

# PROPOSTA DE DOIS SIMULADORES DE ONDAS GERADAS POR VENTO EM ÁGUAS RESTRITAS: SWAN E ONDISACAD

*Adriana S. Vieira<sup>1</sup>; Geraldo F. Maciel<sup>2</sup>; Conceição J.E.M. Fortes<sup>3</sup>; e Carlos R. Minussi<sup>1</sup>*

*Luiz R. Trovati; Milton D. Sobrinho; Vinícius S. Morais; Evandro C. Fernandes; Gustavo B. Lima e Eduardo B. Oliveira<sup>4</sup>*

**Resumo:** O modelo SWAN - acrônimo de Simulating Waves Nearshore - é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da ação de onda. Entre os vários resultados obtidos pelo SWAN, destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direções de pico e média, a dispersão direccional, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional. Para os propósitos aqui expostos, mais um aplicativo computacional foi utilizado para a previsão de ondas e estruturado de maneira que pudesse fornecer resultados gráficos de forma automatizada com maior precisão e no menor tempo possível. O software, fruto do desenvolvimento dos estudos da equipe de pesquisa e mais recentemente aprimorado no presente trabalho, batizado de OndisaCAD, integra-se dentro de ambientes CADs, precisamente no AutoCAD da Autodesk, possibilitando, assim, a geração de ótimas interfaces e resultados gráficos. Nesta comunicação apresentam-se a simulação da propagação de ondas em recintos restritos utilizando-se dois simuladores: OndisaCad e Swan na zona confinada, o lago da barragem de Ilha Solteira, Brasil. Pretende-se assim discutir as vantagens e desvantagens destes simuladores.

**Palavras-chave:** OndisaCad, Swan, Ilha Solteira

**Abstract:** The SWAN model - Simulating Waves Nearshore acronym - is a numerical modeling for generation, propagation and dissipation of sea waves, based on the equation for the wave action conservation. Among the various results obtained by SWAN, we highlight the significant height, the peak and average period, peak direction and average, directional dispersion, the bandwidth's parameter and level of water in any part of the computational domain. For the purposes here presented, another software was used for predicting waves, structured in a way that the results could provide automated graphic results more accurately and as quick as possible. The software, result of the development of the research team studies and more recently improved in this work, called OndisaCAD, integrated into CADs environments, precisely in Autodesk AutoCAD, thus enabling the generation of great interfaces and graphical results. In this article, we present the simulation of wave propagation in confined enclosures using two simulators: OndisaCAD and Swan in the enclosure, the dam lake of Ilha Solteira, northwest of São Paulo state. So, the main objective is to discuss the advantages and disadvantages of these simulators.

**Keyword:** OndisaCad, Swan, Ilha Solteira

---

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 15385-000 Av. Brasil, 54, Brasil, e-mail: adriana.ilha@gmail.com, minussi@dec.feis.unesp.br

<sup>2</sup>Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 15385-000 Av. Brasil, 54, Brasil, e-mail: maciel@dec.feis.unesp.br

<sup>3</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, Lisboa, e-mail: jfortes@lnec.pt

<sup>4</sup>Integrantes do Projeto ONDISA, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 15385-000 Av. Brasil, 54, Brasil, e-mail: trovati@dfq.feis.unesp.br (coordenador do Ondisa na Finep)

## MOTIVAÇÃO

Os reservatórios do oeste Paulista são reservatórios de barragens de usos múltiplos e que fazem parte de segmentos de hidrovias, além de fazerem parte de complexos de navegação e rotas comerciais. Os efeitos produzidos pelo vento são associados à geração de ondas. Há necessidade de metodologias de previsão e monitoramento de ondas para fins de segurança à navegação, proteção de margens e eventuais áreas de abrigo.

Há interesse no estudo dos efeitos das ondas devido à localização da barragem da UHE de Ilha Solteira. Acidentes, já ocorridos na hidrovia Tietê-Paraná, evidenciam a importância de se conhecer o fenômeno.

Dentro de um contexto de aplicabilidade em engenharia, mapas de alturas de ondas foram determinados, visando identificar pontos críticos à navegação, zonas críticas e eventuais áreas de abrigo. Através de um sistema de previsão de ondas em tempo real, os simuladores ou aplicativos contribuirão para fornecer informações de apoio e segurança à navegação.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos numéricos de propagação de ondas em zonas costeiras e portuárias têm-se apresentado como uma excelente alternativa para a determinação do clima de ondas em regiões carentes desse tipo de informações. São assim utilizados para transferir as características da onda (alturas, direção e período) do largo ou de um local na costa onde sejam conhecidos para o local de interesse de estudo. Dependendo da complexidade do modelo numérico, estes podem incluir diferentes fenômenos que afetam a propagação das ondas em zonas costeiras, tais como, a refração, a difração, a reflexão, a rebentação de ondas, efeitos não lineares e interação onda-corrente.

Um exemplo deste tipo de modelo de geração e propagação de ondas é o modelo *SWAN* (SWAN. 2006). O modelo *SWAN* é utilizado para obter estimativas do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, podendo utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por outros modelos. Foi desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft), Holanda, e é um modelo numérico de terceira geração que permite obter parâmetros característicos da agitação marítima desde águas profundas a águas pouco profundas. É baseado na equação de balanço espectral da ação de onda, e surgiu da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais em águas profundas. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direcional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras, considerando vários fenômenos intervenientes na

propagação de ondas - refração, rebentação difração (de forma aproximada), geração de harmônicas (interação não-linear entre ondas) - é considerado adequado para grandes áreas costeiras (dezenas de quilômetros). É de domínio público e está disponível a qualquer utilizador.

Uma das grandes vantagens do modelo *SWAN* é a sua versatilidade: pode ser aplicado a grandes zonas costeiras abertas ou pode ser aplicado a zonas confinadas (como estuários ou reservatórios de barragens) e em ambos os casos a forçante do problema pode ser efetuado por ventos, ondas e/ou correntes. Em ambas as situações, o modelo efetua a geração e/ou propagação dessas ondas desde o largo até à zona costeira/portuária ou no interior do estuário até à sua rebentação nas suas fronteiras (praias, arribas).

De qualquer forma, a aplicação do *SWAN* envolve o estabelecimento das características das malhas computacionais, das condições de fronteira e de um conjunto de parâmetros, os quais têm de ser calibrados para cada caso de estudo. É, pois, interessante a aplicação do modelo em situações para as quais existam dados de medição que permitam fazer essa calibração, e avaliar o desempenho do modelo.

Outro simulador de previsão de ondas através do vento é aquele desenvolvido na FEIS/Unesp o OndisaCad que teve como precursor o trabalho de Marques (2005), e desde então tem sido aprimorado, e atualmente, este trabalho contempla a sua terceira versão.

O tratamento dos dados de vento, a determinação das pistas e a respectiva estimativa da altura de onda sugerem, do ponto de vista da exequibilidade dos objetivos, a adoção de uma linguagem computacional que disponha de uma variedade suficiente de recursos de manipulação de estruturas de dados genéricos (numéricos e alfanuméricos) aliada a uma imprescindível interface gráfica.

A linguagem de programação eleita mais adequada foi a linguagem LISP. O LISP é uma linguagem de programação científica, criada durante a década de 1950, nos Estados Unidos, mais especificamente no MIT (Massachusetts Institute of Technology). Devido as suas características de programação recursiva e manipulação de estruturas de dados genéricas, o LISP tornou-se a linguagem de programação padrão no desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial.

Assim exposto, neste trabalho se efetua a aplicação do modelo *SWAN* e do modelo OndisaCad na zona confinada do lago de Ilha Solteira, situada no estado de São Paulo, Brasil. Neste caso, o modelo foi utilizado para estudar a agitação gerada pelo vento no lago de Ilha Solteira considerando um conjunto de dados de vento disponíveis nessa zona e que cobrem um período com seis meses de duração. Pretende-se assim discutir as vantagens e desvantagens destes simuladores, aplicativos ou modelos.

## 2. MODELO SWAN

### 2.1. Descrição geral

O modelo *SWAN* propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refração, difração e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona em estudo, descrita por uma malha retangular, é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da ação de ondas. Esta representação permite a aplicação em áreas onde o crescimento de ondas pela ação do vento seja notável ou onde estados de mar prévios, ou mesmo ondulação, estejam presentes. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas.

### 2.2. Equação base

A modelação da propagação das ondas em zonas costeiras utilizando o *SWAN*, baseia-se na evolução da densidade de ação  $N(\bar{x}, t, \sigma, \theta)$ , no espaço  $\bar{x}$  e no tempo. Define-se a densidade de ação  $N(\bar{x}, t, \sigma, \theta)$ , no espaço  $\bar{x}$  e no tempo através da seguinte equação:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1)$$

em que  $\sigma$  é a frequência relativa e  $\theta$  representa a direção da onda.

A equação do balanço da ação da onda (equação base do *SWAN*), definida para coordenadas cartesianas, é expressa por:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \quad (2)$$

em que as quantidades  $c_{\theta}$  e  $c_{\sigma}$  representam as velocidades de propagação no espaço espectral.

Os termos presentes no lado esquerdo da igualdade referem-se à parte cinemática da equação. O primeiro termo representa a taxa de variação local da densidade de ação no tempo, o segundo e terceiro representam a propagação da ação da onda no espaço geográfico (com

velocidades de propagação  $c_{gx}, c_{gy}$ ), o quarto termo a refração induzida pelas correntes e variação de profundidade e finalmente o quinto define a alteração da frequência relativa devido a variações na profundidade e nas correntes. Este último é nulo na ausência de correntes.

O termo presente no lado direito da equação,  $S(\sigma, \theta)$ , (Equação (3)), engloba todos os termos fontes ou sumidouros associados aos fenômenos físicos que geram, dissipam ou redistribuem a energia da onda.  $S(\sigma, \theta)$  pode ser subdividido na geração de energia devido ao vento  $S_{in}(\sigma, \theta)$ , nas interações não lineares  $S_{nl}(\sigma, \theta)$  e na dissipação da energia  $S_{diss}(\sigma, \theta)$ .

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta) \quad (3)$$

O termo  $S_{diss}(\sigma, \theta)$  engloba ainda três fenômenos: o atrito do fundo  $S_{dissb}(\sigma, \theta)$ , a rebentação induzida pela diminuição da profundidade  $S_{dissby}(\sigma, \theta)$  e a rebentação parcial  $S_{dissw}(\sigma, \theta)$ .

No modelo *SWAN* a equação de balanço espectral (Equação (1)) é integrada através de esquemas numéricos implícitos, pelo método de diferenças finitas, no tempo, espaço geográfico e espaço espectral. O tempo é discretizado, com um intervalo de tempo  $\Delta t$  constante, para integrar, simultaneamente os termos relativos à propagação das ondas e os termos fonte  $S(\sigma, \theta)$ .

O espaço geográfico é descrito por uma malha retangular definida por células  $\Delta x$  e  $\Delta y$  constantes nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente. O espaço espectral é discretizado através de uma resolução, constante, direcional  $\Delta\theta$  e de frequência relativa  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ . De modo a obter uma solução mais econômica, é possível, no *SWAN*, limitar os valores das direções relativas à origem das componentes das ondas.

### 2.3. Entrada de dados e resultados

Os dados necessários para a execução do *SWAN* são o arquivo da batimetria da zona a modelar e um arquivo de entrada que define os parâmetros de cálculo do modelo. Estes estão relacionados com as condições de fronteira, a definição do domínio geográfico, espectral e temporal, caso se introduza a não estacionariedade, os fenômenos físicos a introduzir e o tipo de saída de dados que se encontram descritos correctamente no manual do *SWAN*, (Booij *et al.* 2006).

Dentre os vários resultados obtidos pelo *SWAN*, destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direções de pico e média, o espalhamento direccional, entre outros.

Para a aplicação sistemática do modelo *SWAN*, utilizou-se o pacote de programas chamado *SOPRO-SWAN* (FORTES *et al.* 2008). Este pacote é composto por uma base de dados e por uma interface com o utilizador para o modelo numérico *SWAN*. A interface com o utilizador facilita as operações de armazenamento e manipulação dos dados necessários à execução do modelo. Também o pós-processamento dos resultados, nomeadamente a visualização dos resultados, é facilitado pela utilização do pacote *SOPRO-SWAN*.

### 3. MODELO ONDISACAD

#### 3.1 Pacote de rotinas computacionais

O software é composto por rotinas voltadas para tratamento de dados de ventos, estudo de comprimentos de pista e alturas de ondas. O software, no geral, compreende cerca de quatro grandes estruturas programacionais.

##### 3.1.1 Funcionamento das rotinas

O software calcula pistas de vento pelo clássico método de Saville *et al* [1][11] e realiza os cálculos sobre uma malha cuja precisão é estabelecida previamente pelo usuário, malha está que tem a finalidade única de fornecer as coordenadas de finitos pontos contidos no domínio da região de estudo. Inicialmente o software solicita que o usuário forneça a direção da pista de vento a ser calculada e traça dezenove linhas auxiliares que vão do ponto em que se quer calcular a pista até a margem do lago, onde o ângulo entre cada linha é de 5°, distribuídas oito no sentido horário (a partir da linha que obedece a direção fornecida pelo usuário) e mais oito no sentido anti-horário, conforme Figura 1. O comprimento de cada pista de vento é obtido a partir da equação 4. De posse deste comprimento, a rotina classifica as pistas dentro de uma palheta de cores.

$$F = \frac{\sum_i x_i \cos \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i} \quad (4)$$

onde:

$F$  é o comprimento da pista efetiva de vento;

$\alpha_i$  é o ângulo entre a direção principal e a direção secundária; e

$x_i$  é o comprimento na direção secundária.

A forte influência da variabilidade do formato das margens, na determinação da pista de vento, faz com que o processo gráfico se torne excessivamente cansativo ao usuário. Surge, portanto, a necessidade de um programa computacional que forneça graficamente o comprimento das pistas de vento bem como a localização destas pistas no lago e seus respectivos valores para ser utilizado no cálculo de altura de onda.

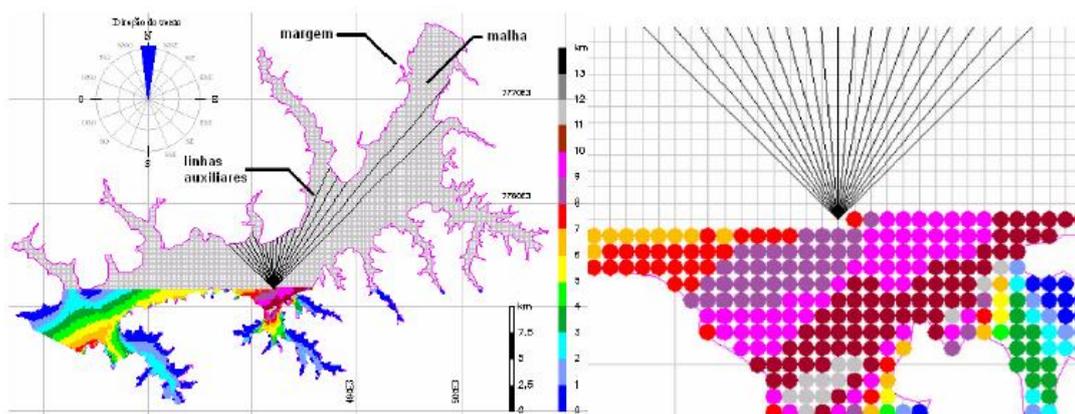


Figura 1: (a) Detalhe dos elementos gráficos envolvidos no programa e (b) Ampliação de 32X.

O aplicativo que calcula a altura das ondas trabalha também de forma similar.

Inicialmente o usuário fornece a direção do vento, intensidade e seleciona o método que o programa deve utilizar para realizar tal cálculo. Estão disponíveis, no software, os métodos JONSWAP, SMB, Wolf, Creager e SGM. O software também oferece a possibilidade de exportar o mapa gerado para o formato BMP ou WMF, não havendo a necessidade de ter o AutoCAD instalado.

#### 4. Lago da barragem de Ilha Solteira

O lago da barragem de Ilha solteira está situado na cidade de Ilha Solteira a qual é um município brasileiro que pertence a região Noroeste do Estado de São Paulo, a 699 km da Capital. Localiza-se a uma latitude 20°25'58" sul e a uma longitude 51°20'33" oeste, estando a uma altitude de aproximadamente 335 metros. Tal localização, próximo ao encontro dos rios Tietê e Paraná e à divisa com o Estado do Mato Grosso do Sul, é uma das mais importantes da hidrovia Tietê-Paraná, principal meio de transporte do Mercosul.

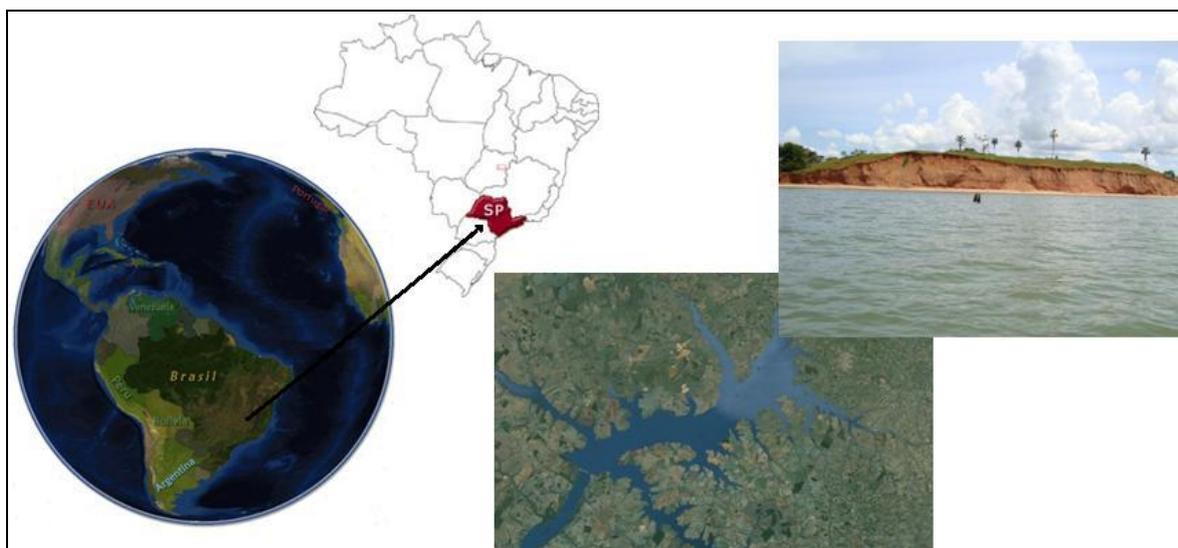


Figura 2: Lago da Barragem de Ilha Solteira.

Nesta zona está a ser realizado um vasto plano de monitorização de vento x onda e definição de um sistema de alerta que faz parte do projecto FINEP – ONDISA5, que visa o desenvolvimento de modelos de previsão de ondas geradas por ventos para fins de segurança à navegação. Nesse âmbito têm sido realizadas campanhas de medição de vento e ondas.

A aquisição de dados de vento e de ondas foi efetuada com uma torre de 6 metros de altura na qual estavam dispostos de anemômetros e um perfilador acústico ADCP-Waves (*Acoustic Doppler Current Profile*). A torre era composta por anemômetros convencionais, tipo conchas, dispostos nas alturas de 0.3, 0.6, 1.2, 2.4 e 4.8 metros e no topo um anemômetro 2D sônico digital. Os dados foram registados num *datalogger* da Campbell Scientific, modelo CR1000.

Os anemômetros tipo concha foram utilizados para medir a velocidade do vento, enquanto o anemômetro sônico 2D mediu os parâmetros de velocidade e direção. Estes dados foram obtidos a cada minuto, com médias armazenadas a cada 5 minutos.

O objetivo do trabalho nesta seção é obter as características de agitação no lago gerada por ventos locais, para um conjunto de condições de vento colectadas utilizando velocidade de 10 e 20 m/s e e com direções de 45 e 225 graus.

#### 4.1 Discretização do domínio de cálculo SWAN

O domínio de cálculo do modelo *SWAN* foi discretizado através de três malhas retangulares, sendo uma que cobrindo toda a região do lago da barragem de Ilha Solteira, Figura 3. A malha maior (global) possui as dimensões 54 km por 33 km, e é composta de unidades quadrangulares de 1000 m de lado. A 2ª malha (encaixada) foi definida com uma resolução de 500 m, cobrindo um retângulo de 26.6 km por 18.4 km. A 3ª malha (encaixada) foi definida com uma resolução de 250

m, cobrindo um retângulo de quadrado de 14.8 km por 14.3 km. Na malha encaixada foram definidos 5 pontos P1 a P5, onde se extraíram resultados das execuções do SWAN (Figura 3).

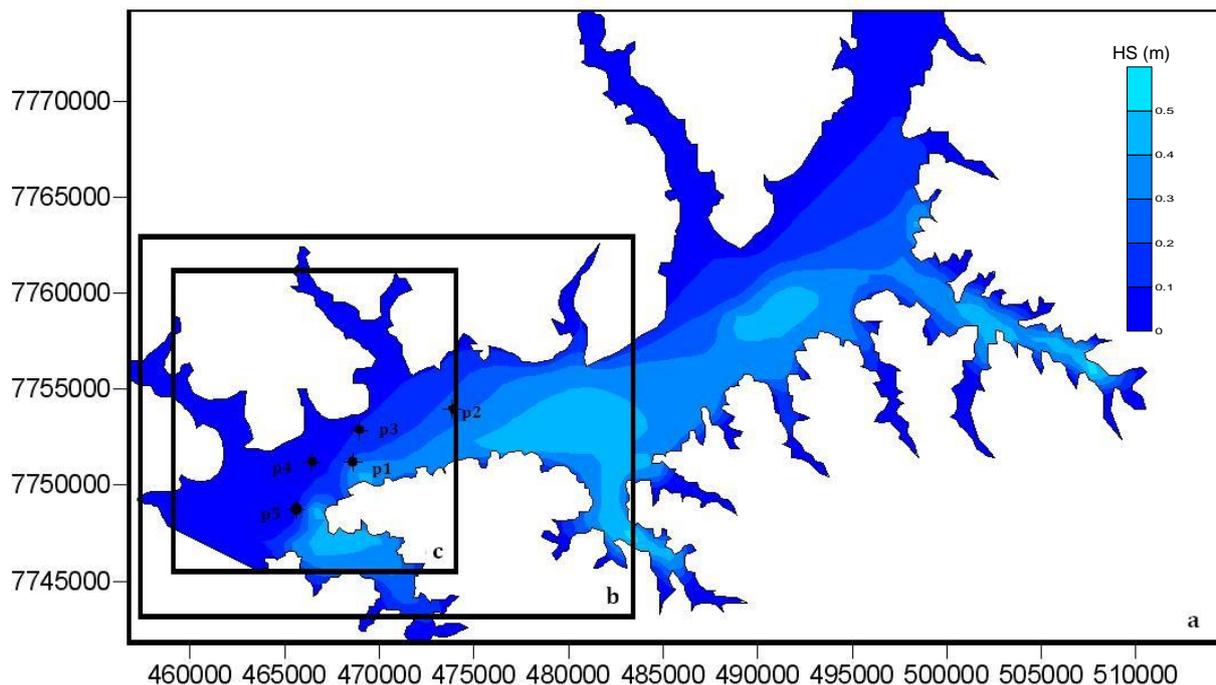


Figura 3: Definição das malhas do modelo SWAN e localização dos pontos no lago da barragem de Ilha Solteira para a obtenção dos resultados: a) malha1, b) malha2 e c) malha3.

Tabela 1: Características das malhas utilizadas na simulação com o SWAN.

Malha	X inicial	Y inicial	Nº. DX	Nº. DY	DX (m)	DY (m)
1	456680	7741700	58	33	1000	1000
2	457220	7744520	53	34	500	500
3	459329	7745690	58	57	250	250

Utilizaram-se os dados de vento ao 1.2 m, obtidos com o anemômetro, no período de Julho a Dezembro de 2010, como ilustra a Figura 4 que apresenta a distribuição, por rumos, de valores tri-horários da velocidade do vento.

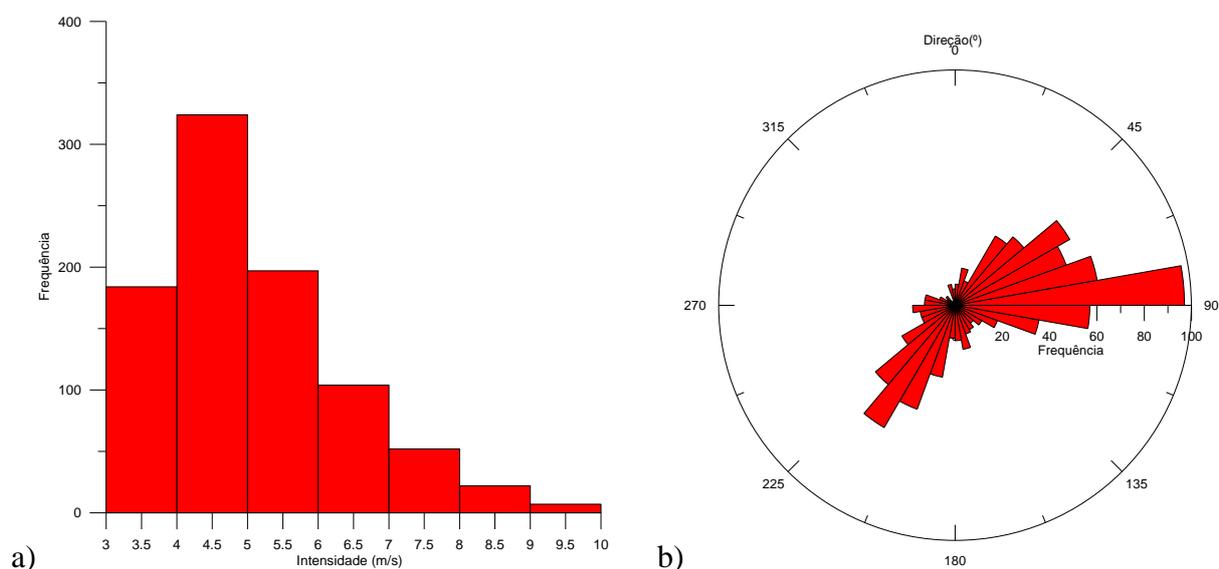


Figura 4: Características do vento no período de Julho a Dezembro de 2010: a) intensidade, b) direção.

Com base nos dados da estação de São Martinho, verifica-se que rumos mais frequentes são no quadrante N-E seguidos do quadrante S-E.

Para os cálculos do *SWAN*, o espectro direcional foi definido a partir da discretização de um espectro em frequência contendo 21 intervalos, de 0.070 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e de uma discretização em direção cobrindo os 360°, dividida em 144 intervalos ( $\Delta\theta = 2.5^\circ$ ).

Todas as execuções foram realizadas com a versão 40.72 do *SWAN* e os fenômenos físicos incluídos foram refração, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (*whitecapping*), interações entre tríades de ondas (*triad wave-wave interactions*) e a geração de harmônicas (*frequency shifting*).

Para as condições indicadas anteriormente, foram efetuados os cálculos com o modelo *SWAN* para as condições de vento de Julho a Dezembro de 2010 e obtiveram-se as características da agitação do lago nos pontos assinalados P1 a P5, ver Figura 3. Quanto ao tempo necessário ao cálculo, uma simulação do *SWAN* com uma malha (a 1ª malha assinalada na Figura 3) demora cerca de 40 s enquanto que com as três malhas de cálculo mencionadas acima uma simulação demora tipicamente 120 segundos. Meio ano de simulações equivalem a 708 simulações e cerca de 24h, utilizando 3 malhas encaixadas.

#### 4.1.1. Resultados do modelo SWAN

Na Figura 5 apresentam-se os valores da altura de onda significativa e direção de pico de onda em toda a zona de estudo e em particular na zona próximo ao cume da barragem, para um caso de velocidade do vento extremo 20 m/s numa direção de 45°.

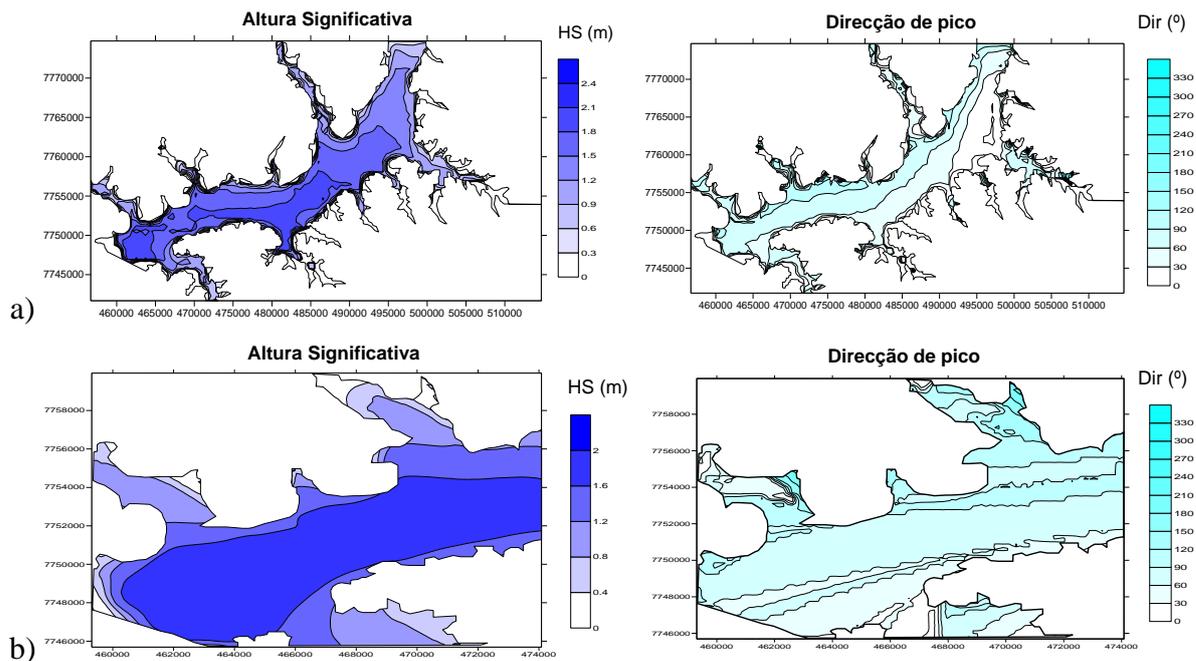


Figura 5: Altura significativa e direção média da agitação marítima obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade de 20 m/s e direção 45<sup>o</sup>: a) Malha 1 (lago); b) Malha 3 (zona da barragem).

Como se pode ver, com um ângulo de incidência do vento de 45 graus e uma velocidade de 20 m/s, obtêm-se ondas máximas de 2 m de altura mais próximas a zona da barragem, enquanto que ao longo da pista de vento essas alturas de ondas variam em média entre 0.4 e 1.6 m. Com relação às direções de pico, nota-se que existe uma variação maior entre 60 e 180 graus.

Da Figura 6 à Figura 8, apresentam-se as séries temporais das alturas de onda significativas, período médio de zero ascendente e direção média, com velocidades de 10 e 20 m/s e direções 45 e 225 graus para a malha 1, onde está se verificando o comportamento das ondas nos 4 primeiros pontos descritos na Figura 3 e identificados na Tabela 2.

Tabela 2: Posicionamentos dos pontos.

	x	y
p1	468623	7751193
p2	473839	7753938
p3	468898	7752840
p4	466427	7751192

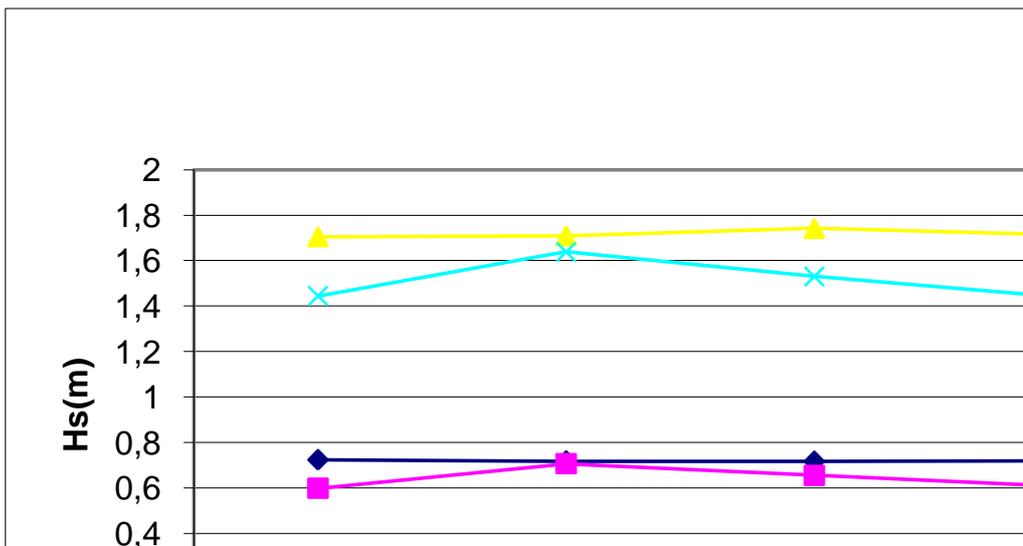


Figura 6: Altura significativa de onda obtidos com o SWAN.

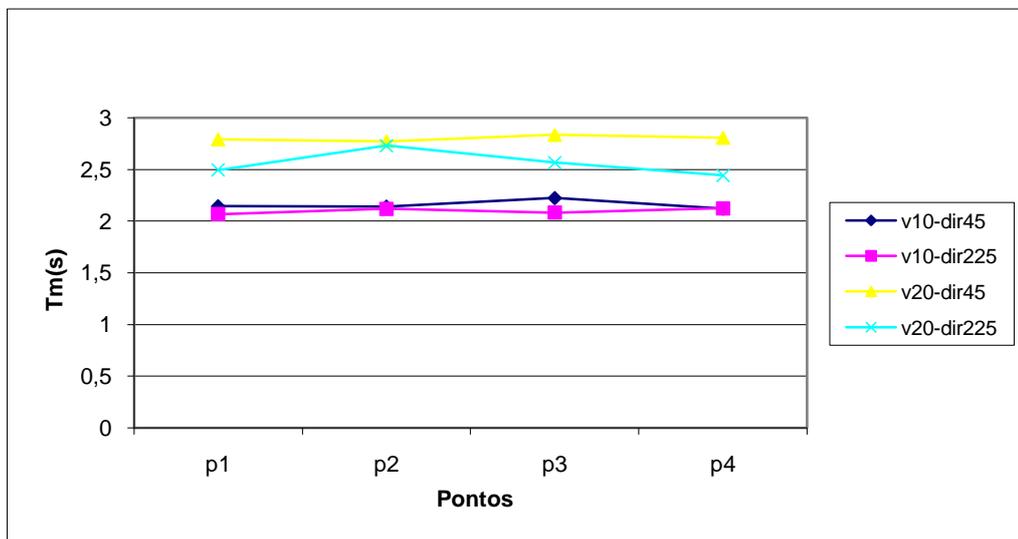


Figura 7: Períodos médios obtidos com o SWAN.

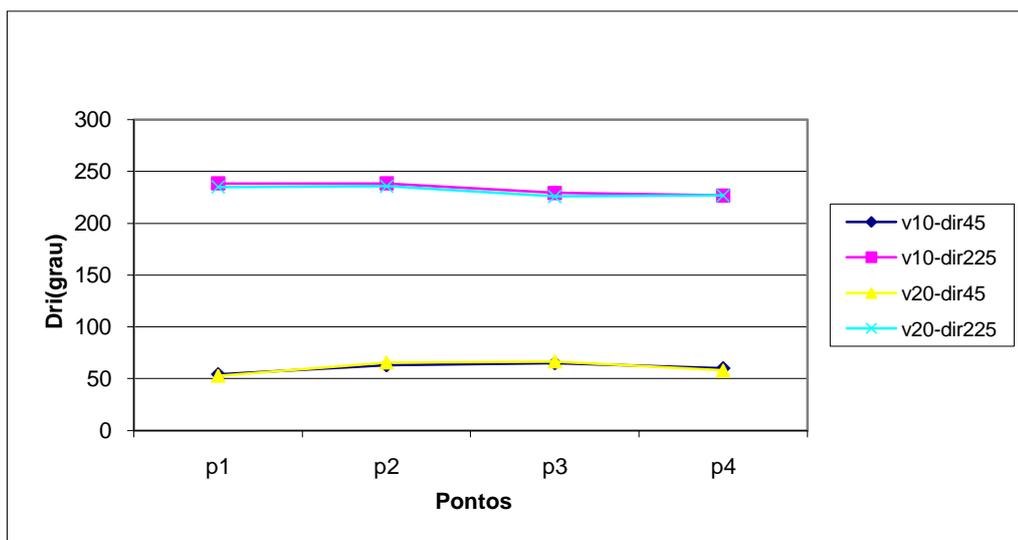


Figura 8: Direções de onda obtidos com o SWAN.

## **4.2. Discretização do Modelo OndisaCad**

O início dos estudos climatológicos no lago de Ilha Solteira tomou impulso com a criação do projeto ONDISA, entre os anos de 2000 e 2001. Durante este período foram monitorados simultaneamente os ventos (Farol São Martinho) e a geração de ondas (ponte rodoferroviária) no lago, conforme Figura 4. O sistema hoje se encontra em operação e o projeto ONDISA está na sua terceira fase. O objetivo inicial do ONDISA era fornecer informações para apoio e segurança da navegação através de um sistema de previsão em tempo real de alerta aos comboios de barcaças sobre situações adversas à navegação.

### **4.2.1 Etapas da simulação numérica**

A seguir encontram-se as etapas a serem seguidas para a simulação, lembrando que neste caso a simulação foi feita para o lago do reservatório de Ilha Solteira, mas pode ser estendida, com pequenos ajustes, para qualquer outro lago.

- Os anemômetros fazem a medição da velocidade e direção dos ventos;
- Por telemetria os dados são enviados para uma base instalada no laboratório de Hidrologia e Hidrometria LH<sup>2</sup> da FEIS/UNESP;
- No laboratório, os dados são recebidos, lidos e arquivados em formato TXT;
- O software OndisaCAD (de posse dos dados em TXT) pode ser acionado por um usuário para produzir rosa de ventos, mapas de pistas, mapas de ondas e diagramas de alturas de ondas ou comprimento de pistas, tudo em tempo real, sendo necessária apenas a introdução prévia do contorno do lago.

### **4.2.2. Rotinas contidas no OndisaCAD:**

- Rosa de Ventos

Esta rotina confecciona rosa de ventos a partir da frequência e da velocidade média dos ventos.

- Mapa de Pistas de Vento

Esta rotina gera mapas de comprimento de pistas de vento para toda a região do lago.

- Mapa de Ondas

Esta rotina gera mapas de altura de ondas para toda a região do lago ou para uma subregião específica.

- Diagrama de Comprimento de Pistas de Vento

Esta rotina produz diagramas de comprimento de pistas de vento para todas as direções.

- Diagrama de Altura de Ondas

Esta rotina produz diagramas de altura de ondas para todas as direções.

- Pista de Vento

Esta rotina calcula o comprimento da pista de vento em um dado ponto, em uma dada direção no interior do lago.

#### 4.2.3. Validação do aplicativo no lago de Ilha Solteira

O estudo de caso tratado neste artigo infere sobre ondas geradas no lago de Ilha Solteira, a partir do banco de dados de ventos medidos no ano de 2003, dentro do projeto ONDISA.

#### 4.2.4. Ventos no lago de Ilha Solteira

Em Ilha Solteira em 2003 o vento de maior frequência (predominante) chegou pela direção O, e o de maior intensidade (dominante) pela direção NNO. Para velocidades corrigidas, a maior intensidade do vento atingiu o lago pela direção NE, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3: Velocidade média do vento corrigida\* para cada direção.

Direção	Coef. Correção	Vel. Registrada (km/h)	Vel. Corrigida (km/h)	Vel. Corrigida (m/s)
E	1,19	13,6	16,2	4,5
ENE	1,19	18,3	21,7	6,0
NE	1,19	19	22,6	6,3
NNE	0,85	16,3	13,8	3,8
N	0,85	19,1	16,3	4,5
NNO	0,85	21,5	18,3	5,1
NO	0,85	16,7	14,2	3,9
ONO	0,85	16,6	14,1	3,9
ONO	0,85	17,1	14,5	4,0
OSO	0,85	16,4	13,9	3,9
SO	0,85	16	13,6	3,8
SSO	0,85	12,4	10,5	3,0
S	1,19	10,7	12,7	3,5
SSE	1,19	9,6	11,5	3,2
SE	1,19	11,1	13,2	3,7
ESSE	1,19	8,7	10,3	2,9

\* As velocidades corrigidas levam em conta os efeitos da elevação, da localização, da correção de estabilidade, da velocidade média no tempo e do arraste (Marques [1][7]).

#### 4.2.5. Mapas de ondas no lago de Ilha Solteira

O aplicativo que calcula a altura das ondas trabalha com interface similar ao cálculo das pistas. Inicialmente o usuário fornece a direção do vento, a intensidade do vento e seleciona o método a ser utilizado no cálculo.

Dentre os métodos de cálculo de onda disponíveis, optou-se pelo consagrado método JONSWAP .

As Figuras Figura 9 e 10 ilustram, para o lago de Ilha Solteira, os mapas de altura de ondas para as direções NNE (maior vento médio) e NNO (vento máximo).

Como se pode verificar, as maiores ondas estão localizadas nos mesmos pontos em que se têm as

maiores pistas de vento, quando se trata de uma mesma direção. Assim as maiores ondas na direção NNE estão à sudeste do lago de Ilha Solteira, com cerca de  $0,4m$  de altura, assim como as maiores pistas também, Lembrando que para essa direção o vento médio utilizado foi de  $5,92m/s$ .

Já para o caso da direção NNO, as maiores ondas também estão à sudeste do lago de Ilha Solteira, porém com cerca de  $1,20m$  de altura, já que a intensidade de vento incidente nessa direção foi de  $24,62m/s$ .

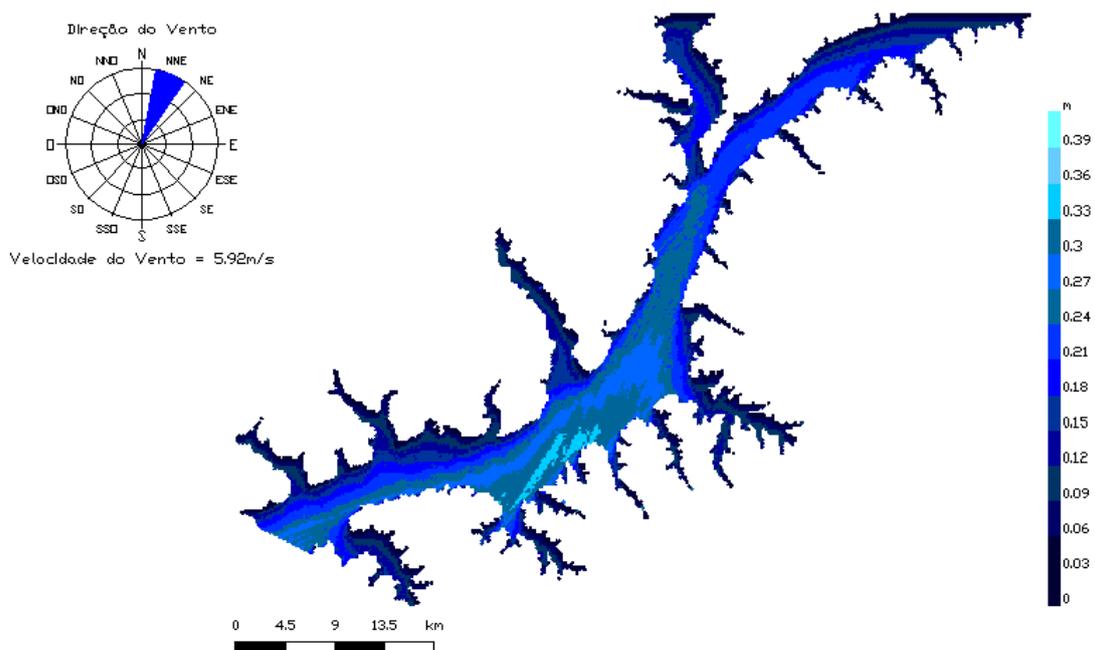


Figura 9: Mapa de altura de onda para o lago de Ilha Solteira, direção NNE, maior vento médio ( $5,92m/s$ )

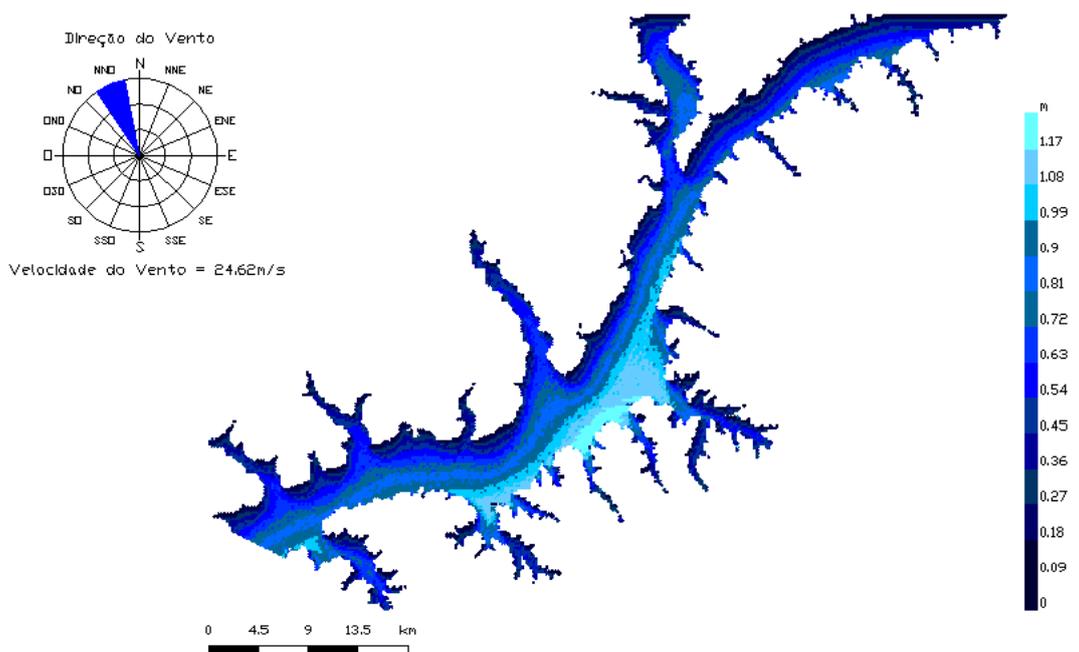


Figura 10: Mapa de altura de onda para o lago de Ilha Solteira, direção NNO, vento máximo ( $24,62m/s$ ).

## **5. CONCLUSÕES**

Nesta comunicação, descrevem-se o comportamento de dois simuladores de propagação de ondas geradas por vento para o lago da barragem de Ilha Solteira.

Tratando-se do modelo *SWAN*, o mesmo foi utilizado para estudar a agitação gerada pelo vento numa zona junto à barragem de Ilha Solteira considerando um conjunto de dados de vento disponíveis nessa zona, com testes feitos a partir de velocidades de vento de 10 e 20m/s e com direções de 45 e 225 graus. Embora não tenha sido efectuada qualquer validação, uma análise qualitativa mostra que os valores do modelo numérico são coerentes, com as expectativas de ondas para aquelas condições meteorológicas.

No que diz respeito ao modelo *OndisaCad*, o software desenvolvido possibilita a previsão de ondas em tempo real a partir de base de dados de ventos soprando em recintos fechados. As rotinas desenvolvidas são de fácil utilização e a saída gráfica é automática. Os mapas de pista ou de onda podem ser gerados a cada trinta segundos aproximadamente.

O software *OndisaCad*, pela simplicidade de manuseio e pela grande rapidez no processamento, mostrou-se uma ferramenta útil para estudos de climatologia de vento e regime de ondas em lagos interiores e, por conseguinte, no auxílio de desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos. De forma similar, os resultados apontados estão em consonância com as observações de pescadores e de usuários do lago quando da ocorrência de ventos significativos.

Os ondógrafos direcionais do projeto já foram em parte instalados e medições de onda já efetuadas, sem entretanto, ter ainda havido tempo para a análise dos dados.

Assim, o tratamento de dados de onda no lago da barragem de Ilha Solteira e a posterior validação dos simuladores disponíveis constituem etapa crucial no processo de validação dos códigos, etapa esta a ser realizada em futuro próximo.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FINEP e à FAPESP pelo apoio financeiro ao projeto, e ao CNPq e CAPES pela bolsa de doutorado e doutorado sanduiche da 1ª autora deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AZEVEDO, E. (2004) - Project CLIMAAT - Climate and Meteorology of the Atlantic Archipelagos - Interreg\_IIB, Mac2.3/A3.
- [2] AZEVEDO, E.B.; MENDES, P.; GONÇALO, V. (2008) - "Projectos CLIMAAT e CLIMARCOST Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos, Clima Marítimo e Costeiro" - Workshop Intenacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa -WSCRA08
- [3] BARRERA, C.; AZEVEDO, E.B.; RUEDA, M.J.; M.D. Gelado and O. Llinás (2008) - *Real-time monitoring network in the Macaronesian region as a contribution to the Coastal Ocean Observations Panel (COOP)*, Journal of Operational Oceanography, Vol. 1, Issue.
- [4] BOOIJ, N.R.; HOLTHUIJSEN, L.H. e RIS, R.C. (1996) – “The SWAN wave model for shallow water”, in *ICCE '96*, Orlando (USA), 21 - 27 de Julho de 1996, pp. 668 - 676.
- [5] ESTEVES, M.; TOMÉ, R.; MIRANDA, P.M.A.; AZEVEDO, B. (2007): “Desempenho do MM5 em modo operacional: O Furacão Gordon na região dos Açores”, *5º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Peniche, Portugal.
- [6] FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L., SANTOS, J.A. (2008) – Acoplagem de modelos numéricos no Pacote SOPRO. 9º Congresso da Água, Estoril, Cascais, 2 a 4 de Abril.
- [7] MARQUES, M., (2005), “Um Sistema Automatizado para Estimativa de Ondas Geradas por Vento em Reservatórios de Barragens”, Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista
- [8] PALHA, A.C. (2007) – “pyMOIA – Previsão, em Tempo Real, da Agitação Marítima em Zonas Portuárias”, *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007 (CD-ROM).
- [9] PIERSON, W. J. E MOSKOWITZ, L., (1964), “A Proposed spectral form for fully developed wind seas”, *J. Geophys Research*, 5181-5190.
- [10] SANTOS, J.A.; GUILHERME, L.; FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.; SIMÕES, A. (2009) – “Coupling numerical models for wave propagation in the MOIA package”, *J. Coastal Research*, SI 56, pp. 544-548.
- [11] SAVILLE, T. et al., (1954), “The effect of fetch width on wave generation”, *Journal Technical Memorandum*, n. 70.
- [12] SIMÕES, A.; TOMÉ, R.; REIS, F.; AZEVEDO, E. (2009) – “Avaliação da Qualidade das Previsões de Agitação Marítima no Arquipélago dos Açores”, Projectos CLIMAAT e CLIMAAT II, INTERREG IIIB – Açores, Madeira e Canárias, MAC/2.3/A3 – 03/MAC/2.3/A5.
- [13] SWAN – Implementation manual. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, available from <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>[http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/\(Version 40.51, August 2006\)](http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/(Version%2040.51,%20August%202006).).
- [14] SWAN – Programming rules. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, available from <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>[http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/\(Version 1.3, August 2006\)](http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/(Version%201.3,%20August%202006).).
- [15] SWAN – System documentation. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, to be available.
- [16] SWAN – Technical documentation. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, available from <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>[http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/\(Version 40.51, August 2006\)](http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/(Version%2040.51,%20August%202006).).

- [17] TOLMAN, H.L. (1999) – *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note 166, 110 pp.
- [18] MORAIS, V.S. (2009) - “Previsão de Ondas Geradas Por Ventos em Águas Interiores e Sua Alteração Devido à Presença de Vegetação Aquática em Margens de Lagos”, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- [19] WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. (1985) – “Statistics for the evaluation and comparison of models”. *J. Geophysical Research*, 90, 5, pp.8995-9005.