

## HIDRONDA: UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE SIMULAÇÃO E PUBLICAÇÃO DO CAMPO DE ONDAS NA WEB

*Marcelo Marques<sup>1\*</sup>; Fernando O. de Andrade<sup>2</sup>; Elaine P. A. Vital<sup>1</sup>; Cristóvão V. S. Fernandes<sup>3</sup>; Tobias Bleninger<sup>3</sup>; Alexandre K. Guetter<sup>3</sup>*

**Resumo:** O HIDRONDA é um sistema automatizado para a simulação do campo de ondas em águas interiores. Permite a atualização periódica dos mapas gerados e disponibilizados na WEB. É aplicável a qualquer corpo de água continental. A simulação do campo de ondas é produzida por modelos paramétricos fortemente influenciados pelo contorno do corpo de água. O único forçante do modelo é a intensidade do vento. O modelo pode receber os dados de vento por acoplamento direto a redes de monitoramento, por dados recebido via email ou fornecidos pelo operador pela digitação direta via teclado. O resultado gerado pelo HIDRONDA em nível operacional pode ser acessado em <http://www.hidronda.com>

**Palavras-chave:** *onda, fetch, ondacad, reservatório*

### HIDRONDA: AN AUTOMATED SYSTEM FOR SIMULATION AND PUBLICATION OF WAVE FIELDS ON THE WEB

**Abstract:** HIDRONDA is an automated system for simulation of the wave field in continental waters. It allows periodic updating of the generated maps and their publication on the internet. The model is applicable to any continental body of water. The simulation of the wave field is performed by parametric models that are strongly influenced by the shape of the water body. The only input in the model is the intensity of the wind. The model can download the wind data by direct connection to the monitoring networks, and also receive data via email or input directly via keyboard. The results generated by a beta version of HIDRONDA can be accessed in <http://www.hidronda.com>

**Keywords:** wind wave, fetch, ondacad, reservoir

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Tecnologia, Área de Meio Ambiente, Campus de Umuarama, Paraná: \*[mmarques@uem.br](mailto:mmarques@uem.br)

<sup>2</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus de Toledo, Paraná

<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Curitiba, Paraná

## INTRODUÇÃO

O estudo de ondas tem por objetivo a obtenção de seus parâmetros característicos, tais como período, frequência, celeridade, comprimento e altura, sendo este último, ao longo da história, o alvo mais visado no interesse de previsões e estimativas pelos danos que provoca. Em lagos e reservatórios apresentam-se vários tipos de ondas como seiches, ondas internas, ondas antrópicas, ondas capilares e ondas progressivas geradas pela ação do vento, objeto deste estudo.

Estas ondas se desenvolvem sob a ação do vento no decorrer do tempo e ao longo da área de geração da onda. Esta área é representada pelo fetch. Existem vários modelos numéricos disponíveis para prever campo de ondas sob condições complexas de vento e batimetria.

Na simulação de ondas os resultados podem ser dirigidos de modo a determinar os elementos constituintes da onda (comprimento, amplitude, período, celeridade e frequência). Outra abordagem comum é dirigir a simulação de modo a determinar os efeitos que a propagação da onda provoca. Entre estes efeitos destacam-se a profundidade de mistura atingida e as tensões no fundo.

Entre os modelos numéricos existentes para prever o campo de altura de ondas em águas oceânicas estão o WAM (Komen, 1994), SWAN (Holthuijsen et al., 1999), WAVEWATCH (Tolman, 2009), ECMWF (Caires, 1996) e NSSM (Hsu, 2002), entre outros.

No caso de aplicação destes modelos computacionais a águas interiores, a julgar pelo sistema de monitoramento de ondas em lagos como os administrados pelo nos Grandes Lagos, entre o Canadá e os Estados Unidos, e pela quantidade de estudos publicados, não resta dúvida da qualidade dos resultados obtidos. Porém, considerando os aportes financeiros e de recursos humanos necessários para a concretização desta tarefa para os Grandes Lagos e pela grande quantidade de lagos distribuídos por todo o planeta, torna-se tarefa das mais difíceis estender a aplicação de modelos deste tipo a uma grande quantidade de corpos de água. Somente no Brasil são mais de 23 mil corpos de água com mais de 20 mil hectares, conforme Tabela 1.

**Tabela 1.-** Distribuição dos espelhos d'água com mais de 20 hectares por Estado do Brasil

UF	Quantidade	UF	Quantidade	UF	Quantidade
Acre	27	Maranhão	483	Rio de Janeiro	125
Alagoas	83	Minas Gerais	800	Rio Grande do Norte	669
Amazonas	5976	Mato Grosso do Sul	2297	Rondônia	230
Amapá	208	Mato Grosso	1827	Roraima	366
Bahia	1356	Pará	1290	Rio Grande do Sul	3009
Ceará	1353	Paraíba	444	Santa Catarina	81
Distrito Federal	10	Pernambuco	238	Sergipe	46
Espírito Santo	129	Piauí	318	São Paulo	370
Goiás	719	Paraná	106	Tocantins	477

Fonte: Melo et al. (2007)

Considerando a aplicabilidade em escala global, um sistema de simulação do campo de ondas para vários corpos de água exige um modelo computacional ágil em termos de tempo de processamento, que represente adequadamente o fenômeno de ondas, automatizado e versátil no que diz respeito à capacidade de obtenção de dados de vento por variados tipos de fontes. Necessita-se, portanto, de outro processo para se atingir resultado suficientemente satisfatório quando comparado, por exemplo, ao modelo SWAN.

O presente estudo apresenta o HIDRONDA, um sistema computacional para a simulação do campo de ondas.

## MOTIVAÇÃO

Uma parcela significativa da população mundial vive em áreas próximas a baías, lagos e reservatórios. Historicamente, estes sistemas naturais vêm sendo desenvolvidos e manipulados sem a devida consideração aos impactos gerados. O vento constitui-se no forçante de maior influência no processo de circulação hidrodinâmica e na formação de ondas.

A ação de ondas progressivas geradas pela ação do vento em águas interiores é um fenômeno de alcance global e afeta atividades e áreas de estudo como: (1) Transporte de sedimentos e erodibilidade de margens; (2) Dimensionamento da crista de barragens; (3) Segurança do transporte aquaviário; (4) Estudos de implantação de fazendas aquícolas; (5) Transferência de gases de efeito estufa; (6) Operação hidráulica de reservatórios; (7) Estudos de ecossistemas aquáticos continentais.

## MODELAGEM GEOMÉTRICA

A concepção do sistema baseia-se na hipótese de que, em águas continentais, um modelo paramétrico de base geométrica pode gerar resultados tão bons quanto um modelo numérico de base física. Esta afirmação está sendo validada por um estudo paralelo a este. É necessário, no entanto, considerar que esta simplificação é somente válida para as seguintes condições: (1) o vento incidente deve possuir duração suficiente para gerar um campo de ondas completamente desenvolvido; (2) o campo de vento ser uniforme; (3) o ponto considerado esteja em condição de águas profundas (Marques et al. 2013).

Uma comparação entre modelos paramétricos e modelos de base física é feita pela Tabela 2.

Tabela 2 Comparação entre características entre um modelo paramétrico e um modelo numérico

Comparação	Tempo de processamento	Complexidade na formulação	Resultados 2D	Quantidade de informações de entrada	Precisão	Dificuldade de aplicação
Paramétrico	Baixo*	Baixa*	Não	Pouco*	Baixa	Baixa*
Numérico	Alto	Alta	Sim*	Muito	Alta*	Alta

(\*) características ideais em um modelo de simulação de ondas

Pela tabela anterior nota-se que, caso o modelo paramétrico fosse capaz de gerar resultados bidimensionais e caso tivesse sua precisão aumentada, se tornaria mais vantajoso do que a utilização de modelos numéricos.

Uma equação paramétrica para a previsão da altura da onda (H) possui uma topologia característica. Nela o termo adimensional de fetch ( $gF/U^2$ ) relaciona-se ao termo adimensional de altura de onda ( $gH/U^2$ ) por meio dos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ , onde  $g$  é a aceleração gravitacional e  $U$  a intensidade do vento, conforme a seguinte estrutura:

$$(gH/U^2) = \alpha (gF/U^2)^\beta \quad [1]$$

Esta equação é aplicada diretamente pelo projetista de modo pontual sobre a representação do corpo de água analisado, geralmente um mapa ou uma imagem de satélite.

Tornar o modelo paramétrico bidimensional implicaria em tornar bidimensionais as duas variáveis mais importantes em uma equação paramétrica, a intensidade do vento e a extensão do fetch. A solução para o vento foi assumir que o corpo de água está sujeito a um campo de vento uniforme e quantificar os impactos desta decisão. Em breve, no entanto, será possível a inserção de campo não permanente de ventos, conforme resultados de Marques & Guetter (2011) e Marques et al. (2012).

Quanto ao fetch, este foi tornado bidimensional através da discretização da superfície do corpo de água de modo a definir o fetch em todos os nós da malha gerada. Esta técnica vem sendo aprimorada nos últimos anos pelos trabalhos de Marques & Guetter (2011a), Marques et al. (2012).

No entanto, tornar a variável “fetch” bidimensional não significa necessariamente que haverá uma boa correlação entre o campo de fetch e o campo de ondas gerado. Isto porque existem diversos métodos de determinação do fetch, gerando isolinhas que assumem posições distintas de acordo com o método adotado. A Figura 1 ilustra a distribuição do fetch feita por três métodos distintos, conforme Marques et al. (2012).

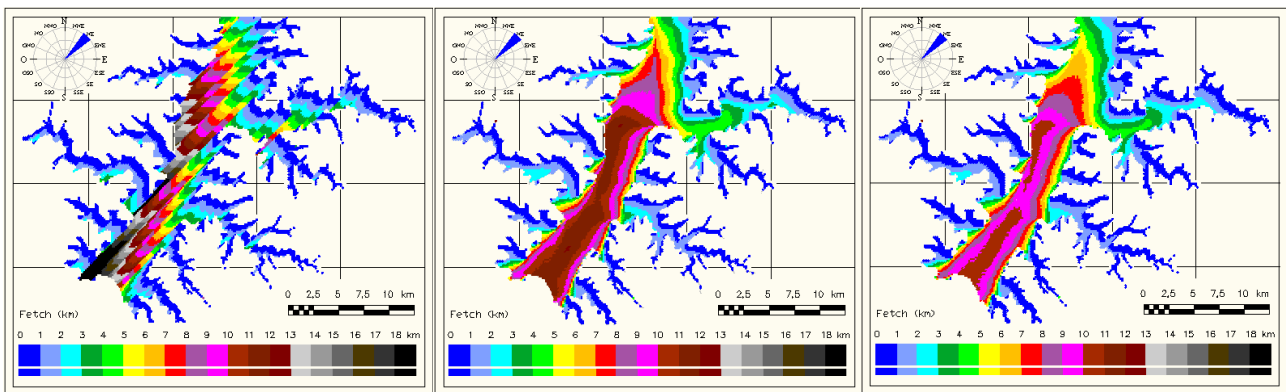


Figura 1 Campo de fetch no reservatório de Itaipu para vento NE mediante a aplicação de diferentes métodos

As imagens da figura anterior referem-se respectivamente ao método oceânico, ao método de Saville (Saville, 1954) e ao método de Saville modificado (Smith, 1991), conforme Marques *et al.* (2012). A aplicação do método oceânico gerou isolinhas que acompanharam o formato da margem a barlavento. Logo, as mesmas discontinuidades verificadas na conformação da margem foram transmitidas ao campo de fetch, inviabilizando assumir o campo de fetch gerado como semelhante ao campo de onda.

Já os resultados gerados pelo método de Saville e pelo Método de Saville modificado geraram isolinhas semelhantes (Marques *et al.*, 2012). Devido à maior difusão do método de Saville no meio técnico, decidiu-se por adotar este método na determinação do fetch.

Uma comparação entre o campo de ondas pelo modelo numérico SWAN e o campo de fetch gerado pelo modelo ONDACAD para o reservatório de Salto Caxias, é feita pela Figura 2.

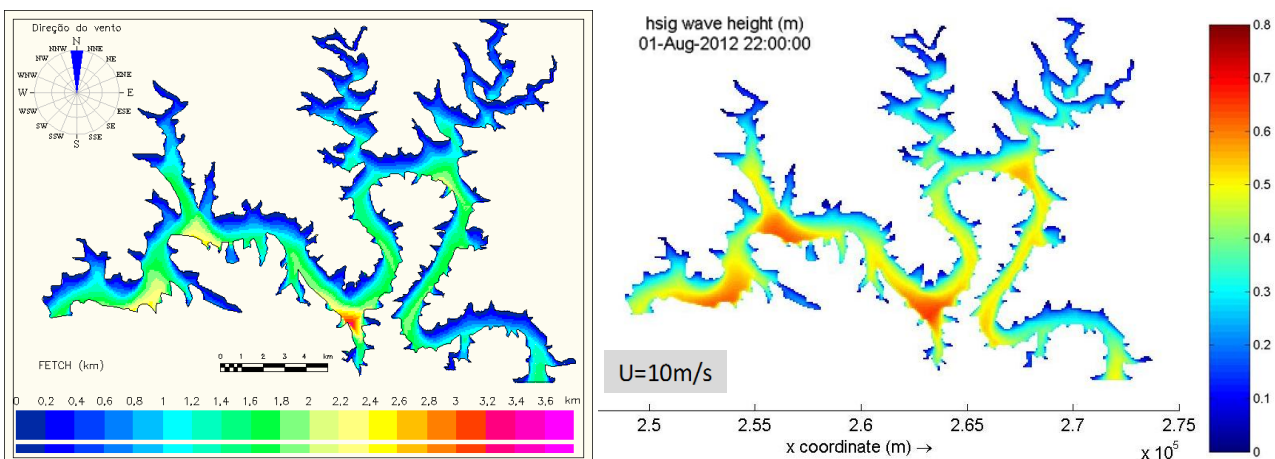


Figura 2 Distribuição do fetch (esquerda) pelo modelo ONDACAD e campo de onda pelo modelo SWAN para vento norte de intensidade de 10m/s

Nas imagens da figura anterior, a ocorrência dos pontos máximos se dá nas mesmas localizações geográficas é um importante indício de que, através do campo de fetch gerado pelo método de Saville é possível uma correlação com o campo de ondas mediante a determinação de uma equação paramétrica a ser determinada.

Com vistas a eliminar a influência de fatores como a dendriticidade e a sinuosidade do corpo de água, quatro corpos de água foram escolhidos e determinada a dimensão dos prismas equivalentes (Marques et al., 2013). Foram modelados os seguintes corpos de água: (1) o reservatório de Vossoroca localizado no estado do Paraná, distante pouco mais de 50 km de Curitiba; (2) o reservatório de Molinos, na Argentina; (3) o reservatório de Itaipu, no rio Paraná; (4) o lago Michigan, entre o Canadá e os Estados Unidos, conforme Figura 3.

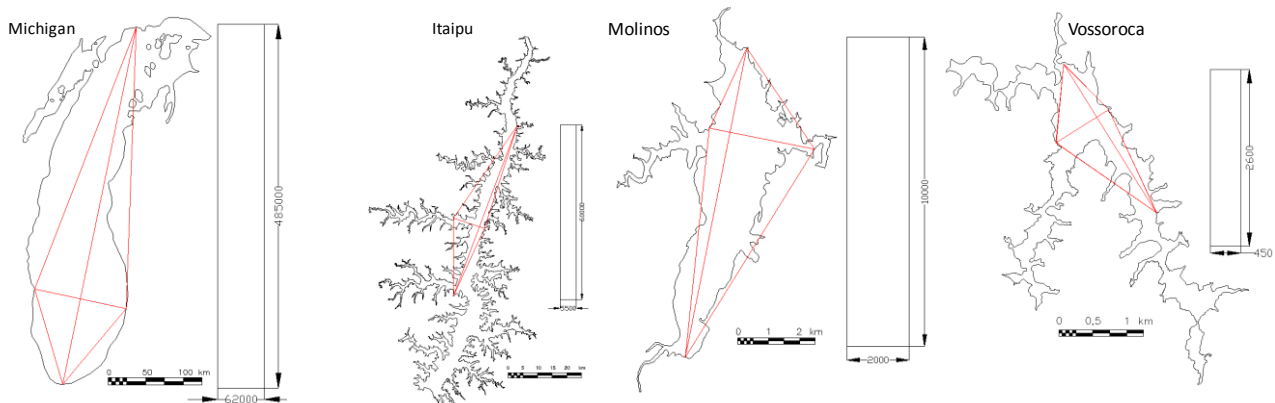


Figura 3 Contornos da margem obtido por imagem de satélite e dimensões do prisma equivalente

Com base na correlação entre os resultados obtidos do campo de fetch e do campo de ondas para intensidades do vento de 5, 10, 15 e 20 m/s foram determinados os coeficientes variáveis da equação [1]:

$$\alpha = 0,09778 * e^{-U/2,35503} + 0,0028 \quad [2]$$

$$\beta = 0,51148 - (0,66223 * 0,84304^U) \quad [3]$$

A equação encontra-se em estágio de validação pela comparação com os resultados do modelo SWAN.

Pelo HIDRONDA o campo de ondas é determinado por uma combinação entre o campo de vento e a distribuição do fetch mediante a aplicação das equações [1], [2] e [3].

## ESTRUTURAÇÃO DO HIDRONDA

O sistema é composto por dois núcleos: o núcleo numérico e o núcleo de gerenciamento de dados conforme Figura 4. Pelas atividades integradas entre os núcleos são processadas, de modo automatizado, a recepção dos dados de vento, o processamento e a geração de resultados gráficos resultando na publicação na WEB de mapas temáticos de campo de onda.

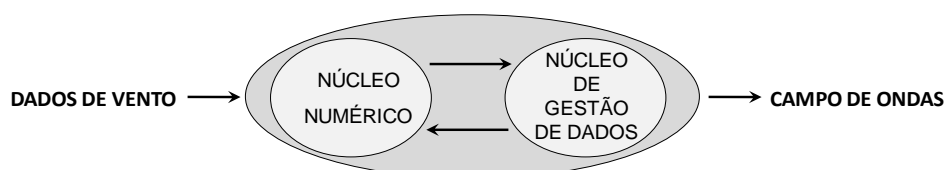


Figura 4 Núcleos do sistema

Ambos os núcleos são concebidos em linguagem computacional LISP e a interface com o usuário é feita em linguagem DCL. Devido às suas características de programação recursiva e manipulação de estruturas de dados genéricos, o LISP tornou-se a linguagem de programação padrão no desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial.

O LISP em ambiente CAD manipula objetos dentre os quais os mais comuns são pontos e linhas. A partir destas entidades fundamentais são geradas estruturas mais complexas como malhas, curvas, planos e volumes. No desenvolvimento das soluções apresentadas pelo presente estudo uma linguagem de programação que permitisse uma abordagem geométrica é essencial. A capacidade em manipular entidades geométricas se mostrou oportuna em tarefas como o traçado das radiais traçadas pelo método de Saville. No entanto foi necessário solucionar questões como a definição da dinâmica com vistas a percorrer os nós da malha. Especificamente neste caso o desafio foi agravado pelo formato irregular das margens que circunscreve os espelhos d'água. As margens, por exemplo, são tratadas como uma única entidade. O êxito de alguns núcleos do HIDRONDA depende da manipulação adequada desta entidade como, por exemplo, nas ações de reconhecimento de ilhas e na alternância automatizada entre mapas de diferentes locais de modo a permitir a publicação na WEB.

## **NÚCLEO NUMÉRICO**

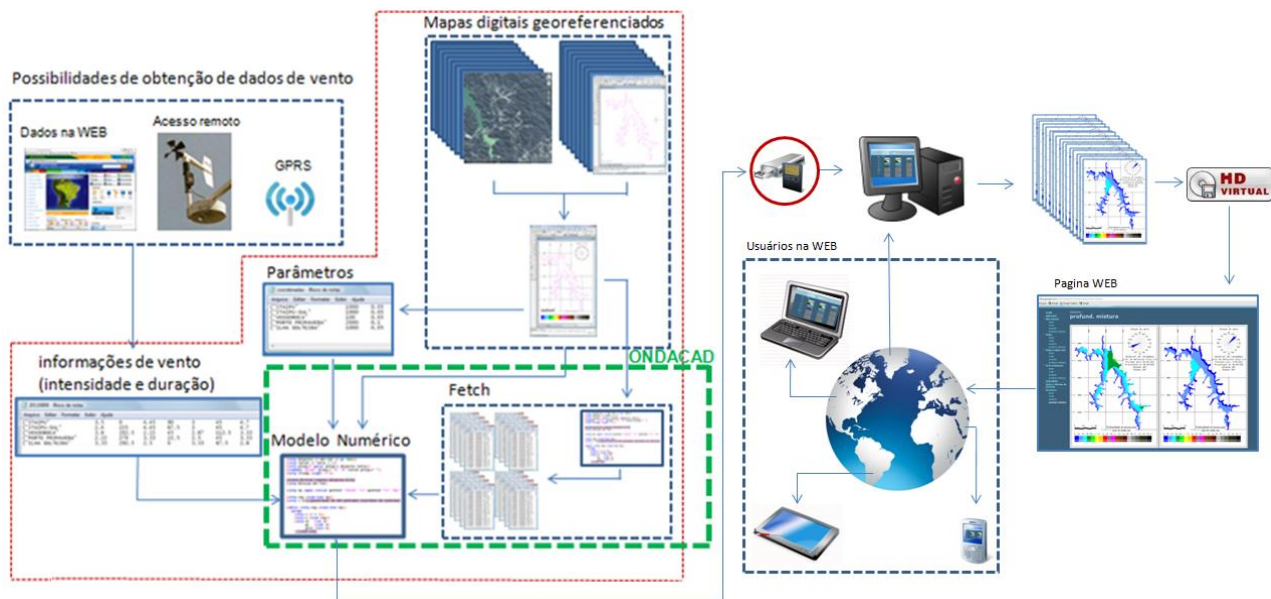
Este núcleo consiste em um modelo computacional denominado ONDACAD. O desenvolvimento partiu dos conceitos concebidos por Marques (2005) e vem sendo aperfeiçoado desde então. Na concepção do ONDACAD, algumas condições são admitidas na determinação do campo de ondas. Supõem-se (i) campo de ventos uniforme; (ii) ondas em águas profundas, desprezando o efeito devido à refração das ondas; (iii) mínimos efeitos devidos a reflexão das ondas, o que significa absorção total da energia das ondas pelas margens. O sistema despreza ainda o efeito do relevo no entorno do reservatório sobre os ventos e as condições de batimetria pela hipótese de ondas em águas profundas. O núcleo numérico pode ser executado isoladamente do sistema HIDRONDA.

O núcleo numérico permite a obtenção pelo HIDRONDA, de mapas temáticos diretamente sobre imagens de satélite georeferenciadas a considerar o efeito das ilhas sobre o campo de ondas.

## **NÚCLEO DE GERENCIAMENTO DE DADOS**

Este núcleo permite a gestão dos vários tipos de arquivos gerados de modo a inter-relacioná-los de forma automatizada. Os arquivos podem ser classificados em três grandes grupos: (1) arquivos do modelo ONDACAD: constituem-se em imagens de satélite, arquivos de representação por entidades gráficas dos corpos de água georeferenciados e as rotinas de programação que constituem o núcleo numérico, em formato DWG ou *Drawing Exchange Format* (DXF); (2) arquivos de parametrização: constituídos pelos arquivos em formato ascii nos quais são registrados dados relativos às parametrizações dos mapas temáticos bem como pontos e valores de referência que permitem a alternância automatizada do processamento, a execução da legenda cromática de forma dinâmica e a publicação simultânea na WEB; (3) Arquivos de alimentação: constituem-se em arquivos em formato ascii, os quais contém a intensidade do vento e a direção para cada localidade de interesse no horário de referência, independentemente da origem do dado de vento: se proveniente de redes consolidadas, obtidos em tempo real por anemômetros “*in situ*”, por recursos de “*web mining*” ou recebidos por email.

A estrutura do sistema é esquematizada na Figura 5.



**Figura 5.-** Conformação esquemática do Sistema HIDRONDA

O sistema permite que as estações de trabalho sejam interligadas em paralelo. Utilizando-se malhas estruturadas retangulares de 15000 nós para cada corpo de água, um computador com processador da classe core duo com 2GB de memória RAM acoplado ao Sistema processa cada imagem do campo de ondas em cerca e 30 segundos, possibilitando em um caso limite, uma frequência horária de execução de aproximadamente 120 reservatórios.

As informações de vento são interpretadas diretamente em um arquivo de texto. O arquivo pode ser digitado manualmente ou gerado de modo automatizado. O arquivo pode ser lido diretamente em dispositivos portáteis de memória ou obtidos diretamente da caixa postal (caso de envio por email) ou ainda pela utilização de discos virtuais.

Os resultados desse estudo integram um projeto mais amplo, no qual estão previstas as realizações de campanhas longas de medição de vento e ondas de modo a validar a equação paramétrica utilizada.

## RESULTADOS

O Sistema HIDRONDA permite a geração de mapas temáticos de campo de ondas em uma resolução temporal máxima de 30 segundos com o equipamento disponível. O sistema conta atualmente com 24 corpos de água implantados. Os resultados gerados pelo HIDRONDA em nível operacional podem ser visualizados pelo endereço eletrônico <http://www.hidronda.com>.

## CONCLUSÕES

A constatação de que um modelo de base geométrica possa gerar resultados tão bons quanto um modelo numérico de base física, desde que respeitadas as condições de águas profundas e campo de vento uniforme, se comprovada, pode devolver às equações paramétricas a importância que tiveram até o advento dos modelos computacionais de base física. O sistema de simulação de altura de ondas para águas continentais, aqui apresentado, foi concebido com base neste conceito de modelagem geométrica. As características do sistema como (1) rapidez de processamento; (2) capacidade de detecção de ilhas; (3) possibilidade de geração diretamente sobre imagens (satélite, GoogleEarth); foram possíveis pela versatilidade da linguagem LISP em plataforma CAD. Estes

instrumentos tornaram possível a concepção e a operacionalização do sistema com base nestes conceitos geométricos.

Uma parcela significativa da população mundial vive em áreas próximas a lagos, reservatórios artificiais, mares interiores e estuários. Além do mais, considerando a matriz energética nacional fortemente dependente da energia hidrelétrica e dos mais de 23.000 corpos de água com mais de 10 hectares espalhados pelo país, o sistema HIDRONDA, através da difusão de imagens na WEB, poderá contribuir para uma melhor compreensão destes corpos de água pela ação de ondas geradas pelo vento.

## **AGRADECIMENTOS**

À CAPES e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná pelo financiamento da bolsa de doutorado; à Universidade Estadual de Maringá pela licença para estudos do primeiro autor; à CAPES pela bolsa de Pós-doutorado do segundo autor; ao Núcleo de Pesquisa em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (NUPEHIDRO).

## **REFERÊNCIAS**

- CAIRES, S., STERL, A., BURGERS, G., KOMEN G., (1996) , Forty-year European Re-Analysis of the Global Atmosphere; Ocean wave product validation and analysis (ERA-40). J. Atmos. Oceanic Technol., 13, 198-230.
- HOLTHUIJSEN L. H., BOOIJ N., RIS R.C., HAAGSMA I. J. G., KIEFTENBURG A. T. M. M., KRIEZI E. E., (1999), SWAN Cycle III version 40.11, User manual. Delft University of Technology, p. 124.
- HSU, L. Y., METTLACH R. T., EARLE D. M., (2002). Validation Test Report for the Navy Standard Surf Model. Naval Research Lab Stennis Space Center Ocean Dynamics and Prediction Branch. Ft. Belvoir Defense Technical Information Center .
- KOMEN, G., CAVALERI L., DONELAN M., HASSELMAN, K, HASSELMAN S., JANSEN P. A. E. M (1994). Dynamics and Modeling of Ocean Waves. Combridge University Press, 522 p.
- MARQUES, M. GUETTER, A. K. (2011). Estimativa com modelo paramétrico dos campos de ondas geradas por ventos severos no reservatório de Itaipu In: *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió/AL, Brasil, Nov/2011.
- MARQUES, M.; ANDRADE, F. O. DE; VITAL, E. P. A.; GUETTER, A. K. (2013). Método Rápido para a Determinação do Fetch Máximo. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves/RS, Brasil, Nov/2013.
- MARQUES, M.; ANDRADE, F. O. DE; VITAL, E. P.; GUETTER, A. K.; (2012) Representação automatizada do campo de ventos sobre corpos de água no estado do Paraná. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012, Gramado, RS, 2012.
- MARQUES, M.; GUETTER, A. K. (2012) Determinação da distribuição do fetch e do campo de ondas sob condições de ventos extremos no reservatório de Itaipu. Revista Técnica do Instituto de Engenharia do Paraná, v. I, p. 37-51, 2012.
- MARQUES, M.; GUETTER, A. K.; MANNICH, M.; FERNANDEZ, R. L. . (2012) Estudo comparativo da distribuição do fetch em reservatórios. In: XXV Congresso Latino-americano de Hidráulica, 2012, San José. Anais do XXV Congresso Latino-americano de Hidráulica, 2012.



MELO, M. S. ; CARVALHO, M. S. B. S. ; SOAREAS, A. M. L. ; BARRETO R. N. C., (2007) Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, PP. 969-976. Abril 2007.

SAVILLE, T. (1954). The effect of fetch width on wave generation. J. Tech. Mem., Washington, D.C, n. 70.

SMITH, J.M . (1991), Wind-wave generation on restricted Fetches. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Misc. Paper CERC-91-2, 25pp

TOLMAN, H. L., (2009) User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.