



REMAT

Revista Eletrônica da Matemática

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul



A Matemática nos fenômenos de refração e difração de ondas marítimas no litoral do Rio Grande do Sul

Susana Beatris Oliveira Szewczyk

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)

Restinga, RS, Brasil

susana.szewczyk@restinga.ifrs.edu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho¹ é integrar programas de pré e pós-processamento na análise de propagação de ondas marítimas, em zonas costeiras, usando um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os dados de saída do SIG, que contém as informações do domínio de estudo, são tratados e, a partir desses, são gerados os dados que servem de entrada para um modelo de propagação de ondas. Os resultados obtidos pelo modelo são preparados para que possam ser visualizados. A ferramenta SIG adotada é o SPRING e o modelo de propagação de ondas é o REFDIF1 (KIRBY; DALRYMPLE, 1994). Para tal, foram desenvolvidos os programas de pré e pós-processamento SPRING_REFDIF e REFDIF_SPRING, que facilitaram o fluxo de informações entre as fases de pré-processamento, processamento e pós-processamento, diminuindo o tempo de estudo do problema. A validação dessa plataforma foi realizada em uma simulação de propagação de ondas marítimas em uma região do litoral sul do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica. Modelos Numéricos. Propagação de Ondas.

Abstract

The aim of this work² is to integrate programs for pre and post-processing in the analysis of the spread of sea waves, in coastal areas, using a Geographic Information System (GIS). The GIS output data, which contains the study of domain information, are treated and, from these, the data that serve as input to a model of wave propagation are generated. The results of the model are prepared to they can be viewed. The GIS adopted tool is the SPRING and the wave propagation model is the REFDIF1 (KIRBY; DALRYMPLE, 1994). For such, pre and post-processing programs - SPRING_REFDIF and REFDIF_SPRING - were developed to facilitate the flow of information among the stages of preprocessing, processing and post-processing, reducing the time for studying the problem. The validation of this platform was carried out in a simulation of the propagation of sea waves in a region of the south coast of Rio Grande do Sul.

Keywords: Geographic Information System. Numerical Models. Wave Propagation.

¹ Este artigo é continuidade do trabalho “Ferramentas de Pré e Pós-Processamento para Propagação de Ondas em Zonas Costeiras Usando um SIG” (SZEWCZYK *et al.*, 2005), no qual mostram-se e validam-se analiticamente os resultados aplicados a uma rampa hipotética. Aqui os resultados apresentados referem-se a aplicações dos programas em zonas de batimetria real na costa gaúcha, sendo parte do primeiro estudo sobre a refração e a difração de ondas na costa do Rio Grande do Sul.

² This article is the continuity of the work “Ferramentas de Pré e Pós-Processamento para Propagação de Ondas em Zonas Costeiras Usando um SIG” (SZEWCZYK *et al.*, 2005), in which are showed and analytically validated the results when applied to a hypothetical ramp. Here the presented results concern to applications of the programs in real bathymetry zones in the south coast of Rio Grande do Sul, being part of the first study about refraction and diffraction of sea waves in this local.

1. Introdução

A informação das medições das ondas marítimas em zonas costeiras, em regiões de interesse, é essencial no estudo de problemas ambientais. A crescente demanda de investigação de forma precisa, das condições das ondas de projeto, do transporte de sedimentos e da circulação na zona de rebentação têm resultado em avanços significativos nos modelos de transformação de ondas durante as últimas décadas (LIU; LOSADA, 2002).

Usualmente, a altura e a direção de propagação das ondas em uma região da costa são determinadas a partir do conhecimento das características das ondas em águas profundas. À medida que as ondas se aproximam da costa, a variação da profundidade, a presença de estruturas artificiais e as modificações das características geológicas, provocam mudanças na direção e na velocidade de propagação das ondas, além de ocorrer uma redistribuição de energia das ondas. Também, dentro da zona de rebentação, as ondas experimentam diversas transformações importantes e complexas (LIU, 1990).

No estudo de propagação de ondas marítimas em zonas costeiras, está associado, frequentemente, um elevado grau de complexidade e morosidade, tanto na preparação dos dados batimétricos, base fundamental de estudo, como na análise dos resultados dos modelos numéricos utilizados. As referidas tarefas tornam-se ainda mais morosas quanto mais complexo for o caso ou o modelo numérico a utilizar.

Assim, a gestão integrada do litoral, a exploração dos recursos marinhos, as diversas vertentes dos estudos oceanográficos, o planejamento, a execução e o controle de obras marítimas são exemplos de atividades cujo sucesso exige o conhecimento mais completo e atualizado possível do meio em que ocorrem, ou seja, o ambiente marinho. De igual forma, a condução de operações navais e aeronavais requer esse conhecimento. Para que esse conjunto de informações possa ser utilizado na sua potencialidade, tem que existir um sistema que, de forma cientificamente organizada, permita a exploração integrada da informação proveniente desses vários domínios do conhecimento.

A utilização racional da informação disponível passa por um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Sob o ponto de vista de sua funcionalidade, o SIG é um conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento, organização e seleção, transformação e representação de informação de natureza espacial do mundo real, para um determinado conjunto de circunstâncias (BURROUGH, 1986). O nome SIG é, em muitos casos, confundido com geoprocessamento. O geoprocessamento é um conceito mais abrangente e representa qualquer tipo de processamento

de dados georeferenciados, enquanto um SIG processa dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase em análises espaciais e em modelagens de superfícies (SPRING³).

Há, pelo menos, três grandes maneiras de utilizar um SIG: como ferramenta para produção de mapas; como suporte para análise espacial de fenômenos; como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e de recuperação de informação espacial. Essas três visões do SIG são antes convergentes que conflitantes e refletem a importância relativa do tratamento da informação geográfica dentro de uma instituição.

Uma das dificuldades da análise computacional de propagação de ondas em zonas costeiras é a necessidade de compatibilização de fluxo de dados entre os aplicativos envolvidos. Geralmente, os modelos de propagação de ondas utilizam um domínio referenciado em coordenadas retangulares. Em função disso, é necessário converter as coordenadas geográficas (em latitudes e longitudes) de uma carta digitalizada para coordenadas retangulares.

No presente trabalho, empregou-se uma ferramenta SIG para essa tarefa. A ferramenta de georeferenciamento SPRING é um aplicativo de domínio público, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) da Divisão de Processamento de Imagens (DPI). A opção por esse aplicativo neste trabalho resulta do fato de ser gratuito, de permitir a geração de grades retangulares e de possibilitar a escolha do sistema de projeção mais adequado.

2. Referencial teórico

2.1. A modelagem de propagação de ondas em zonas costeiras

No início dos anos 60, o método das ortogonais era uma ferramenta usual para a estimativa das características das ondas no local em estudo. Hoje, computadores mais potentes têm ajudado pesquisadores a empregar modelos numéricos mais sofisticados para esse fim. No entanto, esses modelos numéricos estão ainda baseados em equações governantes, condições de contorno e esquemas numéricos simplificados, impondo muitas restrições às aplicações práticas (LIU; LOSADA, 2002). A solução de um problema de propagação de ondas marítimas de forma exata, considerando todos os processos físicos, os quais envolvem diferentes escalas temporais e espaciais, requer um esforço computacional muito grande.

Atualmente, podem-se distinguir basicamente dois tipos de modelos de propagação de ondas: os modelos baseados na teoria das ondas e aqueles que simulam os escoamentos de forma direta como os desenvolvidos pelo Centro de Estudos e Experimentos de Obras Públicas (CEDEX, 1993). As aproximações baseadas na teoria das ondas requerem, em geral, considerações bastante limitantes, embora as formulações sejam compactas e aplicáveis com um baixo custo

³ SPRING. Manual do usuário. São José dos Campos. INPE/DPI, 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>>. Acesso em: abr. 2016.

computacional. Estão, nesse grupo, o método das ortogonais, a equação de declive suave e a equação parabólica.

As formulações baseadas na simulação do escoamento utilizam as equações básicas da mecânica dos fluidos (conservação da massa e quantidade do movimento, por exemplo) e algumas considerações simples que permitem tratar um maior número de problemas. O inconveniente desses modelos é a sua superior complexidade e custo computacional. As equações de Boussinesq pertencem a esse grupo de modelos. Muitos esforços têm sido realizados com o objetivo de elaborar um modelo único que possa simular a propagação de ondas desde águas profundas até águas rasas.

O método das ortogonais para casos em que a batimetria varia suavemente considera o princípio da conservação de energia. Embora ele tenha a vantagem de permitir uma discretização espacial do domínio em espaços relativamente grandes, essa aproximação não considera o fluxo de energia transversal aos raios de onda, ocasionando intersecção de raios (cáusticas) onde a difração e efeitos não-lineares são importantes.

Baseada na teoria linear da onda, uma melhoria no método das ortogonais foi sugerida primeiramente por Eckart (1952) e, mais tarde, por Berkhoff (1972), propondo uma teoria bidimensional para tratar problemas de refração e difração em regiões de grandes dimensões. A denominada equação de declive suave (*mild-slope*) foi desenvolvida considerando variações suaves de profundidade em relação ao comprimento de onda. Por se tratar de uma equação do tipo elíptica, surgem dificuldades em estabelecer algumas condições de contorno. Também, pelo esforço computacional requerido, a aproximação fica limitada a áreas pouco extensas. Diversos autores aplicaram o modelo de declive suave em muitos exemplos, primeiramente, utilizando a técnica de elementos finitos, destacando-se Jonsson e Skovgaard (1979), Bettess e Zienkiewicz (1977) e Houston (1981).

Radder (1979) desenvolveu um modelo parabólico para a equação de declive suave linear, o qual tem diversas vantagens sobre a forma elíptica apresentada por Berkhoff (1972). Além de necessitar de condições de contorno mais simples, a solução é mais eficiente computacionalmente. Radder utilizou a aproximação da matriz particionada que consiste em separar o campo da onda incidente da refletida, desprezando esta última. Resulta, assim, uma restrição do modelo parabólico, em que as ondas devem propagar-se, no máximo, a 45° da direção de propagação predominante.

Booij (1981) também desenvolveu um particionamento da equação elíptica, mas com um esquema que inclui mais termos na aproximação para a derivada lateral; habilitando, assim, o modelo parabólico a tratar problemas com propagação de ondas de até 60° de desvio em relação à direção predominante de propagação. Kirby (1986) desenvolveu uma extensão da aproximação de Booij baseado no princípio Minimax, aumentando ainda mais a faixa de validade do modelo.

Kirby e Dalrymple (1986) descreveram um modelo híbrido, que considera os efeitos não lineares das ondas através de uma relação de dispersão que varia suavemente da forma

desenvolvida por Hedges (1976) (para águas rasas) para a relação de Stokes, válida para águas profundas.

Neste trabalho, utiliza-se o programa REFDIF1 (KIRBY; DALRYMPLE, 1994), o qual se baseia na expansão de Stokes e inclui a correção de terceira ordem na velocidade da onda permite a inclusão de correntes que afetam na resposta da elevação e direção das ondas em propagação (KIRBY; DALRYMPLE, 1983). O modelo é parabólico e usa a técnica de diferenças finitas para a amplitude de onda. O algoritmo da versão empregada baseia-se no princípio de Minimax de Kirby (1986).

2.2. O programa REFDIF1

O REFDIF1 (KIRBY; DALRYMPLE, 1994) é um modelo de propagação de ondas desenvolvido na Universidade de Delaware, Newark. Utiliza a equação parabólica baseada no método Minimax de Kirby (1986), permitindo bons resultados para faixas de desvios de direção de onda de $\pm 70^\circ$ em relação à direção predominante. O programa é usado em propagação de trens de ondas monocromáticas em uma dada direção.

A equação de dispersão considera os efeitos de não linearidade através da aproximação de Kirby e Dalrymple (1986). O modelo prevê a interação onda-corrente, baseada na equação de Kirby (1986). As dissipações de energia também são consideradas. Inclui o modelo de Phillips (1966) para os efeitos de amortecimento da onda devido à camada limite na superfície livre e ao modelo apresentado por Dean e Dalrymple (1991) para as camadas limites laminar e turbulenta. A dissipação por rebentação é considerada no modelo quando $H > 0,78h^4$ (KIRBY; DALRYMPLE, 1994).

O programa é codificado em FORTRAN77 empregando o método implícito de discretização de diferenças finitas de Crank-Nicolson. Por se tratar de um modelo parabólico, as condições de contorno laterais são menos complexas. O REFDIF1 permite contornos laterais abertos ou fechados (reflexão total).

2.3. Os programas de pré e pós-processamento

Na análise de problemas de propagação de ondas, a digitalização da carta náutica, a transformação em coordenadas planas e a geração de uma grade adequada à direção de propagação de ondas são tarefas realizadas na fase de pré-processamento de solução. Após a fase de processamento, é necessário formatar os arquivos de saída, adequando-os às ferramentas de visualização de resultados (fase do pós-processamento). A ferramenta SPRING foi utilizada para a

⁴ Relação entre a altura de onda (H) e a profundidade (h).

etapa de transformação de coordenadas geográficas em planas e o modelo REFDIF1 na fase de processamento. A visualização dos resultados foi realizada no Tecplot⁵.

2.4. As etapas de simulação de propagação de ondas

A simulação de propagação de ondas começa pelo processo de digitalização de cartas náuticas, que resulta em um arquivo contendo a batimetria da região em pontos referenciados no sistema de coordenadas geográficas. No SPRING, gera-se uma grade retangular xy baseada no sistema de Projeção Universal de Mercator (UTM), a partir do arquivo obtido na digitalização. Para isso, são necessárias informações das longitudes e latitudes limites da região em estudo, da escala da carta e do elipsoide de referência adotado. Além disso, deve-se escolher o método de interpolação mais adequado e o espaçamento (dx , dy) da grade gerada. Este último deve permitir que a topografia do fundo seja reproduzida de forma mais fiel possível com a realidade. Por outro lado, sabe-se que espaçamentos muito pequenos podem dificultar ou, até mesmo, impossibilitar a solução computacional do problema em estudo.

O programa implementado SPRING_REFDIF é responsável pela geração da nova grade retangular a ser utilizada pelo REFDIF1 a partir da grade obtida do SPRING. Após o processo de simulação, o programa desenvolvido no presente trabalho, denominado REFDIF_SPRING, tem a função de adequar os arquivos de saída do REFDIF1 para um arquivo que contenha os resultados da simulação. Esse arquivo é acessado pelo SPRING, permitindo a visualização da distribuição da altura da onda. A visualização dos raios de onda é realizada através do aplicativo Tecplot.

2.5. O programa de pré-processamento SPRING_REFDIF

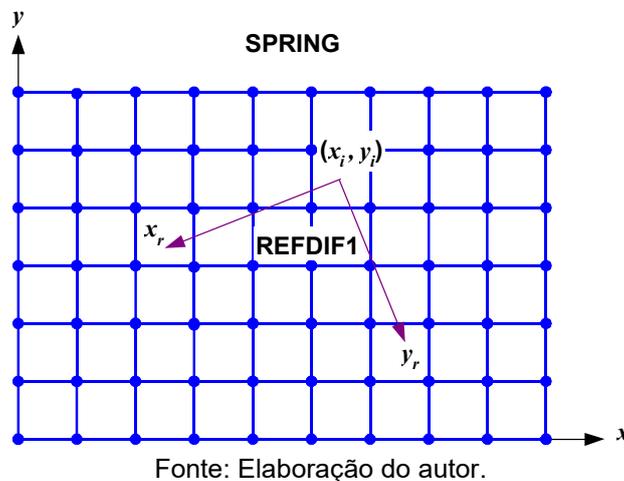
Como dito anteriormente, o programa de pré-processamento SPRING_REFDIF é responsável pela geração da grade utilizada pelo modelo REFDIF1. A batimetria dos pontos é obtida pela interpolação da batimetria da grade gerada pelo SPRING, referenciada segundo o sistema de projeção UTM xy . A grade utilizada pelo REFDIF1 está referenciada ao sistema de coordenadas $x_r y_r$. Primeiramente, deve ser informado ao programa SPRING_REFDIF o ponto de origem ou inicial ($x_i y_i$) da nova grade referenciada ao sistema de coordenadas xy , bem como o ângulo de rotação entre os eixos xy e os eixos $x_r y_r$. Este ângulo é escolhido de tal forma que o eixo x_r seja a direção predominante de propagação da onda (Figura 1).

O espaçamento dx_r , dy_r adotado para a nova grade, deve ser adequado ao fenômeno que se deseja simular. É recomendável que, pelo menos, existam 5 pontos por comprimento de onda local (KIRBY; DALRYMPLE, 1994). Nota-se que esse espaçamento está desvinculado do

⁵ Tecplot. Reference Manual. Version 7.5. Amtec Engineering, Inc. Bellevue. Washington. 1998.

espaçamento adotado para a grade gerada pelo SPRING, o qual deve ser escolhido em função da topografia de fundo.

Figura 1 – Orientações dos sistemas coordenados dos programas REFDIF1 e SPRING.



O processo de interpolação da batimetria começa pela transformação das coordenadas dos pontos da grade do REFDIF1 referenciadas no sistema $x_r y_r$, em coordenadas do sistema xy . Considera-se um ponto P pertencente à grade do REFDIF1 de coordenadas (x_p, y_p) .

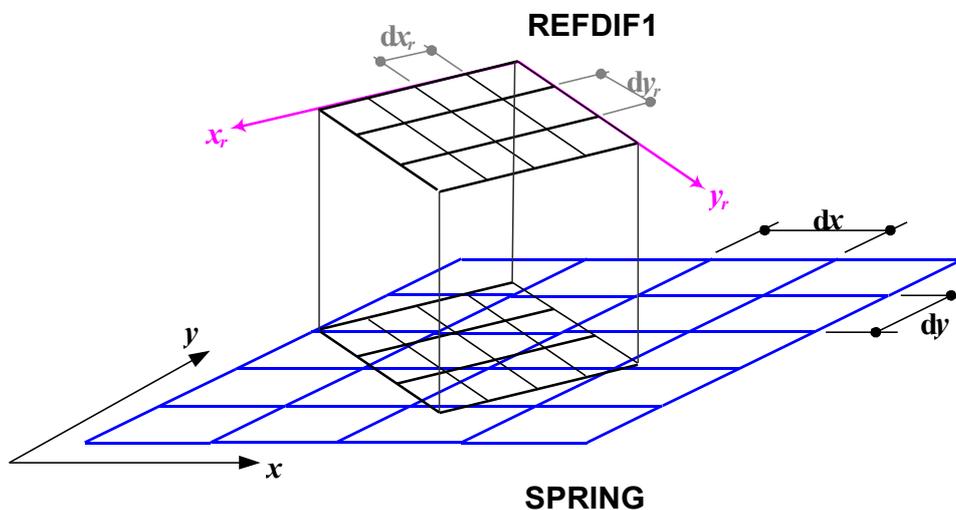
As coordenadas desse ponto (x_p, y_p) no sistema de referência xy são determinadas utilizando as formulações de translação e rotação de eixos. Assim, as coordenadas (x_p, y_p) do ponto P , referenciadas no sistema xy são dadas por:

$$x_p = x_i + x_{rP} \cos \alpha + y_{rP} \sin \alpha \quad (1)$$

$$y_p = y_i + y_{rP} \cos \alpha - x_{rP} \sin \alpha \quad (2)$$

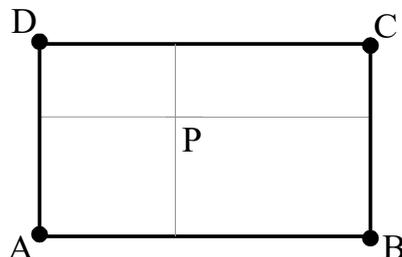
sendo α o ângulo de rotação do sistema $x_r y_r$ em relação a xy , positivo no sentido horário (Figura 2).

Figura 2 – Interpolação entre as grades do REFDIF1 e SPRING.



O ponto $P(x_p, y_p)$, agora referenciado segundo o sistema xy , está localizado dentro de uma célula desse sistema composta pelos pontos A , B , C e D , pertencentes à grade de SPRING (Figura 3).

Figura 3 – Ponto $P(x_p, y_p)$ localizado na célula da grade do SPRING.



Fonte: Elaboração do autor.

É realizada uma interpolação linear das batimetrias dos pontos A , B , C e D , para a obtenção da batimetria z_p do ponto $P(x_p, y_p)$. Para isso, consideram-se as coordenadas (u, v) , que variam de 0 a 1, para localizar o ponto $P(x_p, y_p)$ em relação aos pontos da célula do sistema xy . Assim, a batimetria z_p é determinada da forma:

$$z_p = [uz_B + (1 - u)z_A]v + [uz_D + (1 - u)z_C](1 - v) \quad (3)$$

onde z_A , z_B , z_C e z_D são as batimetrias conhecidas dos pontos A , B , C e D , respectivamente. Dessa forma, cada ponto da grade x_r, y_r tem a sua batimetria conhecida. Esses dados são organizados em um arquivo, denominado de *refdat.dat*, que serve de entrada ao programa REFDIF1. As condições iniciais e de contorno do problema, o número de linhas e de colunas e o espaçamento da grade são informados no arquivo *indat.dat*. Parâmetros indicadores da existência de correntes ou não, de atrito no fundo, de tipo de camada limite, de tipo de equação de dispersão (linear ou não-linear), entre outros, também, constam neste arquivo.

2.6. O programa de pós-processamento REFDIF_SPRING

O programa REFDIF1 proporciona uma saída de resultados contendo, principalmente, as seguintes informações em cada ponto da grade: elevação da superfície livre no arquivo *surface.dat*; direção da onda no arquivo *angle.dat*; altura de onda no arquivo *height.dat* e profundidades no arquivo *depth.dat*. O programa REFDIF_SPRING faz a leitura desses resultados e gera os arquivos *spring.spr* e *tecplot.dat*. O primeiro contém a elevação da superfície em um formato adequado para leitura e visualização. O segundo contém informações da altura e da direção da onda no formato de entrada do Tecplot. Nesses arquivos, os pontos da grade do REFDIF1 devem ser referenciados segundo o sistema xy . A transformação das coordenadas do sistema x_r, y_r para o sistema xy é realizada através das Equações (1) e (2) no programa REFDIF_SPRING.

3. Resultados e discussão

3.1. Aplicação ao litoral sul do Rio Grande do Sul

A costa sul do Rio Grande do Sul, do Cabo de Santa Marta até o Arroio Chuí, caracteriza-se por uma ampla planície costeira com cerca de 700 km de comprimento e até 120 km de largura. Sob o ponto de vista da importância relativa dos diferentes agentes hidrodinâmicos, a costa do Rio Grande do Sul pode ser classificada como uma costa que, em toda a sua extensão, é francamente dominada por ação de ondas. Sua configuração, praticamente retilínea, sem reentrâncias e irregularidades maiores, lhe confere um caráter aberto, exposto diretamente à ação de ondas de energia média a elevada (TAGLIANI, 2003). Dados obtidos por Motta (1963; 1969) mostram claramente que a ondulação dominante na área em estudo provém do quadrante sudeste.

A análise de cartas batimétricas ao longo da região costeira adjacente demonstra que a plataforma interna se caracteriza por distintas regiões, ocorrendo desde regiões de grande homogeneidade do relevo no litoral norte do Estado até regiões de complexa batimetria ao sul, marcadas pela presença de bancos e depressões submarinas (PIMENTA, 1999). Foram realizadas simulações de propagação das ondas na região correspondente à carta náutica nº 2100 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), que corresponde à região de Mostardas a Rio Grande, doravante chamada de Região B, delimitada entre as coordenadas $-52^{\circ}30'$ e $-49^{\circ}52'$ de longitude e $-32^{\circ}39'$ e $-31^{\circ}07'$ de latitude (Figura 4).

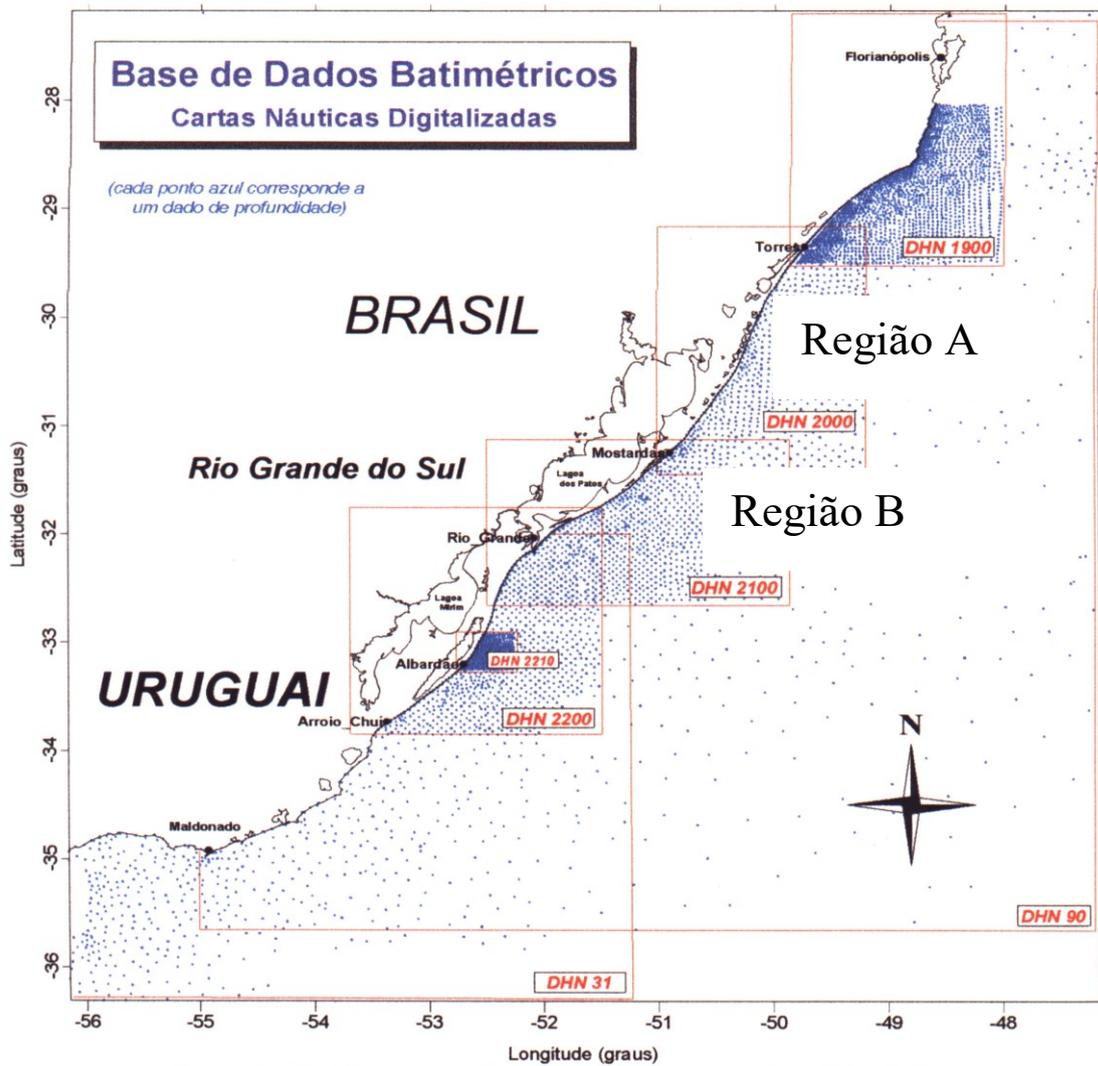
3.2. A Região B – Região compreendida entre Mostardas e Rio Grande

Essa região apresenta um complexo relevo submarino composto de grandes bancos arenosos lineares, afloramentos rochosos de arenitos de praia (*beachrocks*) e grandes depressões. Os bancos ocorrem na região central do Rio Grande do Sul entre a cidade do Rio Grande e o Farol da Conceição, representados pelo “Banco Minuano”, situado entre 20 e 15 m de profundidade e “Banco Capela” em uma região mais rasa até, aproximadamente, 10 m de profundidade.

O Parcel do Carpinteiro, um grande afloramento de *beachrocks*, também se situa nessa região, a cerca de 30 km a sudeste da Barra de Rio Grande, entre as profundidades de 20 a 15 m. A Figura 5 mostra os bancos e o Parcel da região. Um detalhe do Parcel do Carpinteiro, a partir da grade do SPRING, é apresentado na Figura 6.

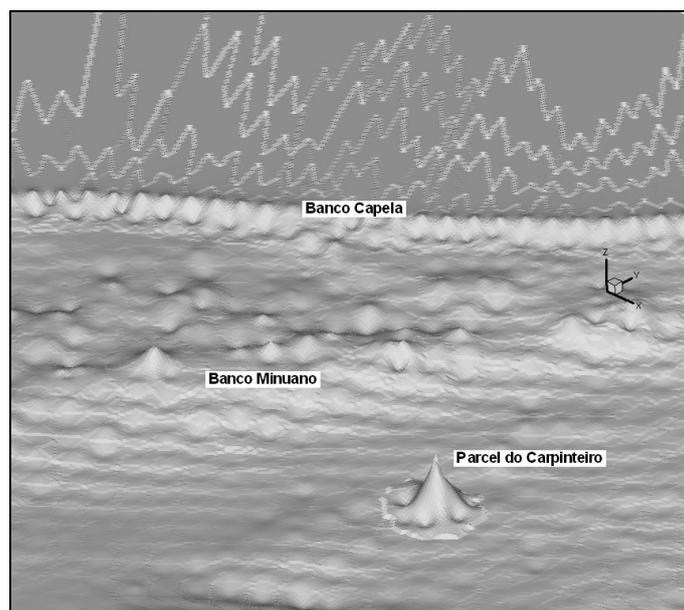
Este teste consistiu em analisar a propagação das ondas de período $T = 12$ s, altura $H_0 = 1$ m e um ângulo de incidência de 140° . Na grade gerada no SPRING, contendo informações da batimetria, há espaçamentos de 500×500 m, 342 linhas e 502 colunas. Esses espaçamentos são suficientes para a definição dos principais acidentes já citados do relevo do fundo. O método da média ponderada foi utilizado para a interpolação da batimetria dos pontos amostrados para a grade.

Figura 4 – Localização da região de estudo.



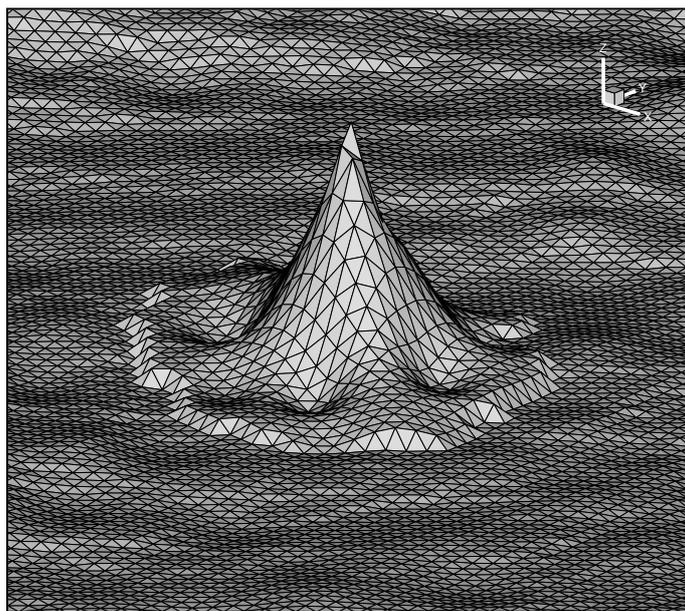
Fonte: Pimenta (1999).

Figura 5 – Banco Minuano, Banco Capela e Parcel do Carpinteiro.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 6 – Detalhe do Parcel do Carpinteiro.



Fonte: Elaboração do autor.

As grades geradas pelo programa SPRING_REFDIF possuem uma inclinação de 220° em relação ao sistema xy . Assim, a incidência da onda θ_0 é de 40° . São 8 grades com dimensão de aproximadamente 120 km ao longo do eixo y_r , o contorno inicial da primeira grade encontra-se em águas profundas.

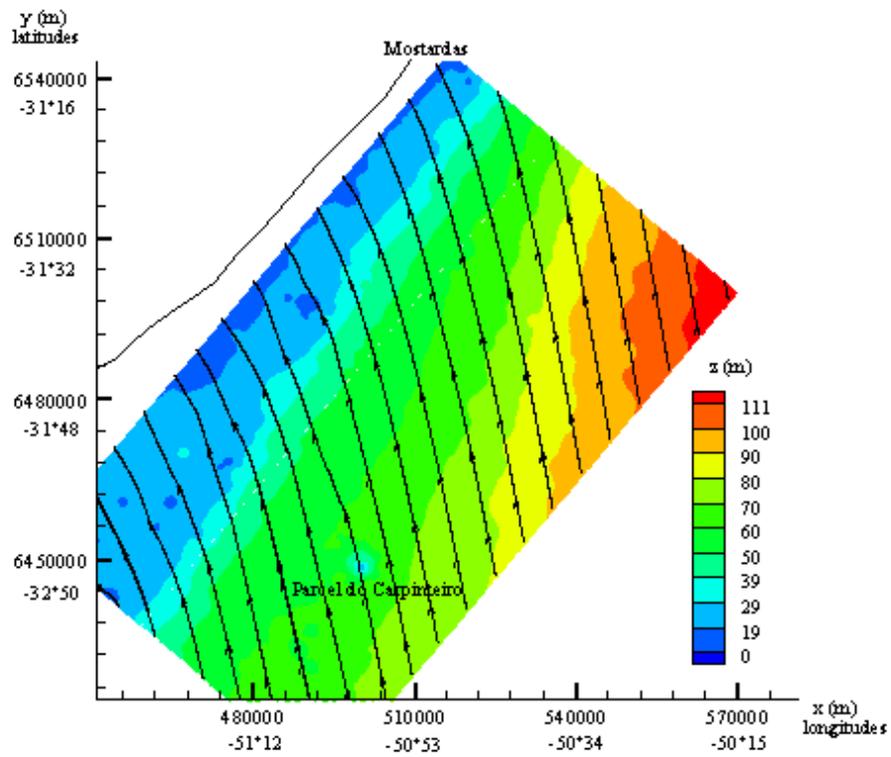
O Quadro 1 apresenta os parâmetros utilizados para calcular o espaçamento entre os pontos de cada grade. Na primeira linha da primeira grade, localizada em águas profundas, impõe-se as condições iniciais do problema, enquanto os contornos laterais não possuem reflexão.

Quadro 1 – Parâmetros das grades utilizadas na Região B.

Grades	Linhas \times Colunas	h_{min} (m)	L (m)	$dx_r = dy_r$ (m)	L/ dx_r (m)
1	500 \times 4000	63	218,10	30	7,3
2	500 \times 3990	53	213,32	30	7,1
3	500 \times 3980	37	197,84	30	6,6
4	500 \times 11930	25	174,54	10	17,5
5	500 \times 11920	21	163,20	10	16,3
6	500 \times 11910	17	149,42	10	14,9
7	500 \times 11900	15	141,43	10	14,1
8	500 \times 11890	14	137,11	10	13,7

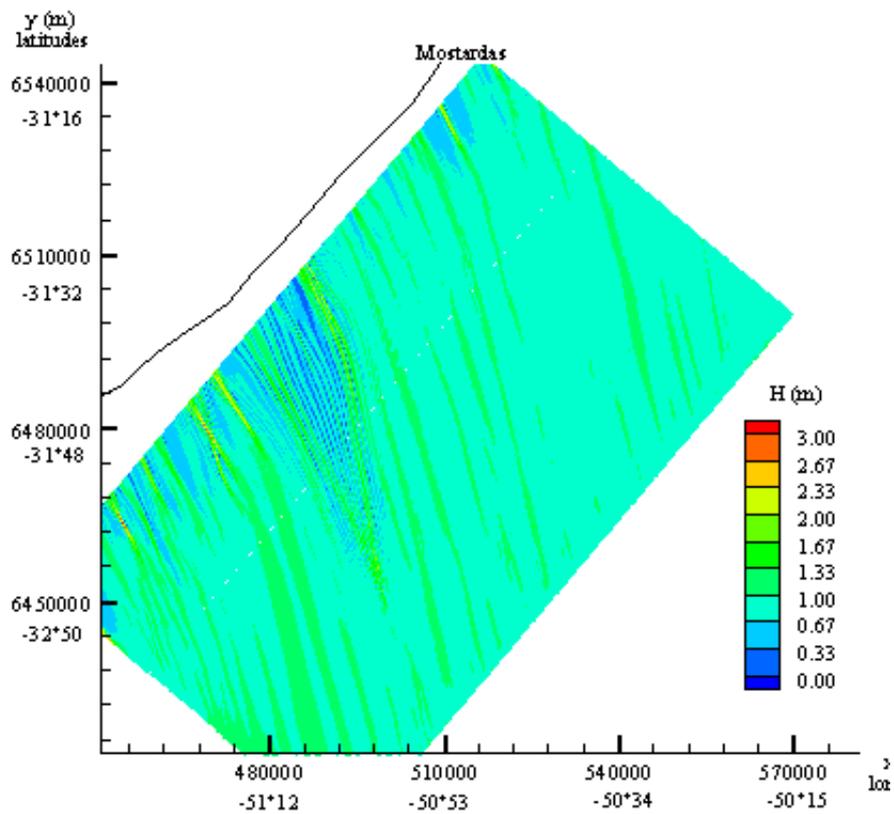
Os resultados indicam a ocorrência de focos de energia de ondas na região entre a Lagoa do Estreito e o Farol da Conceição, percebidos pela mudança no comportamento das linhas dos raios de onda. A presença dos bancos Minuano e Capela e do Parcel do Carpinteiro são determinantes no comportamento encontrado para as ondas. A distribuição dos raios de onda e alturas das ondas na Região B são mostrados nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Na Figura 9, apresentam-se detalhes dos raios de onda próximos ao Parcel do Carpinteiro.

Figura 7 – Raios de onda obtidos pelo REFDIF1.



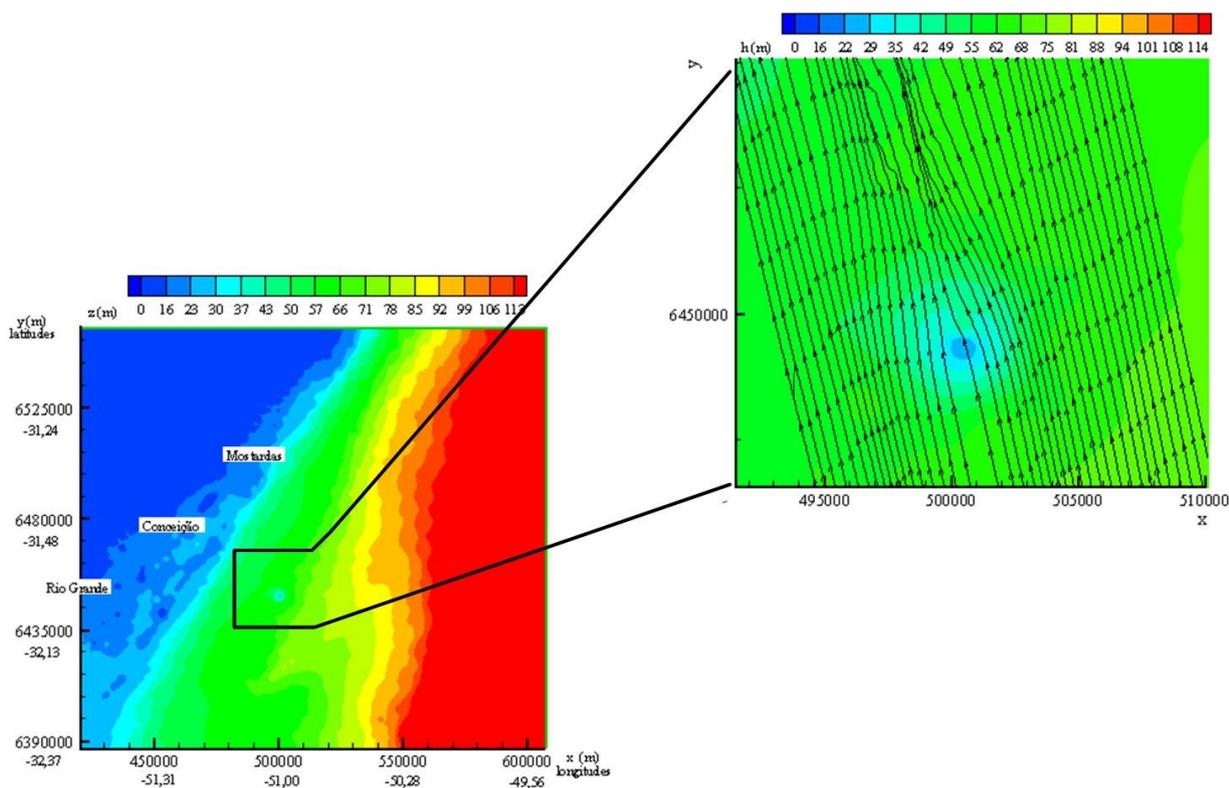
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 8 – Alturas da onda obtidas pelo REFDIF1.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 9 – Detalhes dos raios de onda próximos ao Parcel do Carpinteiro.



Fonte: Elaboração do autor.

4. Considerações finais

Neste trabalho, foram integrados programas de pré e pós-processamento para a simulação numérica de propagação de ondas em zonas costeiras. Os programas foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN90. O SPRING_REFDIF é responsável pela geração da grade requerida pelo programa de simulação de propagação de ondas REFDIF1(KIRBY; DALRYMPLE, 1994). O *software* também faz a interpolação da batimetria da grade do SPRING (SIG utilizado pelo presente trabalho como programa de pré-processamento) para a grade do REFDIF1.

O programa REFDIF_SPRING é responsável pela transformação das coordenadas da grade do REFDIF1 e pela formatação dos resultados de saída para ser acessado por uma ferramenta de visualização (Tecplot). A implementação dos programas SPRING_REFDIF e REFDIF_SPRING⁶ torna a simulação de propagação de ondas facilitada, diminuindo o tempo de análise desse tipo de problema, pois esses programas⁷ geram os pontos específicos de entrada para o REFDIF1.

Na Região B, os bancos Minuano e Capela e o Parcel do Carpinteiro influenciaram, fortemente, a propagação das ondas, conforme se percebe pelos raios de onda da Figura 9. Com o ângulo de incidência de 140° , obtiveram-se os resultados esperados, apresentando focos de

⁶ Os códigos podem ser disponibilizados aos leitores interessados.

⁷ Para cada malha, o tempo de execução foi reduzido em, pelo menos, 4 horas.

energia em algumas regiões. Percebeu-se a grande vantagem do modelo de refração-difração utilizado, que permitem resultados mais precisos que os modelos baseados na construção de raios de onda.

O pequeno espaçamento da grade utilizada proporciona uma análise mais detalhada dos fenômenos envolvidos. A utilização de um modelo de refração-difração na costa do Rio Grande do Sul pode fornecer informações importantes sobre as transformações das ondas em águas rasas e intermediárias nesta região, uma vez que as simulações realizadas até então empregavam o método da construção dos raios de onda, que consideram apenas os efeitos da refração.

A simulação numérica permite, inclusive, verificar os efeitos de cada acidente do relevo de fundo sobre a propagação de ondas. Na Região B, entre Mostardas e Rio Grande, pode-se realizar simulações com e sem a presença do Parcel do Carpinteiro, objetivando a análise da sua influência sobre as ondas que chegam à costa.

A escolha do SPRING deve-se ao fato de que essa ferramenta é utilizada tanto na fase de pré-processamento como na de pós-processamento. A possibilidade de visualização dos raios de onda e a riqueza de recursos de visualização implicaram também no uso do aplicativo Tecplot como ferramenta de pós-processamento, embora tenha a desvantagem de ser um programa comercial.

Referências

BERKHOFF, J. C. W. Computation of combined refraction-diffraction. **Proceedings of 13th Conference on Coastal Engineering**, Vancouver, Canada, v. 13, p. 471-490, 1972.

BETTES, P.; ZIENKIEWICZ O. C. Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 11, p. 1271-1290, 1977.

BOOIJ, M. **Gravity wave on water with non-uniform depth and current**. 1981. 131 f. (Tese de Doutorado) – Delft University, Delft, 1981.

BURROUGH, P. **Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.

CENTRO DE ESTUDOS E EXPERIMENTOS DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX). **Modelos parabólicos de propagação de ondas**. Ministério de Obras Públicas e de Transportes, Espanha, 1993.

DEAN, R.; DALRYMPLE, R. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

ECKART, C. The propagation of gravity waves from deep to shallow water. **National Bureau of Standards**, Circular 20, p.165-173, 1952.

HEDGES, T. S. An empirical modification to linear wave theory. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 61, p. 575-579, 1976.

HOUSTON, J. R. Combined refraction-diffraction of short waves using the finite elements method. **Applied Ocean Research**, v. 3, p. 163-170, 1981.

JONSON, I. G.; SKOVGAARD, O. A mild-slope wave equation and its application to tsunami calculations. **Mar Geodesy**, v. 2, p. 41-58, 1979.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. The propagation of weakly nonlinear waves in the presence of varying depth and currents. **Proceedings of 20th Congress Int. Assoc. Hydraulic Research 7**, Moscow, p. 198-202, 1983.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. **Coastal Engineering**, v. 9, p. 545-561, 1986.

KIRBY, J. T. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. **Coastal Engineering**, v. 10, p. 355-378, 1986.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. **Combined Refraction/Diffraction Model, REF/DIF 1**. Version 2.5. Documentation and User's Manual Center for Applied Coastal Research. Department of Civil Engineering. University of Delaware, Newark, University of Delaware 19716, 1994.

LIU, P. L. F. Wave transformation. In: LE MCHAUTE, B.; HANES, D. M. (Eds.). **The Sea, Ocean Engineering Science**. v. 9A. New York: J. Willey and Sons, p. 27-63, 1990.

LIU, P. L. F.; LOSADA, I. J. Wave propagation modeling in coastal engineering. **Journal of Hydraulic Research**, v. 40, n. 3, p. 229-240, 2002.

MOTTA, V. F. **Análise e previsão das alturas de ondas em Tramandaí (Relatório)**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1963.

MOTTA, V. F. **Relatório diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela Barra do Rio Grande**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1969.

PHILLIPS, O. M. **The dynamics of the upper ocean**. Cambridge University Press, 1966.

PIMENTA, F. M. **Caracterização dos regimes de refração de onda ao longo da Zona Costeira do Rio Grande do Sul**. 1999. 66 f. (Monografia de Graduação) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 1999.

RADDER, A. C. On the parabolic equation method for water-wave propagation. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 95, p. 159-176, 1979.

SZEWCZYK, S. B. O.; TEIXEIRA, P. R. de F.; SANTOS, M. A. V. dos. Ferramentas de pré e pós-processamento para propagação de ondas em zonas costeiras usando um SIG. **Vetor**, Rio Grande, v. 15, n. 2, p. 69-77, 2005.

TAGLIANI, C. **Conceitos cartográficos básicos**. Material didático da disciplina de Gestão Integrada de Zonas Costeiras com suporte de ferramentas SIG. Fundação Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2003.