modelling combined with neural network methods. Coastal Engineering 56, 759–772.
24. HOGBEN, N., LUMB, F. E. 1967. Ocean Waves Statistics. London. Her Majesty's Stationery Office, 197 p.
25. Holthuijsen, L. H. et al. 2004. Swan Cycle III version 40.31, User's Manual. Delft: Delft Univ. of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section.
26. Jung, G. B.; Toldo Jr., E. E. 2011. Longshore Current Vertical Profile on a Dissipative Beach. Revista Brasileira de Geofísica, 29(4): 691-702.
27. Kalnay, E.M., Kanamitsu, R., Kistler, W., Collins, D., Deaven, L., Gandin, M., Iredell, S., Saha, G., White, J., Woollen, Y., Zhu, M., Chelliah, W., Ebisuzaki, W., Higgins, J., Janowiak, K.C., Mo, C., Ropelewski, J., Wang, A., Leetmaa, R., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society 77, 437–470.
28. Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen. 1994. Dynamics and Modelling of Ocean Waves, 532 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
29. LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; KESTER, J. A. T. M. VAN; STELLING, G. S. 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering, 51, 883-915.
30. LESSER, G.L. 2009. An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling. PhD dissertation. Delft University of Technology and UNESCO-IHE Institute for Water Education, Holland, 255pp.
31. LIMA, S.F.; ALMEIDA, L.E.S.B. e TOLDO JR., E.E. 2001. Estimate of longshore sediments trans-transport from waves data to the Rio Grande do Sul coast. Pesquisas, 28 (2): 99-107.
32. Lopes, C. G., Zanatta, A., Toldo, E. E., Nunes, J. C. 2008. Mobilidade de curto prazo da linha de praia do Litoral Norte e médio do RS. Anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia.
33. Martin, P.; Dragani, W. Cerne, B.; Alonso, G.; Pescio, A.; Prario, B. 2012. Numerical Simulation of Winds Waves on the Río de La Plata: Evaluation of

- Four Global Atmospheric Databases. *Brazilian Journal of Oceanography*, 60(4): 501-511.
34. Motta, L. M., Toldo, E. E., Almeida, L. E., Nunes, J. C. 2015. Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research*, 73. 49-69.
35. Motta, V. F. 1967. Estudo em Modelo Reduzido Para a Regularização da Embocadura Lagunar de Tramandaí, RS. IPH/ UFRGS.
36. NICOLODI, J.L.; SIEGLE, E.; RECHDEN FO., R. e CORRÊA, I.C.S. 2002. Análise sedimentológica do pós-praia no Rio Grande do Sul. In: Martins, L.R., Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R (eds). *Erosão Costeira: Causas, análise de risco e sua relação com a gênese de depósitos minerais Porto Alegre*.
37. Perez, M. R. 2010. Estudio de la estabilidad de las playas en la Ensenada de Itapocorói (SC, Brasil). Dissertação, IH-Cantabria. 184 p.
38. Perreira, J.; Candella, R. N.; Carvalho, J. L. B. 2000. O clima de ondas na costa sul de Arraial do Cabo, RJ: Distribuição de Parâmetros de Onda. *Notas Técnicas. Facimar*, v. 4, p. 1-9.
39. Pianca, C.; Mazzini, P. L. F.; Siegle, E. 2010. Brazilian Offshore Wave Climate Based on NWW3 Reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1): 53-70.
40. Ris, R. C.; Holthuijsen, L. H.; Booij, N. A Third Generation Wave Model for Coastal Regions. 2: Verification. *Journal. Geophys. Res. Oceans*, v. 104, C04, p. 7667-7681, 1999.
41. Siegle, E. Asp, N.E. 2007. Wave Refraction and Longshore Transport Patterns along the Southern Santa Catarina Coast. *Brazilian Journal Oceanography*. 55(2): 109-120.
42. Silva, A. F.; Toldo, E. Jr.; Weschenfelder, J. 2017. Morfodinâmica da desembocadura da lagoa de Tramandaí (RS, Brasil). *Pesquisas em Geociências*. 44 (1): 155-166 pp. ISSN: 1518-2398.
43. Sprovieri, F. C. 2011. Experimentação Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e Molhe Oeste da Barra do Rio Grande (RS) utilizando os métodos do hipercubo, fluxo de energia e o modelo SMC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande. 189p.
44. Sprovieri, F. C., Fontoura, J. A. S. 2012. Modelagem Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e no Entorno dos Molhes da Barra de Rio Grande (RS), Utilizando o Modelo SMC.

- RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.3 - Jul/Set 2012, 187-195.
45. SPROVIERI, F. C.; FONTOURA, J. A. S.; CALLIARI, L. J.; BARLETTA, R. C. 2010. Modelagem numérica do transporte de areia na praia do Cassino - RS, Brasil. In: SEMENGO, 2010, Rio Grande - Brasil. Seminário de Engenharia Oceânica.
46. Strauch, J. C. 2001. Caracterização do Estado de Mar em Rio Grande. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, SE.
47. Strauch, J. C.; Cuchiara, D. C. Toldo JR, E. E.; Almeida, L. E. 2009. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 14(4). p. 29-37.
48. Strohaecker, T. M.; Toldo Jr. E. E. 2007. O Litoral Norte do Rio Grande do Sul com um Pólo de Sustentabilidade Ambiental do Brasil Meridional. Scripta Nova (Barcelona), v. XI-245, p:1-12.
49. Toldo Jr, E. E, Jr.; Almeida, L, E, S, B.; Nicolodi, J.; Absalonsen, L; Bruber, N, L, S. 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. Journal of Coastal Research. SI39, p: 390-394.
50. Toldo Jr, E. E, Jr.; Almeida, L.E.S.; Barros, C. e Martins, L.R. 1999. Retreat of the Rio Grande do Sul coastal zone, Brazil. In: Martins, L.R. and Santana, C. I. (eds). Non Living Resources of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin. Porto Alegre, Brazil: Editora UFRGS: 62-68 pp.
51. Toldo Jr, E. E.; Almeida, L. E. S. B. 2003. A Linha de água como Indicadora da Posição da Linha de Praia. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. CD.
52. Toldo Jr, E. E.; Dillenburg, S. R.; Cunha, L. O. B. P.; Almeida, L. E. S. B.; Tabajara, L. L.; Martins, R. R. 1993. Parâmetros Morfodinâmicos da Praia de Imbé, RS. Revista PESQUISAS, 19;27-32.
53. TOLMAN, H. L. 19976. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 151, 97 pp.
54. Tolman, H.L. 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166. 110 pp.
55. Tomazelli, L. J. 1993. O Regime de Ventos e a Taxa de Migração das Dunas Eólicas Costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. Pesquisas em Geociências, 20(1): 18-26.

56. U.S. Army Coastal Engineering Research Center/ CERC. 1984. Shore Protection Manual. 4ed., Vol (1). Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. USA. 208p.
57. Van Rijn, L. C. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
58. WAMDIG. 1988. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography, 18, 1775-1810.
59. WESCHENFELDER, J.; AYUP-ZOUAIN, R.N.; ZOMER, S.L.C. & SOUTO, R.P. 1997. Caracterização Morfológica das Praias Oceânicas entre Imbé e Arroio do Sal, RS. Notas Técnicas, 10, 35-48.
60. WL | Delft Hydraulics. 2007. Physical Formulation SWAN and Data for Validation: Report no. H3528, Delft.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese teve como objetivo integrar diversos métodos numéricos e técnicas estatísticas para estabelecer uma compreensão abrangente dos processos hidrodinâmicos responsáveis para o sul do Brasil e especificamente para a região do Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul.

Para atingir esse objetivo, a tese foi estruturada em três partes: 1) caracterização do clima de ondas e análises de tendências de longo prazo para variações no sul do Brasil; 2) caracterização do potencial energético das ondas para o sul do Brasil e a possível exploração do recurso a nível de protótipo para a Plataforma de Pesca de Tramandaí – RS; e 3) quantificar as taxas e magnitudes do transporte de sedimentos e evoluções morfológicas para o Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

A partir dos resultados discutidos e apontados nos artigos, expostos acima, as principais conclusões que foram obtidas a partir desta tese são:

1) Uma metodologia híbrida (dinâmica e estatística) de transferência do clima de ondas em águas profundas para área costeira foi aplicada, aumentando numericamente a resolução espacial dos fenômenos de transformação de ondas. A partir da aplicação do método de transferência para os dados de reanálise de onda (NWW3 – 3000m) do estado do Rio Grande do Sul, e a posterior validação dos resultados (D3D-W – 17m) obtidos com dados instrumentados medidos *in situ*, a série temporal com 14 anos de dados de onda (Hs, Tp e Dirp) foi reconstruída em águas rasas na Praia de Tramandaí. Os resultados da aplicação de métodos computacionais integrados, para avaliar o clima de ondas na Praia de Tramandaí – RS apresentaram correlação com os dados medidos em campo, e com os trabalhos científicos realizados no local. O algoritmo de interpolação linear aplicado na reconstrução da série temporal de ondas apresentou alta eficiência em relação à comparação com os dados instrumentados medidos *in situ*. O clima de ondas para águas profundas (NWW3 – 3000m) e para águas rasas (D3D-W – 17m) foi analisado estatisticamente. Comparando as séries de dados fica evidente a transformação energética ao longo da propagação de ondas em direção à costa, um exemplo pode ser observado no outono, aonde uma onda com altura significativa máxima em águas profundas de 7,76 m incide na área costeira com 5,46 m, decrescendo 2,36 m (70,4%) ao longo de sua trajetória.

O padrão da ondulação no sul do Brasil em águas profundas (NWW3 – 3000 m) pode ser descrito resumidamente como: (i) ondulação proveniente de $115,9^\circ$ (ESE) com altura significativa média de 2,17 m e período de pico correspondente de 7,75 s; (ii) ondulação proveniente de $142,4^\circ$ (SE) com altura significativa média de 2,44 m e período de pico correspondente de 8,32 s; para águas rasas (D3D – 17 m) pode ser descrito resumidamente como: (i) ondulação proveniente de $110,4^\circ$ (ESE) com altura significativa média de 1,17 m e período de pico correspondente de 8,23 s; (ii) ondulação proveniente de $123,5^\circ$ (SE) com altura significativa média de 1,20 m e período de pico correspondente de 8,70 s. Finalmente, através do suporte de simulações numéricas conduzidas com o modelo Delft-3D (Waves) forçadas com dados reanalisados NCEP/NCAR e WWIII/NOAA, foi verificado que existe uma tendência positiva no aumento significativo das alturas de ondas no sul do Brasil. A partir dos cálculos realizados, em águas profundas entre 1997 e 2010 houve um aumento de 0,34 m (0,02 m/ano), e em águas rasas um aumento de 0,21 m (0,009 m/ano). Um incremento nas alturas de onda (e, conseqüentemente, na densidade de energia de onda) pode ser capaz de afetar os processos litorâneos. Isso especialmente irá refletir em variações no transporte de sedimentos ao longo da costa, associado ao aumento do *set-up* das ondas e, conseqüentemente, na erosão da costa sul do Brasil. Portanto, a costa sul brasileira estará mais frequentemente exposta aos efeitos de onda, dando origem a processos litorâneos mais intensos e significativos.

2) O potencial energético das ondas diminui em direção a costa, devido à dissipação energética dos processos de propagação de ondas sobre a plataforma continental sul brasileira. Em termos gerais, a propagação de ondas de águas profundas a 3.000 m em direção à costa, especificamente até o ponto localizado em águas intermediárias a 17 m de profundidade, acarreta uma dissipação de energia de 67%. As ondas propagadas do ponto em águas intermediárias até o ponto localizado em águas rasas a 4.2 m de profundidade sofrem uma dissipação energética de 46%. A densidade de potência energética calculada varia entre 230,36 MW/m/ano para águas profundas, 76,33 MW/m/ano para águas intermediárias e 40,94/m/ano para águas rasas. A produtividade operacional em 50% do tempo para conversão do recurso calculada para águas intermediárias é de 10,48 kWh/m e 6,15 kWh/m para águas rasas, estas atribuídas a ondulação proveniente de SE e ESE, respectivamente. A máxima produtividade calculada é de 75,77 e 18,89 kWh/m, respectivamente, contudo esta potência é atingida apenas em 1% do tempo operacional anual. Ambos os pontos

avaliados em águas intermediárias e rasas apresentam alto potencial para futuros projetos de extração energética das ondas de gravidade do mar. A magnitude do potencial energético das ondas estimado neste trabalho permite prospectar a energia ondomotriz como uma alternativa capaz de realizar um aporte significativo a uma matriz energética nacional sustentável. A metodologia de transferência apresentou resultados significativos para permitir a descrição do potencial energético das ondas para a região sul do Brasil, em dois pontos distintos de análises, onde a indisponibilidade de uma base de dados temporais foi suprimida através de uma integração de métodos numéricos.

3) O conhecimento das taxas que regem o transporte de sedimentos na região centro-norte do Rio Grande do Sul é de extrema importância, pois está diretamente relacionada com o gerenciamento costeiro da região, bem como a mitigação de futuros impactos produzidos pelas obras costeiras e portuárias presentes e/ou em desenvolvimento futuro. Neste contexto que as taxas do transporte de sedimentos resultantes são fundamentais, pois apresentam o balanço geral da movimentação dos sedimentos dentro de uma escala espaço-temporal adequada. O transporte resultante de sedimentos no litoral centro-norte do Rio Grande do Sul é para norte, apresentando uma taxa líquida resultante de 1.098.945 m³/ano. A taxa média do transporte de sedimentos resultante ao longo do ano para a região estudada é de 2.849 m³/m/ano, com sentido para norte. Foi constatado um incremento positivo de 22,38 m³/m/ano na variação morfológica (volumétrica) anual, no qual é avaliado a parte emersa e submersa do perfil de praia, sinalizando sedimentação e consequente acresção do perfil da área estudada. Embora a região apresente variações volumétricas de sedimentos constantes e com padrão de retro-alimentação positivo, indicando estabilidade morfológica da linha de costa, existem três locais em que foram identificadas Zonas de Erosão, possivelmente relacionadas com a configuração do gradiente batimétrico na plataforma interna, onde não deve existir retro-alimentação do perfil, e os sedimentos provavelmente devem ser transportados para fora da área ativa do perfil. Em geral, os resultados de variação volumétrica dos perfis de praia demonstram que a maior parte da área estudada está com aporte de sedimentos, estes provenientes do transporte do sentido sul para norte, apresentando uma tendência acresciva ao longo dos perfis de praia, com taxa de sedimentação média de 1,8 m³/m ao ano.

Os efeitos morfológicos possuem magnitude relativamente baixa (i.e., ordem de variabilidade natural), fato este observado nas taxas e na variação volumétrica do perfil de praia, devido a geometria da linha de costa ser suavemente retilínea, com ausência de promontórios rochosos e/ou estruturas de retificação e bloqueio de sedimentos. A quantificação das taxas que envolvem o transporte sedimentar na região possibilita, bem como, as direções resultantes relacionadas a estas taxas, o entendimento prático em curto, médio e longo prazo espaço-temporal da mobilidade da linha de praia, assim subsidiando informações úteis ao gerenciamento costeiro do litoral centro-norte do estado. O conhecimento das taxas que regem o transporte sedimentar na região centro-norte do Rio Grande do Sul é de extrema importância, pois está diretamente relacionada com o gerenciamento costeiro da região, bem como a mitigação de futuros impactos produzidos pelas obras costeiras e portuárias presentes e em desenvolvimento futuro. Neste contexto, as taxas resultantes são fundamentais, pois apresentam o balanço geral da movimentação dos sedimentos dentro de uma escala espaço-temporal adequada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, L. E. S. B., N. M. L. Rosauero, E. E. Toldo Jr., and N. L. S. Gruber. Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul, em Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 13, Belo Horizonte, MG. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil: Associação Brasileiro de Recursos Hídricos. 1999.
- Almeida, L.E.S.B., Toldo Jr. E.E., 1997. Relatório Técnico – Projeto Estudos Ambientais em Áreas Costeiras e Oceânicas na Região Sul do País – Região de Osório, RS. IPH, UFRGS, Porto Alegre. 110 p.
- Almeida, L.E.S.B.; Rosauero, N.M.L.; e Toldo Jr., E.E. Análise Preliminar das Marés na Barra do Rio Tramandaí, RS. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, Resumos, p. 560-566. 1997.
- Araújo, C.E.S., Franco, D., Melo, E., Pimenta, F., 2003. Wave regime characteristics of southern Brazilian Coast. In: Proceedings COPEDEC VI, v. 97, p.15.
- Bensi, M., Marinho, R.A., Maia, L.P., 2005. Wave climate and its implication to coastal erosion along the Ceara State. In: Proceedings CONBEP. pp. 802–815.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A Hybrid Efficient Method to Downscale Wave Climate to Coastal Areas. Coastal Engineering 58 (9), 851–862.
- Candella, R. N. Estudo de casos de ondas no Oceano Atlântico Sul através de modelagem numérica. Dissertação UFRJ, Brazil. 80 p. 1997.
- Elfrink, Berry. Longshore Transport in the Swash Zone. Copenhagem: Notex. 1996. 153 p. ISBN: 0107-1092.
- Fredsoe, J.; Deigaard, R. Mechanics of Coastal Sediment Transport: Advanced Series on Ocean Engineering. Singapura: World Scientific. 1992. 369 p. vol. 3. ISBN: 9810208405
- GRUBER, N.L.S. 2002. A antepraia na região de Tramandaí , RS. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Geociências. UFRGS. 221 p.
- Jung, G.B., Toldo Jr., E. E., 2011/ Longshore Current Vertical Profile on a Dissipative Beach. Brazilian Journal of Geophysics 29 (4), 691–702.

Nicolodi, J.L.; Siegle, E.; Rechden F. O., R. e Corrêa, I.C.S. 2002. Análise sedimentológica do pós-praia no Rio Grande do Sul. In: Martins, L.R., Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R (eds). Erosão Costeira: Causas, análise de risco e sua relação com a gênese de depósitos minerais Porto Alegre.

Ocean Energy Systems (OES). 2011. International Energy Agency. An International Vision for Ocean Energy.

Perreira, J.; Candella, R. N.; Carvalho, J. L. B. O clima de ondas na costa sul de Arraial do Cabo, RJ: Distribuição de Parâmetros de Onda. Notas Técnicas. Facimar, v. 4, p. 1-9, 2000.

Sprovieri, F. C. Experimentação Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e Molhe Oeste da Barra do Rio Grande (RS) utilizando os métodos do hipercubo, fluxo de energia e o modelo SMC. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande. 189p.

Sprovieri, F. C., Fontoura, J. A. S. Modelagem Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e no Entorno dos Molhes da Barra de Rio Grande (RS), Utilizando o Modelo SMC. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.3 - Jul/Set 2012, 187-195. 2012.

Sprovieri, F. C.; Fontoura, J. A. S. ; Calliari, L. J. ; Barletta, R. C. . Modelagem numérica do transporte de areia na praia do Cassino - RS, Brasil.. In: SEMENGO, 2010, Rio Grande - Brasil. Seminário de Engenharia Oceânica, 2010.

Strauch, J. C.; Cuchiara, D. C. Toldo JR, E. E.; Almeida, L. E. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 14(4). p. 29-37. 2009.

Toldo Jr, E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S., 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. Journal of Coastal Research SI39, 390– 394.