

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
ENGENHARIA CIVIL

FELIPE AUGUSTO ROCKEMBACH E SILVA

**MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA SIMULAÇÃO DOS CAMPOS DE FETCH E
ONDAS: ESTUDO DE CASO DOS RESERVATÓRIOS DE SALTO CAXIAS E
ITAIPU**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

FELIPE AUGUSTO ROCKEMBACH E SILVA

**MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA SIMULAÇÃO DOS CAMPOS DE FETCH E
ONDAS: ESTUDO DE CASO DOS RESERVATÓRIOS DE SALTO CAXIAS E
ITAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Oliveira de Andrade

CURITIBA

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA SIMULAÇÃO DOS CAMPOS DE FETCH E ONDAS: ESTUDO DE CASO DOS RESERVATÓRIOS DE SALTO CAXIAS E ITAIPU

Por

FELIPE AUGUSTO ROCKEMBACH E SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

Orientador – Fernando Oliveira de Andrade, Dr.

UTFPR

Prof. Prof. Flavio Bentes Freire, Dr.

UTFPR

Profa. Celimar Azambuja Teixeira, Dra.

UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

RESUMO

SILVA, F. A. R. **Modelagem paramétrica para simulação dos campos de *fetch* e ondas: Estudo de caso dos reservatórios de salto Caxias e Itaipu.** 2017. 67 pp. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

A pista sobre a qual o vento sopra transferindo energia para corpos d'água, conhecida como *fetch*, é um fator fundamental para o estudo da geração de ondas. O conceito de *fetch* foi desenvolvido inicialmente em ambientes marítimos, sendo o procedimento de determinação deste chamado de método oceânico. Todavia, este método não obteve resultados satisfatórios quando aplicado às águas interiores, como lagos e reservatórios, fazendo-se necessário o desenvolvimento de métodos específicos para estes ambientes, destacando-se o método de Saville. O presente trabalho visa obter a distribuição dos *fetches* para os reservatórios de Salto Caxias e Itaipu. Para tanto, foi realizada uma revisão dos principais métodos de cálculos de *fetch* empregados, bem como dos conceitos relacionados à formação de ondas por ventos em reservatórios. Esta distribuição para ambos os reservatórios foi determinada por meio da aplicação do modelo computacional ONDACAD, um software desenvolvido em linguagem *AutoLISP* pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá. Foram elaborados os campos de *fetch* para 16 direções do vento em cada reservatório, adotando-se o método de Saville. Para a direção principal de cada reservatório estudado, foi construído também o campo de *fetch* a partir do método oceânico, permitindo uma comparação entre os métodos distintos. A fim de se demonstrar uma importante aplicação dos campos de *fetch*, empregou-se um modelo paramétrico conhecido como SMB para obter a distribuição de alturas significativas de ondas no reservatório de Salto Caxias, considerando-se as intensidades do vento de 5, 15 e 20 m/s. Os valores resultantes apontam que o *fetch* máximo é de 3,3 km com vento norte para o reservatório de Salto Caxias e 13,0 km com vento na direção Sul-sudoeste para o reservatório de Itaipu.

Palavra-chave: *Fetch*. Onda. Reservatórios. ONDACAD.

ABSTRACT

SILVA, F. A. R. **Parametric modeling for fetch and wave field simulation: Case study of Salto Caxias and Itaipu reservoirs.** 2017. 67 pp. Final Course Assignment (Bachelor of Civil Engineering) – Federal University of Technology - Paraná, 2017.

The track which the wind blows transferring energy to the aqueous environment, known as fetch, is the fundamental factor for the study of wave generation. The concept of fetch was initially developed in marine environments, and the procedure for determination of this is called the oceanic method. However, this method didn't yield satisfactory results when applied to inland waters, such as lakes and reservoirs, creating the necessity of others methods for this cases, especially the Saville method. The present work aims to obtain the distribution of fetches for the reservoirs of Salto Caxias and Itaipu. Therefore, a review of the main methods of fetch calculations was performed, as well as the concepts related to the formation of waves by winds in reservoirs. This distribution for both reservoirs was determined through the application of the computational model ONDACAD, a software developed in AutoLISP language by the Department of Civil Engineering of the Universidade Estadual de Maringá. The fetch fields were elaborated for 16 wind directions in each reservoir, using the Saville method. For the main direction of each reservoir studied, the fetch field was also constructed from the oceanic method, allowing a comparison between the different methods. In order to demonstrate an important application of the fetch fields, a parametric model known as SMB was used to obtain the distribution of significant wave heights in the Salto Caxias reservoir, considering wind intensities of 5, 15 and 20 m/s. The results show that the maximum fetch is 3,3 km with North wind for Salto Caxias reservoir and 13,0 km with South-southwest wind for Itaipu reservoir.

Key-words: *Fetch*. Waves. Reservoirs. ONDACAD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fetch oceânico na direção norte	16
Figura 2 – Fetch efetivo para a direção norte.....	18
Figura 3 – Fetch efetivo em alta resolução	19
Figura 4 – Angulo entre a direção do vento e de propagação da onda.....	20
Figura 5 – Perfil de velocidade do vento	23
Figura 6 – Gráfico para correção do vento quanto à localização da medição	25
Figura 7 – Coeficiente de instabilidade devida à diferença de temperatura	26
Figura 8 – Coeficiente de correção devida à velocidade media	27
Figura 9 – Elementos de uma onda senoidal	29
Figura 10 – Geração de ondas pelo vento	30
Figura 11 – Imagem de satélite do reservatório de Salto Caxias	37
Figura 12 – Localização do lago de Itaipu.....	37
Figura 13 – Delimitação do lago de Itaipu, com a porção sul em destaque	38
Figura 14 – Detalhe dos elementos gráficos envolvidos na execução do modelo	40
Figura 15 – Campos de fetch de Salto Caxias para as direções E, ENE, NE, NNE, N, NNW, NW e WNW	45
Figura 16 – Campos de <i>fetch</i> de Salto Caxias para as direções W, WSW, SW, SSW, S, SSE, SE e ESSE	46
Figura 17 - Localização dos fetches máximos em Salto Caxias.....	47
Figura 18 - Rosa dos Fetches de Salto Caxias	48
Figura 19 – Campos de fetch de Itaipu para as direções E, ENE, NE e NNE	49
Figura 20 – Campos de fetch de Itaipu para as direções N, NNW, NW e WNW.....	50
Figura 21 – Campos de fetch de Itaipu para as direções W, WSW, SW e SSW.....	51
Figura 22 – Campos de fetch de Itaipu para as direções S, SSE, SE e ESE.....	52
Figura 23 - Localização dos fetches máximos em Itaipu.....	53
Figura 24 - Rosa dos Fetches de Itaipu	55
Figura 25 – Comparação entre os campos de <i>fetch</i> obtidos pelo Método de Saville (esquerda) e Oceânico (direita) para a direção Norte do reservatório de Salto Caxias	56
Figura 26 – Comparação entre os campos de fetch obtidos pelo Método de Saville (esquerda) e Oceânico (direita) para a direção Norte-Nordeste do reservatório de Itaipu	56
Figura 27 – Campos de ondas do reservatório de Salto Caxias para as direções E, N, W e S, com intensidade do vento de 5 m/s.....	58
Figura 28 – Campos de ondas do reservatório de Salto Caxias para as direções E, N, W e S, com intensidade do vento de 15 m/s.....	59
Figura 29 – Campos de ondas do reservatório de Salto Caxias para as direções E, N, W e S, com intensidade do vento de 20 m/s.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre os resultados obtidos por Marques e Guetter(2011).21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Fetches</i> máximos para Salto Caxias	48
Tabela 2 - <i>Fetches</i> máximos para Itaipu	54
Tabela 3 - Alturas de ondas (em centímetros) para Salto Caxias	60

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEM	Referência à publicação norteamericana <i>Coastal Engineering Manual</i>
FO	<i>Fetch</i> oceânico
JONSWAP	Acrônimo em inglês para <i>Joint North Sea Wave Project</i>
LISP	Acrônimo em inglês para <i>List Processing</i>
MS	Método de Saville
MSM	Método de Saville Modificado
PNJ	Método nominado em referência aos seus idealizadores, os pesquisadores Willard J. Pierson Jr, Gerhard Neumann e Richard W. James
SMB	Acrônimo referente às iniciais dos sobrenomes dos idealizadores do método (<i>Sverdrup, Mun e Bretscneider</i>)
SPM	Referência à publicação norteamericana <i>Shore Protection Manual</i>
SWAN	Acrônimo em inglês para <i>Simulating Waves Nearshore</i>

LISTA DE SIMBOLOS

F	<i>Fetch</i> efetivo
α	Ângulo entre a direção principal do vento e a direção secundária
x	Distância entre o ponto de interesse e a margem
i	Indexador do somatório
U	Velocidade do vento
U_{10}	Velocidade do vento a 10 m do nível da superfície
U_k	Velocidade do vento em uma altura k
z	Cota da medição do vento
R_L	Coefficiente de correlação entre a velocidade do vento medida na terra e a equivalente na água
U_L	Velocidade do vento medida em terra
U_w	Velocidade do vento sobre a água
R_T	Coefficiente de correção do vento devida à temperatura
ΔT	Diferença de temperatura entre o ar e a água
R_U	Coefficiente de correção do vento devida à sua duração
t	Duração do vento
U_{3600}	Velocidade média horária do vento
u^*	Velocidade de atrito
H	Altura da onda
$H_{1/3}$	Altura significativa da onda
H_c	Altura característica da onda
a	Amplitude da onda
$\eta(x,t)$	Nível d'água no ponto x e no tempo t
k	Número de onda
L	Comprimento da onda
ω	Frequência angular da onda
T	Período da onda
$T_{1/3}$	Período significativo da onda

f	Frequência da onda
f_p	Frequência de pico
c	Velocidade de propagação da onda
d	Profundidade do meio
W	Largura da área afetada pelo vento
g	Aceleração da gravidade
S	Termo fonte do modelo numérico
S_{in}	Parcela do termo fonte referente à energia fornecida pelo vento
S_{nl}	Parcela do termo fonte referente à energia da interação entre ondas
S_{ds}	Parcela do termo fonte referente à dissipação de energia
ϕ	Distância entre os pontos da malha
A	Área superficial do reservatório
N	Número de pontos da malha
H^*	Parâmetro adimensional referente à altura significativa
F^*	Parâmetro adimensional referente ao <i>fetch</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 FETCH.....	15
2.2 VENTO.....	22
2.2.1 Correção do Vento.....	24
2.2.1.1 Elevação.....	24
2.2.1.2 Localização.....	24
2.2.1.3 Instabilidades.....	25
2.2.1.4 Duração.....	27
2.2.1.5 Coeficiente de arraste.....	27
2.3 ONDAS.....	28
2.3.1 Fenomenologia das Ondas Geradas pelo Vento.....	28
2.3.2 Modelos para Previsão de Ondas.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	36
3.1.1 Reservatório de Salto Caxias.....	36
3.1.2 Reservatório de Itaipu.....	37
3.2 SOFTWARE ONDACAD.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 DISTRIBUIÇÃO DE <i>FETCH</i>	43
4.1.1 Reservatório de Salto Caxias.....	44
4.1.2 Reservatório de Itaipu.....	49
4.2 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS.....	55
4.3 DISTRIBUIÇÃO DE ONDAS.....	57
5 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A ação do vento em grandes espelhos de água provoca oscilações superficiais geradoras de ondas. As características físicas dessas ondas, como período, frequência, amplitude e comprimento, dependem principalmente da profundidade do meio, da intensidade e duração do vento e da distância percorrida pelo mesmo em contato com a superfície d'água. Esta distância, que pode ser entendida como a pista sobre a qual o vento sopra, é conhecida como *fetch*.

A determinação do *fetch* é fator essencial para o cálculo da altura significativa das ondas, característica esta de grande relevância para as aplicações de engenharia. O interesse em se estimar o *fetch* surgiu inicialmente em relação às áreas oceânicas, sendo o procedimento aplicado neste cálculo conhecido como método oceânico.

Em águas continentais, como lagos e reservatórios, caso sejam observadas condições de águas profundas, os impactos da duração do vento e da profundidade passam a ter importância secundária sobre a formação das ondas, sendo esta influenciada especialmente pela intensidade do vento e pelo *fetch*. No entanto, as margens destes corpos de água interiores, geralmente de aspecto irregular e dendrítico, influenciam na dimensão do *fetch*, fato este não contemplado no método oceânico (DONELAN, 1980).

Como alternativa para o cálculo do *fetch* em corpos de águas interiores, Saville (1954) propôs um método que considera a atenuação dos efeitos do vento devida às margens delimitadoras do espelho de água. Este método, conhecido como método de Saville, foi recomendado pela *U. S. Army Coastal Engineering Research Center* (1984) e é amplamente aplicado em estudos de águas interiores. O resultado da aplicação deste método, chamado de *fetch* efetivo, apresenta magnitude bem inferior àqueles resultantes a partir do método oceânico.

Outros métodos para o cálculo do *fetch* efetivo foram elaborados a partir deste proposto por Saville (1954), como o método de Saville Modificado, todos apresentando diferenças significativas nos resultados (MARQUES, 2013). Apesar da grande variedade de métodos existentes para obtenção do *fetch* e da divergência entre os respectivos resultados, não existe consenso a respeito de qual formulação é mais recomendada para cada caso. Isto se deve à carência de justificativa para a

elaboração dos métodos, sendo o único a iniciar uma discussão teórica a respeito das abordagens adotadas aquele proposto por Saville (1954).

Como será mostrado mais detalhadamente neste trabalho, o cálculo do *fetch* para os diferentes métodos depende exclusivamente das características geométricas do corpo d'água em estudo, sendo sua aplicação de fácil entendimento e baseada em operações elementares. No entanto, é conveniente se conhecer o *fetch* no maior número de pontos possível sobre a superfície estudada, de maneira a se determinar o *fetch* máximo com maior exatidão para cada direção de vento considerada. Além disso, o aspecto irregular de margens de lagos e reservatórios implica na subjetividade de quem está executando o cálculo da pista de vento. Estes fatos tornam a tarefa de se determinar o *fetch* manualmente muito trabalhosa e imprecisa.

Desta forma é comum utilizar recursos computacionais para a determinação de campos de *fetch* e ondas. Para isso, foram elaborados *softwares* baseados em modelos numéricos e paramétricos que, a partir da delimitação da superfície de interesse e da indicação da direção e intensidade do vento, permite se obter de maneira simplificada os campos de *fetch* e altura significativa de ondas.

Neste trabalho será utilizado o software ONDACAD, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá. Este modelo computacional utiliza equações paramétricas para, a partir da imagem da superfície do reservatório, relacionar as variáveis envolvidas. Como resultado, são gerados mapas com escala cromática para representação da dimensão pontual dos *fetches* e altura de ondas com base em uma malha computacional estruturada, sendo a resolução dos mapas definida pelo usuário.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinação dos campos de *fetch* e de altura significativa de ondas geradas por ventos severos nos reservatórios de Salto Caxias e Itaipu.

1.1.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar modelagem paramétrica por meio do software ONDACAD para simulação do campo de *fetch* dos dois reservatórios estudados;
- Realizar comparações quantitativas entre dois métodos (oceânico e Saville) para cálculo de *fetch*;
- Identificar os pontos de *fetch* máximo para cada direção do vento nos dois reservatórios estudados;
- Realizar modelagem paramétrica por meio do software ONDACAD para simulação do campo de altura de ondas geradas por ventos severos no reservatório de Salto Caxias.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em águas continentais, importantes impactos ocorrem devido à ação do vento, o maior agente que atua na circulação hidrodinâmica e formação de ondas. O estudo do *fetch* dessas superfícies é de fundamental importância para a determinação da altura das ondas, informação relevante para áreas do conhecimento como Engenharia, Ciências da Terra, Ciências Costeiras e Ecologia.

Dentre os impactos causados pela ação do vento sobre reservatórios e a consequente geração de ondas, destacam-se o aumento do transporte de sedimentos, a erodibilidade das margens, a segurança das barragens e seu correto dimensionamento, as condições de navegabilidade para transporte aquaviário, a seleção do local de fazendas aquícolas e o monitoramento dos níveis do reservatório.

Tendo em vista a variedade de métodos propostos para a determinação do *fetch* e a carência de informações a respeito da precisão dos mesmos, é conveniente se efetuar uma comparação entre resultados gerados a partir de métodos distintos, de modo a estimar com maior exatidão a magnitude do fenômeno estudado. Tais métodos ainda requerem uma validação em campo, o que normalmente é obtido por meio da simulação de alturas de ondas.

Para este trabalho foram selecionados os reservatórios de Salto Caxias e de Itaipu, ambos localizados na região oeste do estado do Paraná. Além da importância na geração de energia referente aos reservatórios citados, estes são objetos de estudo devido às suas características geométricas, pois têm seus comprimentos principais orientados em direções aproximadamente perpendiculares, possibilitando a comparação da ocorrência dos *fetches* máximos para diferentes direções do vento e em diferentes regiões das superfícies dos reservatórios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As ondas geradas pela ação do vento sobre a superfície de corpos d'água são influenciadas sobretudo pelas características deste elemento motriz. Dentre estas condicionantes, além da direção e velocidade do vento, destaca-se o comprimento da pista sobre a qual o mesmo sopra transferindo energia para o meio líquido, chamada de *fetch*.

Este capítulo de revisão da bibliografia aborda três conceitos fundamentais para o estudo deste fenômeno de formação de ondas: (1) *fetch*, (2) vento e (3) ondas.

2.1 FETCH

O *fetch* é definido como um comprimento que representa a região sobre a superfície d'água submetida à ação do vento com intensidade e direção consideradas constantes. Apesar de referir-se a uma superfície livre, o *fetch* possui dimensão de comprimento. Esta convenção está relacionada com a origem de tal conceito, o qual foi aplicado inicialmente para previsão de altura de ondas em águas oceânicas.

A geração de ondas em mar aberto é limitada pela zona de distúrbios meteorológicos que atua sobre determinada região, sendo a largura da pista de vento da mesma ordem de grandeza de seu comprimento, considerando somente esta última dimensão para a determinação do *fetch* (SMITH, 1991). Rigorosamente, o *fetch* em áreas oceânicas deve ser definido com o auxílio de cartas sinóticas utilizadas para estudos meteorológicos, pelas quais o comprimento é limitado por uma mudança significativa na direção do vento ou pela presença de uma frente climatológica (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1984).

Segundo Marques (2013), a utilização das cartas sinóticas deixa de ser necessária para comprimentos inferiores à magnitude de mil quilômetros, passando-se a considerar a dimensão do *fetch* como sendo a distância entre o ponto de interesse

no oceano e a costa a barlavento, como representado na Figura 1. O *fetch* estimado por meio deste método é chamado de *fetch* oceânico.

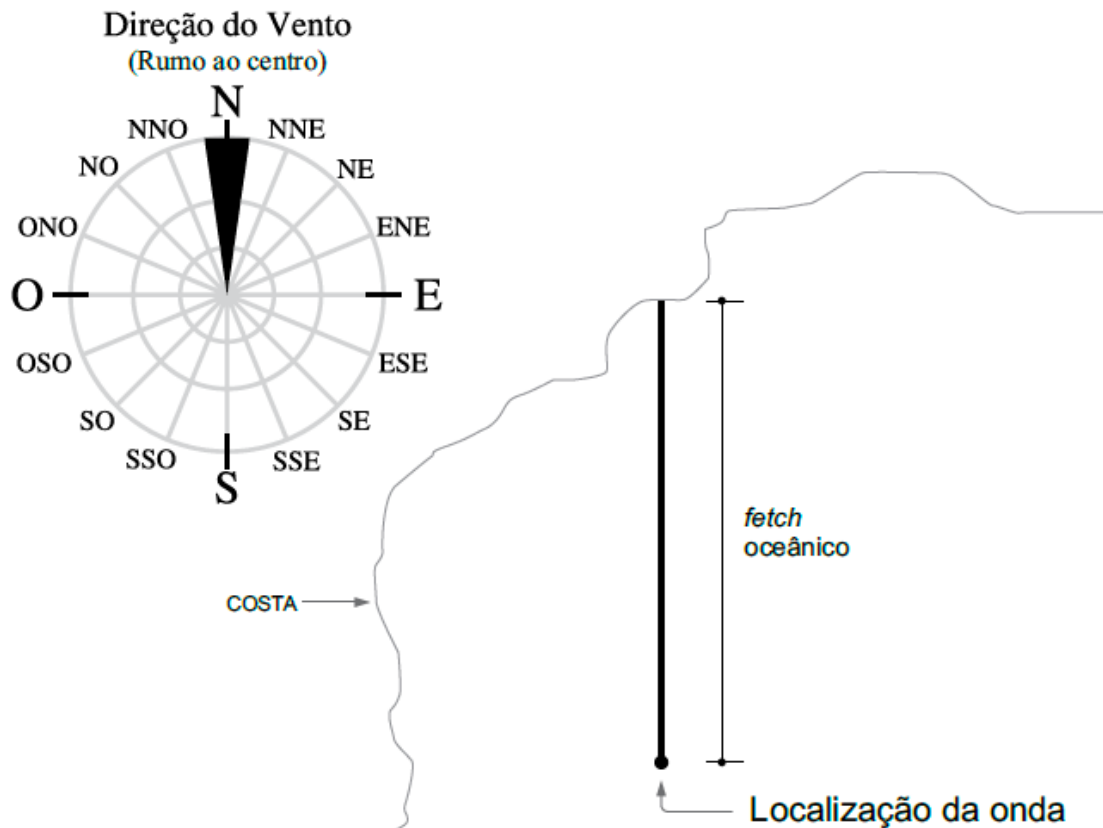


Figura 1 – Fetch oceânico na direção norte
Fonte: Marques (2013)

Este método começou a ser utilizado também para a estimativa do *fetch* em águas interiores. No entanto, esta prática superestima os valores de comprimento da pista de vento e, conseqüentemente, de altura significativa das ondas, não condizendo com as observações realizadas nestes corpos d'água. Assim, fez-se necessária a elaboração de outros métodos que obtivessem resultados mais próximos à realidade.

Águas interiores ou continentais são aquelas que correm (fluviais) ou se acumulam (lacustres) nos continentes. Sabendo-se que para a formação de ondas geradas pela ação do vento são necessários espelhos d'água de grandes dimensões, o termo águas interiores é empregado no presente trabalho se referindo somente às águas lacustres (lagos, lagoas, lagoas, reservatórios, açudes e estuários).

Nestes ambientes, considerando uma configuração de águas profundas, a geração de ondas é influenciada majoritariamente pela intensidade do vento e pela extensão da superfície de água em contato com o mesmo, podendo-se considerar

outras variáveis como profundidade do corpo d'água e duração do vento de menor importância (MARQUES E GUETTER, 2011).

O primeiro trabalho a propor uma solução para a estimativa do *fetch* mais adequada às aplicações em águas continentais foi elaborado por Saville em 1952 (SAVILLE, 1952 *apud* MARQUES, 2013). Esta publicação introduz o efeito da “largura do *fetch*” no estudo de ondas geradas pelo vento. No entanto, esta formulação proposta inicialmente se aplica somente a superfícies de águas com dimensões regulares e bem definidas, como canais.

Saville (1954) propõe então uma metodologia mais generalizada, que abrange espelhos d'água de formatos irregulares. Esta publicação aumentou de maneira substancial a aplicabilidade do método, visto que grande parte das águas continentais possui margens irregulares ou dendríticas. Saville atribui a atenuação das alturas significativas das ondas justamente à influência das margens.

O método de Saville, como ficou conhecido, foi recomendado pelo *Shore Protection Manual* do *U. S. Army Corps of Engineers* em 1966 (SMITH, 1991). A formulação é baseada na hipótese de que as ondas não são geradas somente na mesma direção do vento, mas também em um ângulo considerável a partir desta direção, hipótese esta negligenciada na estimativa do *fetch* oceânico (SAVILLE, 1954).

Diferentemente ao que ocorre em áreas oceânicas, a largura do *fetch* em águas continentais não é limitada pela zona de distúrbios meteorológicos, mas sim pela forma das margens do corpo d'água (*U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS*, 1984). Outra diferença importante entre estes ambientes é o fato de que pistas de ventos de grandes comprimentos em relação à largura são frequentemente encontradas em águas interiores (MORAIS, 2009).

Estas situações fazem com que sejam observadas em águas interiores ondas de amplitudes inferiores às observadas em mares abertos (SMITH 1991, MARQUES E GUETTER 2011). Alguns exemplos de valores de *fetch* em reservatórios brasileiros foram determinados em estudos anteriores, como, por exemplo, Frenndrich (1993) que estimou um comprimento de 10,65 km para o lago de Itaipu, Kaiser (1985) que calculou os comprimentos máximos de 24,22 km para Porto Primavera, 6,48 km para Rosana e 3,76 km para Taquaruçu, e Marques et al. (2016) que encontraram o valor de 12 km para o vento na direção norte-noroeste sobre o reservatório de Belo Monte.

Todos estes valores citados foram calculados com base na metodologia proposta por Saville (1954).

Saville (1954) afirma que o vento em determinada direção age sobre a superfície da água em um ângulo de até 45° em ambos os sentidos a partir dessa direção principal, sendo os efeitos do vento em ângulos superiores a estes limites desprezíveis. Para se obter a dimensão do *fetch* efetivo, o autor traça retas que partem do ponto estudado em direção à margem com intervalos de 5° nos dois sentidos, totalizando 19 comprimentos, como é ilustrado na Figura 2. Ele estabelece uma relação entre os comprimentos nas direções secundárias e suas respectivas projeções sobre a direção do vento, fazendo uma ponderação destes comprimentos com os cossenos dos ângulos entre as retas auxiliares e o eixo de ação do vento. O *fetch* efetivo é calculado pela média ponderada, conforme representado pela seguinte equação:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{19} x_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^{19} \cos \alpha_i}, \quad (1)$$

sendo F *fetch* efetivo, α_i o ângulo entre a direção do vento e a direção secundária e x_i o comprimento entre o ponto no corpo d'água e o contorno na direção secundária.

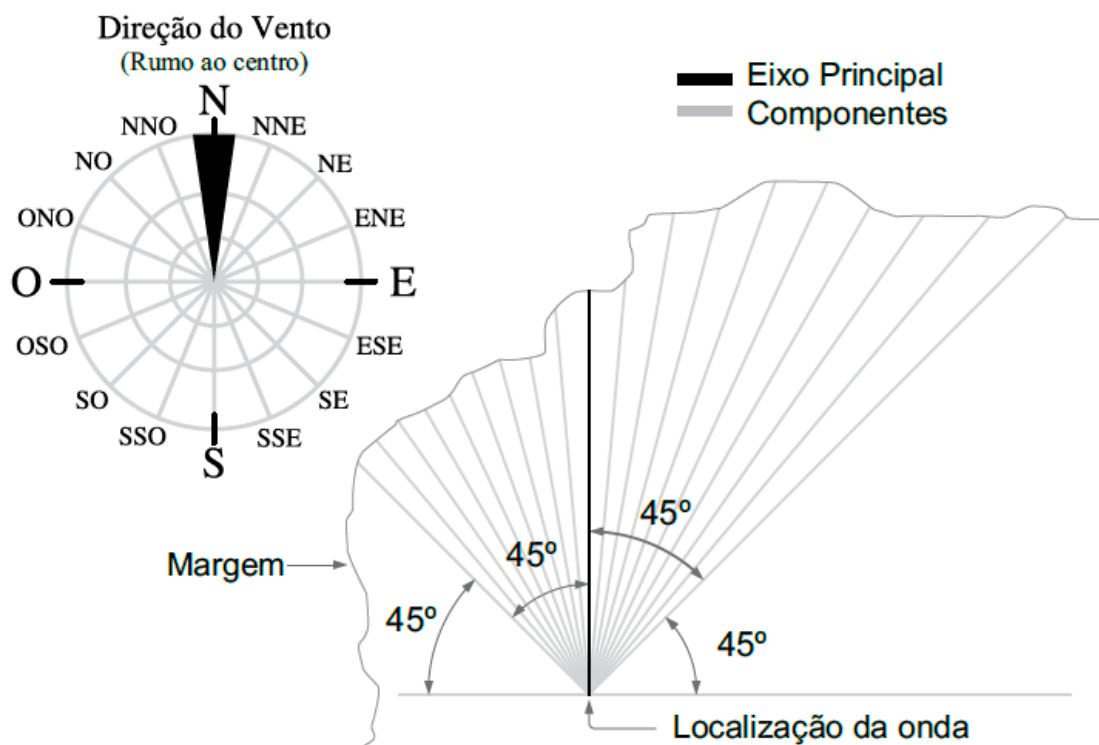


Figura 2 – Fetch efetivo para a direção norte
Fonte: Marques (2013)

Em seu trabalho, Saville relata que pode haver subdivisões em intervalos diferentes de 5° , sem informar a respeito das consequências desta prática. Marques et al. (2016) propõem uma formulação integral para a aplicação do Método de Saville, chamada de método de Saville em alta resolução, descrita pela equação 2 e ilustrada na Figura 3,

$$F = \frac{\int_{-\alpha}^{\alpha} F \cos \varphi d\varphi}{\int_{-\alpha}^{\alpha} \cos \varphi d\varphi}, \quad (2)$$

onde: $0 \leq \alpha \leq \pi/4$.

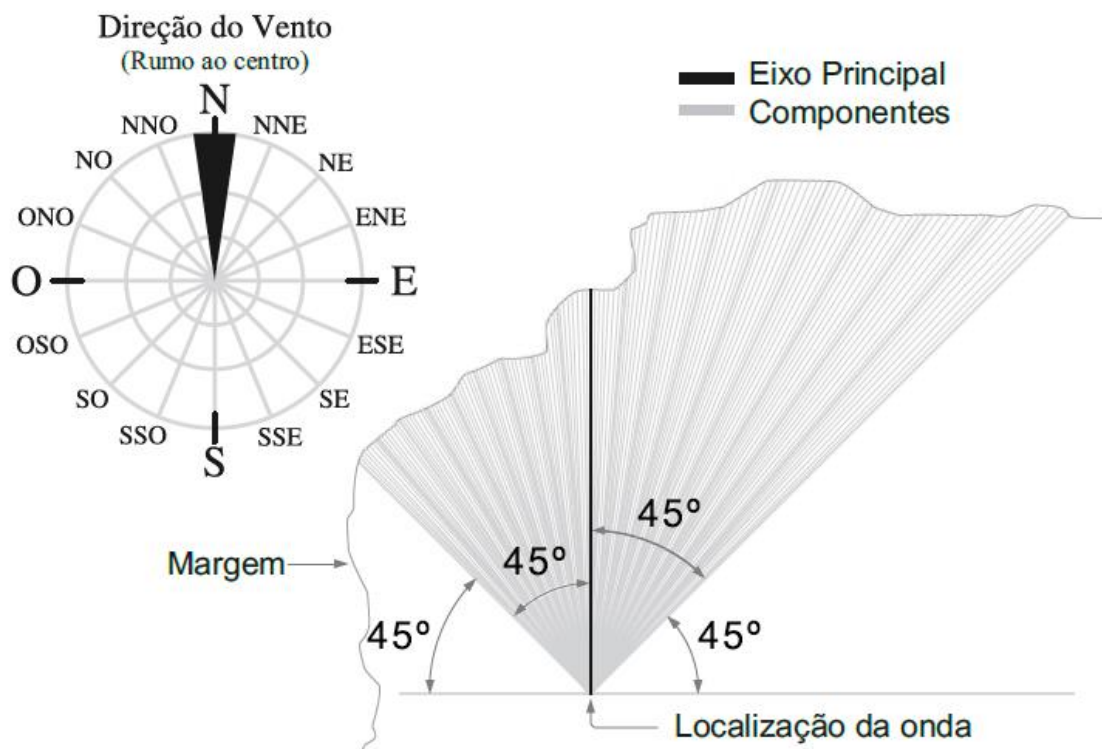


Figura 3 – Fetch efetivo em alta resolução
 Fonte: adaptado de Marques et al. (2016)

Além das hipóteses assumidas neste método anteriormente citadas, Saville (1954) considera que as ondas são completamente absorvidas pelas margens (não há reflexão nem difração), a direção da onda gerada coincide com a do vento (não há refração), a direção e velocidade do vento são mantidas aproximadamente constantes em toda a área delimitada pelas margens do corpo de água e que o vento entra em contato com a água assim que cruza a fronteira com o terreno, ou seja, o vento sopra

de maneira perfeitamente tangencial ao terreno (MARQUES E ANDRADE, artigo aceito no *Lake and Reservoir Management*).

A partir do método concebido por Saville, outras formas de cálculo do *fetch* efetivo foram elaboradas, como, por exemplo, os métodos recomendados pelo *Shore Protection Manual* de 1984 e 2006, que se baseiam no traçado de 24 e 30 radiais, respectivamente, com intervalos de um grau, sendo o *fetch* calculado a partir da média aritmética desses comprimentos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1984 e 2006).

Outra metodologia de cálculo baseada na de Saville (1954), chamada por Marques (2013) de método de Saville Modificado e difundida em outras publicações, como por Smith (1991), adota uma função de potência no termo do numerador, como pode-se observar na equação 3. Estas publicações não fazem menção às implicações desta expressão,

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{19} x_i \cos^2 \alpha_i}{\sum_{i=1}^{19} \cos \alpha_i} \quad (3)$$

No entanto, também são encontradas na literatura algumas formulações fundamentadas em hipóteses diferentes àquelas assumidas por Saville (1954). Donelan (1980) considera que a direção de propagação das ondas geradas não coincide com a direção do vento que as gera. Neste método o *fetch* considerado é semelhante ao *fetch* oceânico, com a diferença de que a linha reta é considerada na direção de propagação das ondas. Assim, a enunciação concebida inclui uma função cosseno do ângulo formado entre a direção das ondas e do vento atuante (θ), como representado na Figura 4.

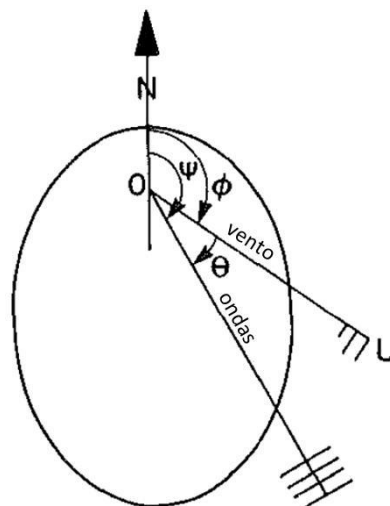


Figura 4 – Ângulo entre a direção do vento e de propagação da onda
Fonte: Donelan, 1980

Diante da variedade de métodos para estimativa de *fetch* existentes e da grande diferença entre seus respectivos resultados, é conveniente se fazer uma comparação entre métodos distintos. Uma avaliação neste sentido foi realizada por Marques e Guetter (2011), que analisaram a disposição do *fetch* a partir do método oceânico (FO), método de Saville (MS) e método de Saville Modificado (MSM) para a porção sul do reservatório de Itaipu. Foi constatada uma diferença de magnitude de até 2,77 vezes entre os valores de *fetch* máximo para os três métodos, como se pode observar no Quadro 1. Além desta diferença de valores absolutos, a região onde se localiza o *fetch* máximo varia de acordo com o método adotado (MARQUES e GUETTER, 2011).

Quadro 1 - Comparação entre os resultados obtidos por Marques e Guetter (2011)

	FO	MS	MSM
FO	F _{máx} = 24,47 km; Distribuição tende a seguir o formato da margem; maior <i>fetch</i> ocorreu na margem a sota-vento	(FO/MS) máx = 2,49 (FO/MS) máx relativo = 2,0	(FO/MSM) máx = 2,77 (FO/MSM) máx relativo = 2,22
MS	(MS/FO) máx = 0,4 (MS/FO) máx relativo = 0,5	F _{máx} = 12,27 km; Distribuição suavizada; maior <i>fetch</i> pode ocorrer no centro do reservatório	(MS/MSM) máx = 1,11; Desvios maiores próximos às margens
MSM	(MSM/FO) máx = 0,361 (MSM/FO) máx relativo = 0,45	(MSM/MS) máx = 0,9; Desvios maiores próximos às margens	F _{máx} = 11,00 km; Distribuição suavizada; maior <i>fetch</i> pode ocorrer no centro do reservatório

Fonte: Marques e Guetter (2011)

Para determinar a distribuição de *fetch* de maneira precisa, é necessário repetir o procedimento de cálculo de *fetch* para uma grande quantidade de pontos sobre a superfície do corpo d'água, de modo a se obter um campo de *fetch*. Para tornar esta tarefa menos exaustiva, foram elaborados programas computacionais que executam rotinas de cálculo de *fetch* a partir da delimitação das margens do espelho d'água e da escolha da direção do vento, automatizando o cálculo.

Existe uma grande variedade de estudos em automatização do cálculo de *fetch* que resultam em softwares baseados em equações paramétricas. Dentre eles, são exemplos os modelos paramétricos NARFET (SMITH, 1991), ONDACAD

(MARQUES, 2013) e os algoritmos elaborados por Yang et al. (2010) e Murtojaravi et al, (2009).

Os modelos numéricos para cálculo de altura de onda são baseados em equações diferenciais parciais e têm sua aplicação limitada devido à complexidade e alto custo de operação, o que inviabiliza sua utilização em projetos pequenos (SMITH, 1991). A alternativa é recorrer a modelos que utilizam equações paramétricas que relacionam o *fetch* com a forma da superfície do corpo d'água e com a direção e velocidade do vento, tornando o processo muito mais simples, rápido e acessível.

2.2 VENTO

O vento é o ar em movimento, ou seja, deslocamentos de massa de ar causados por diferenças de pressão atmosférica. A orientação dos ventos é determinada principalmente por diferenças de temperaturas entre regiões distintas e pelo movimento de rotação da Terra, sempre no sentido da zona de alta pressão para a zona de baixa pressão (CARVALHO, 2007). Esta característica da movimentação do ar faz com que haja um modelo global para a circulação atmosférica, o qual é baseado essencialmente na latitude. No entanto, outros fatores locais influenciam na direção e intensidade do vento, tais como maritimidade, continentalidade, relevo e rugosidade do terreno.

Existem diversas maneiras de se classificar os ventos, como, por exemplo, quanto à escala no espaço, tipos de força que os causam, seus efeitos e suas respectivas intensidades, estando este último aspecto relacionado à sua duração. Segundo Marques (2013), as brisas locais têm duração da ordem de horas, os fluxos de ar nas tempestades duram dezenas de minutos, os ventos fortes, chamados de instabilidade ou lufada, duram na ordem de minutos e os ventos com mudanças bruscas de velocidade (rajadas) são definidos pela Norma Brasileira ABNT NBR 6123 (1988), a qual trata dos efeitos das ações do vento em edificações, como os ventos com duração de 3 segundos.

Quando a duração do vento é menor que aquela necessária para o estabelecimento da onda limite, ou seja, ainda existe pista para o desenvolvimento da onda, diz-se que a onda é limitada pela duração. No entanto, a maior parte das

equações paramétricas utilizadas para a estimativa das alturas de ondas assume que a onda deve ser limitada pelo *fetch* (ETEMAD-SHAHIDI et al., 2009 *apud* MARQUES, 2013).

De acordo com *U. S. Army Corps of Engineers* (2008) o vento pode ser considerado de direção constante quando esta desvia dentro de uma faixa inferior a $22,5^\circ$ e de intensidade constante quando sua velocidade varia no máximo 2,5 m/s em relação ao seu respectivo valor médio.

A atmosfera é a camada de ar, constituída principalmente por Nitrogênio, Oxigênio e Argônio, que envolve a Terra. Devido à estratificação da atmosfera, esta é dividida em cinco camadas (troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera), sendo que a camada mais externa se estende até 900 km acima do nível do mar na região equatorial (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2000). A camada onde ocorrem os fenômenos meteorológicos é a troposfera, que se estende desde a superfície terrestre até a altitude de 20 km no equador e aproximadamente 10 km nos polos.

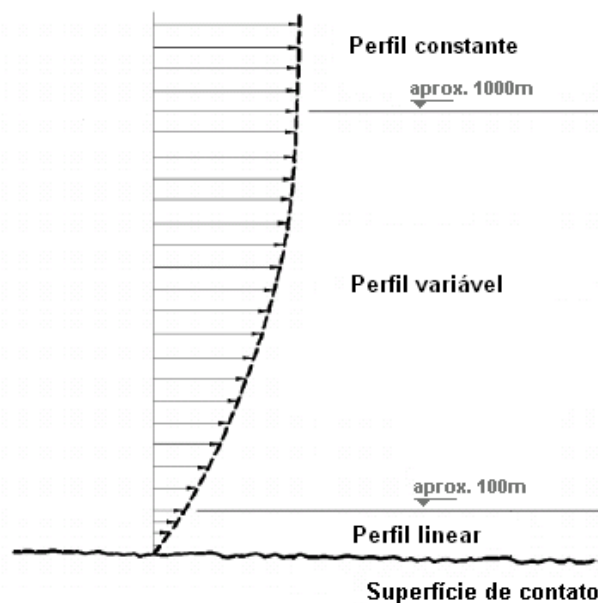


Figura 5 – Perfil de velocidade do vento
Fonte: U. S. Army Corps of Engineers (2002)

Para o estudo de formação de ondas devido à ação do vento é considerada somente a faixa em contato com a superfície, cerca de 100 m. O perfil de velocidade para a região inferior da troposfera está ilustrado na Figura 5. Como representado na figura, a velocidade do vento varia linearmente para a faixa de interesse de acordo com a altitude na qual é feita a medição.

2.2.1 Correção do Vento

A fim de se padronizar os valores de velocidades do vento medidas, o *U. S. Army Coastal Engineering Research Center* (1983) propõe cinco correções a serem aplicadas nestes valores, as quais dependem da elevação, efeitos de localização, instabilidades devido à diferença de temperatura, velocidade média no tempo e coeficiente de arraste.

2.2.1.1 Elevação

Como a intensidade do vento varia de acordo com a altitude, devem-se corrigir as medidas realizadas em cotas diferentes à altitude padrão, de 10 m. Esta também é a referência utilizada em modelagem de ondas. A velocidade do vento medida é representada por U_k , com o índice k sendo a altitude correspondente. A equação 4 é utilizada para relacionar esta velocidade com a velocidade correspondente à altura padrão (U_{10}):

$$U_{10} = U_k \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7}, \quad (4)$$

onde z é a cota onde foi realizada a medição em relação ao nível do terreno.

2.2.1.2 Localização

Um fator importante que influencia na velocidade do vento é o atrito que ocorre na superfície sobre a qual o ar escoa. Geralmente, os anemômetros são instalados sobre a terra, sendo necessário fazer a correção da velocidade em virtude da diferença de rugosidade do terreno onde foi realizada a medição e a superfície da água. Esta correção pode ser realizada somente se os deslocamentos de ar forem resultantes do mesmo gradiente de pressão e a única diferença significativa for o terreno. O gráfico da Figura 6 é utilizado para se obter o coeficiente R_L , o qual relaciona a velocidade medida em terra (U_L) com a velocidade sobre a água (U_W), ambas a uma altura de 10 m.

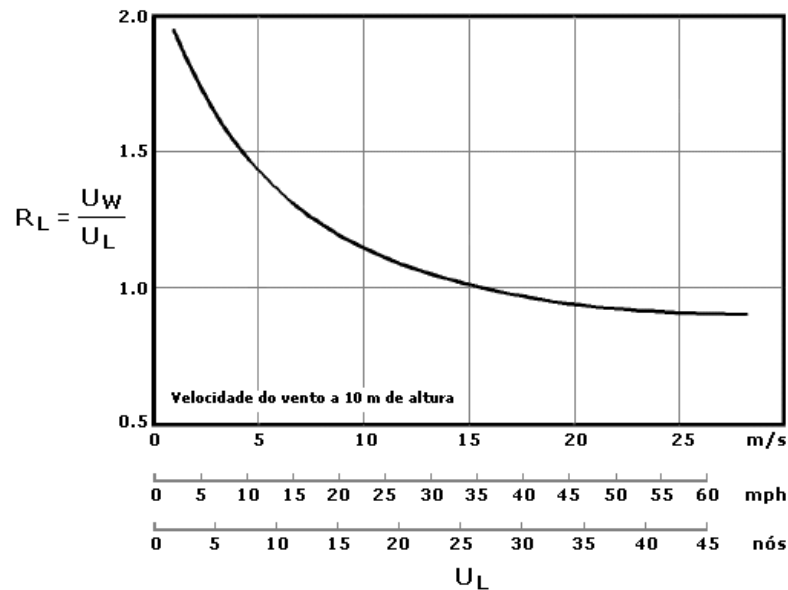


Figura 6 – Gráfico para correção do vento quanto à localização da medição
Fonte: U. S. Army Coastal Engineering Research Center (1983)

Para o caso específico de o equipamento estar localizado próximo à costa e o vento estiver soprando do mar para o continente, adota-se o coeficiente de correção igual à unidade.

2.2.1.3 Instabilidades

A diferença de temperatura entre o ar e a água gera instabilidades na camada, fazendo com que as velocidades de ventos medidas nessas condições sejam diferentes daquela correspondente à situação de estabilidade e devam ser corrigidas. Esta correção é realizada com o auxílio da Figura 7, a qual relaciona a velocidade do vento com a diferença de temperatura entre o ar e a água. É definido o coeficiente de correção de instabilidade devida à temperatura R_T como sendo a razão entre a velocidade do vento em certa altura (U_k) e a velocidade do vento a 10m de altura (U_{10}).

Se a temperatura do ar estiver mais quente que a água ($\Delta T > 0$) a camada é estável e a velocidade medida deve ser majorada a alturas superiores a 10m ($R_T > 1$). Caso o ar e a água estiverem na mesma temperatura, a camada é considerada como de estabilidade neutra e nenhuma correção se faz necessária. Se o ar estiver mais frio que a superfície da água ($\Delta T < 0$) a camada é instável e a velocidade é corrigida para alturas inferiores a 10m.

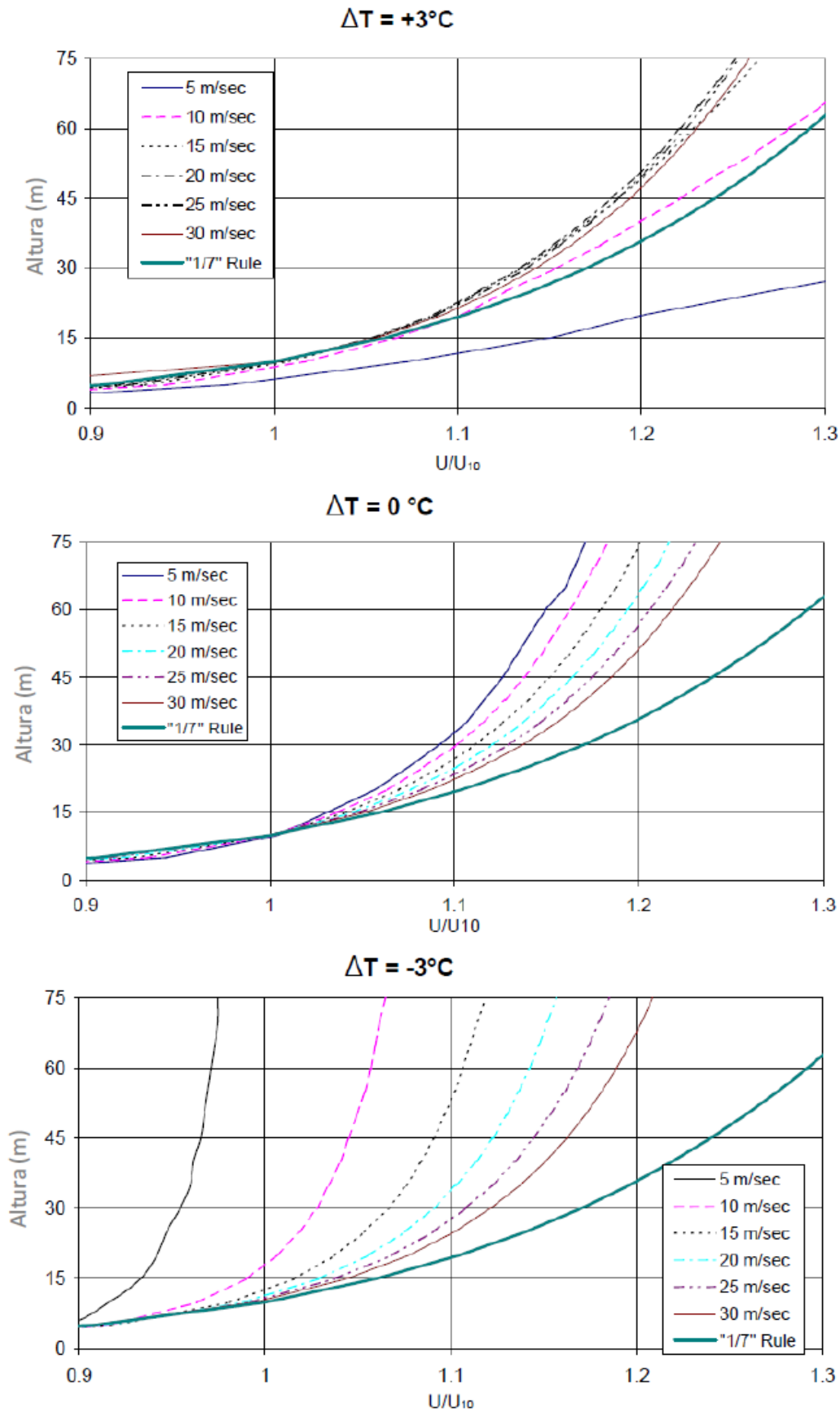


Figura 7 – Coeficiente de instabilidade devida à diferença de temperatura
Fonte: U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2008

2.2.1.4 Duração

Os anemômetros convencionais contabilizam o número de voltas da hélice do equipamento em um determinado período de tempo, relacionando-o com a velocidade média do vento para aquele período em que a medição foi realizada. Convencionou-se registrar a média horária da velocidade do vento, que pode ser convertida em velocidades médias para outras durações pela relação descrita na equação (5), a qual originou o gráfico da Figura 8. Este gráfico é utilizado para se estimar o coeficiente de correção da intensidade do vento (R_U) em função da duração do vento (t) e da velocidade média horária do vento (U_{3600}).

$$R_U = \frac{U}{U_{3600}} = 1,277 + 0,295 \tanh \left[0,9 \log_{10} \left(\frac{45}{t} \right) \right] \quad (5)$$

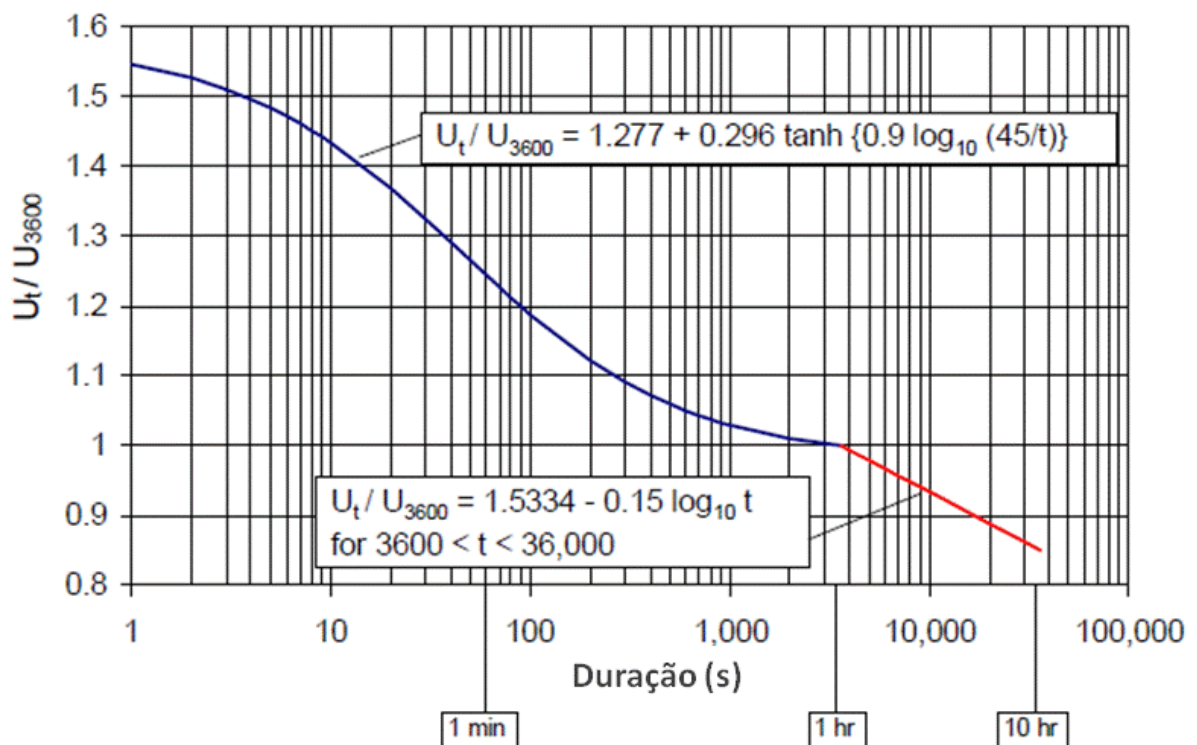


Figura 8 – Coeficiente de correção devida à velocidade média
Fonte: U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984

2.2.1.5 Coeficiente de arraste

Nos modelos numéricos para previsão de ondas é utilizada a velocidade de atrito (u^*) relacionada com o coeficiente de arraste do vento sobre a superfície. Esta

velocidade de atrito é definida de maneira empírica por meio da equação 6, onde U é a velocidade do vento (*U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 1983*):

$$u^* = 0,71 (U)^{1,23}. \quad (6)$$

2.3 ONDAS

As ondas geradas pela ação dos ventos sobre grandes espelhos de água, objeto de estudo deste trabalho, tem a gravidade como força restauradora do movimento oscilatório e, por isso, são chamadas de ondas gravitacionais. Segundo Kisman (1965), esse tipo de ondas apresenta período que varia de 1 a 30 s.

Em águas interiores, uma vez considerada a hipótese de águas profundas, a magnitude das ondas depende principalmente da intensidade do vento e da extensão da pista sobre a qual o vento escoa em contato com a água (*fetch*). Entre os impactos decorrentes da formação de ondas em lagos e reservatórios destacam-se o aumento da erosão das margens e risco à navegação.

2.3.1 Fenomenologia das Ondas Geradas pelo Vento

A principal característica das ondas de interesse nas aplicações de engenharia é a altura de onda. De acordo com Kamphuis (2000), as ondas podem ser medidas por meio de observações visuais, por imagens aéreas ou de satélite (medição remota), por boias ou ondógrafos (medição local) e pelo emprego de simulação computacional.

A partir da observação visual, devido à falta de precisão deste tipo de medição, foi introduzido um importante conceito na análise da altura de onda. A percepção humana tende a considerar somente a média do terço das maiores ondas (LONGUET-HIGGINS, 1952 *apud* MARQUES, 2013), definindo-se, portanto, a altura significativa da onda ($H_{1/3}$) como a média aritmética dessas ondas observadas.

Quando o vento, geralmente de intensidade e direção irregulares, incide sobre a superfície d'água, são formadas inúmeras ondas de alturas e períodos distintos, fazendo com que a variação do nível d'água observada seja a combinação

(interferência) entre estas ondas geradas. Portanto, pode-se relacionar o registro de ondas a um espectro. A altura de uma onda senoidal isolada é descrita pela seguinte equação:

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t), \quad (7)$$

sendo a amplitude da onda, $\eta(x, t)$ o nível d'água no ponto x e no tempo t , k o número de onda relacionado ao comprimento da onda (L) e ω é a frequência angular relacionada ao período da onda (T).

A Figura 9 ilustra os elementos de uma onda senoidal. A altura de onda (H) é definida como a distância vertical entre a crista (parte superior) e o cavado (parte inferior), ou seja, é o dobro da amplitude (a). O comprimento de onda (L) é a distância horizontal entre duas cristas (ou cavados) consecutivas. O intervalo entre a passagem de duas cristas (ou cavados) consecutivas pelo mesmo ponto define o período (T). O inverso do período, ou seja, a quantidade de cristas (ou cavados) que passa pelo mesmo ponto em um segundo é chamada de frequência (f). A velocidade de propagação (c) é a velocidade de deslocamento do perfil da onda, definida como o quociente entre o comprimento (L) e o período (T), e também é conhecida como velocidade de fase ou celeridade. A profundidade (d) é a distância vertical entre o nível d'água ($z = 0$) e o fundo do meio.

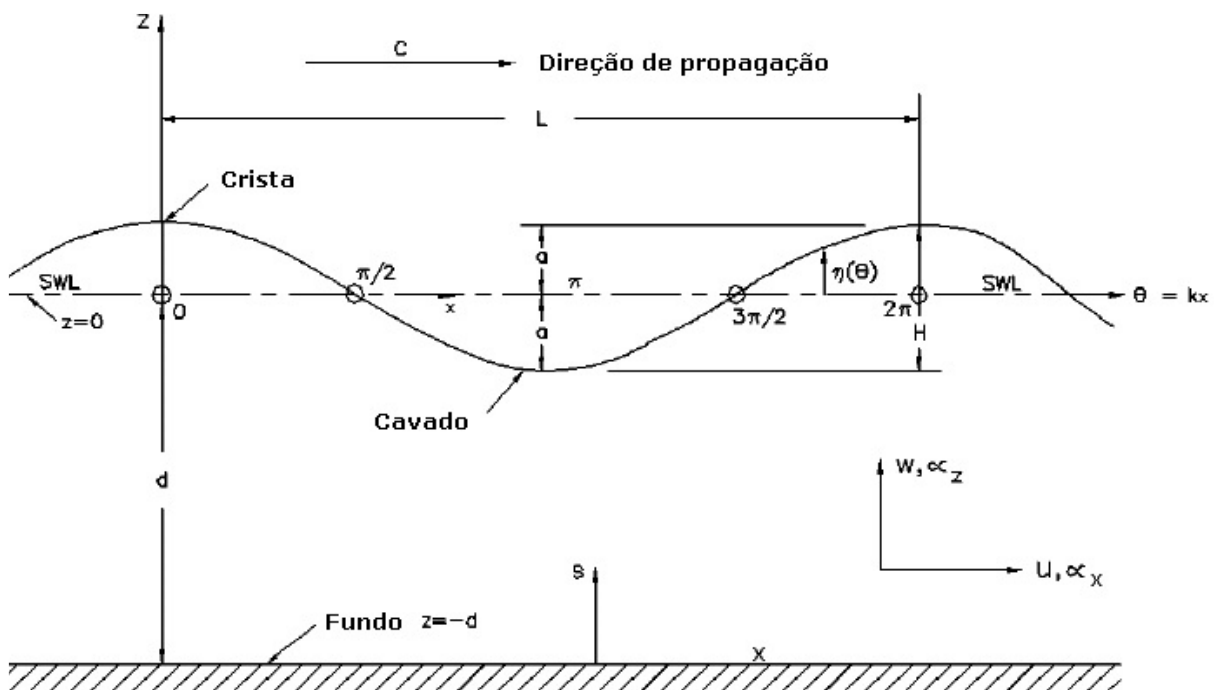


Figura 9 – Elementos de uma onda senoidal
Fonte: Marques (2013)

Segundo Marques (2013), em condições de águas profundas ($d > L/2$) as ondas não têm suas características afetadas pelo efeito da profundidade. Contudo, em água rasas ($d < L/2$) o movimento atinge o fundo, fazendo com que o atrito provoque redução da celeridade sem que o período seja afetado significativamente. Conseqüentemente, é observada uma redução no comprimento da onda e aumento de sua amplitude. Esta interferência do fundo pode fazer com que a onda quebre, dissipando energia por meio da turbulência.

A formação de ondas em superfícies de águas interiores se dá por conta da transferência de energia mecânica do vento para a água. De acordo com o Shore Protection Manual (U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESERCH CENTER, 1984) este fenômeno se deve a três processos fundamentais: ganho de energia pelo vento, perdas dissipativas e interações entre ondas.

A energia é transferida sempre que as velocidades e densidades dos fluidos forem suficientemente diferentes para que exista uma tensão tangencial capaz de provocar instabilidades na interface dos dois elementos. Holthuijsen (2007) aborda o fenômeno de geração de onda pelo vento como resultado de dois processos, que podem ser mais facilmente entendidos com o auxílio da ilustração da Figura 10. Primeiramente, a turbulência do escoamento de ar sobre a superfície líquida não perturbada provoca pequenas variações de pressões, fazendo com que as ondas comecem a se desenvolver. Após determinado grau de desenvolvimento, a amplitude da onda é tal que passa a afetar a o fluxo de vento sobre ela, criando uma região de pressão negativa ou sucção.

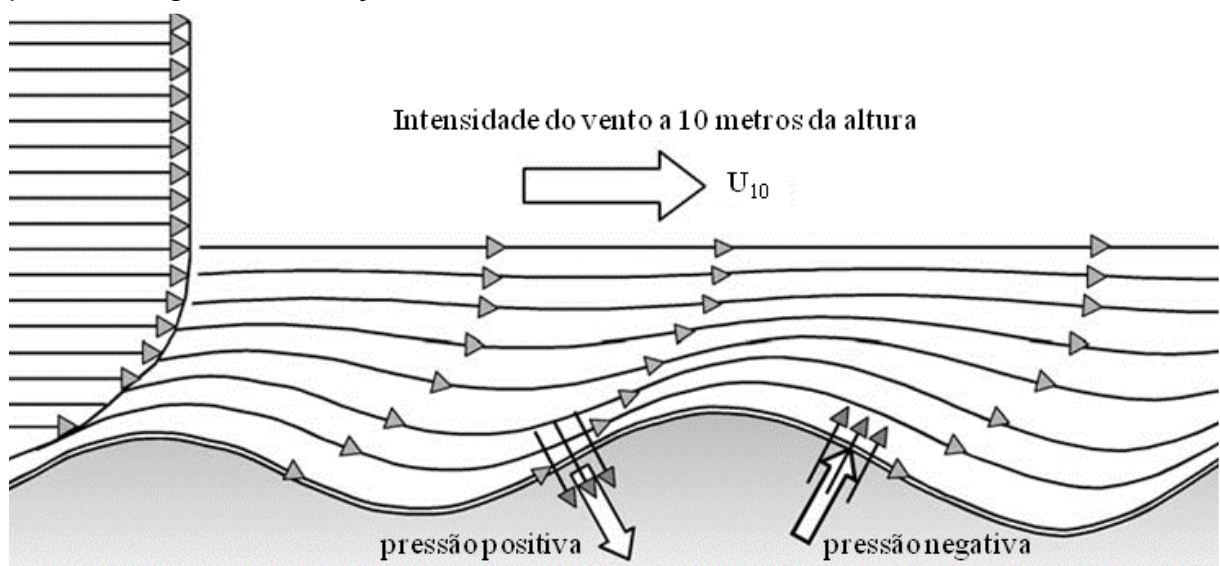


Figura 10 – Geração de ondas pelo vento
 Fonte: Holthuijsen (2007)

Quando as ondas se aproximam da costa, a influência da profundidade passa a afetar o transporte de energia mecânica fazendo com que haja significativa dissipação de energia, que pode ser verificada pela redução da velocidade e do comprimento de onda e pelo conseqüente aumento da amplitude (SILVEIRA e VARRIALE, 2005). Este fenômeno é conhecido como refração e pode ser desprezado para situações de água profundas, nas quais se encontram a maioria dos reservatórios brasileiros.

2.3.2 Modelos para Previsão de Ondas

A necessidade de se estimar a altura de ondas teve origem em regiões oceânicas. Inicialmente, foram desenvolvidos modelos empíricos para previsão de ondas, destacando-se a classificação contida na escala Beaufort. Esta escala foi criada a partir de observações visuais pelo almirante inglês Francis Beaufort em 1806 e adotada pela Marinha Inglesa em 1834 (CANDELLA, 1997). Por meio dela é possível se obter uma relação entre a intensidade do vento e o estado do mar, divididas em treze classes (0 a 12).

Durante a segunda guerra mundial o aumento do interesse em se prever o estado do mar, principalmente para o desembarque de tropas anfíbias, fez com que surgissem modelos paramétricos para previsão. Tais modelos para estimativa de altura de ondas utilizam equações parametrizadas em elementos como intensidade e duração do vento e *fetch*.

Sverdrup e Munk (1947) construíram uma formulação paramétrica que recebeu grande aceitação no meio científico. Este método foi aperfeiçoado posteriormente por Bretschneider (1966), sendo referido pelas letras iniciais dos sobrenomes de seus autores (SMB). O método paramétrico SMB utiliza a análise dimensional para relacionar as características das ondas com as suas condicionantes. Os grupos adimensionais considerados nesta análise são:

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = f\left(\frac{gF}{U^2}, \frac{gt}{U}, \frac{gd}{u^2}, \frac{W}{F}\right), \quad (8)$$

sendo $H_{1/3}$ a altura significativa, F o *fetch*, t a duração e U a intensidade do vento, d é a profundidade local e W a largura da área afetada pelo vento.

A largura (W) é relevante somente para os casos em que é muito inferior à dimensão do *fetch* (F), como em canais estreitos, podendo ser desconsiderada para os demais casos. A influência da profundidade pode ser desprezada para o caso de águas profundas, já definido anteriormente. Para reservatórios de maneira geral, onde os comprimentos das pistas de vento são da ordem de dezenas de quilômetro, diz-se que as ondas são do tipo limitadas pelo *fetch* e não pela duração, podendo se eliminar o grupo adimensional relacionado com o tempo (MARQUES e GUETTER, 2011). Sendo assim, a equação (9) se reduz a:

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = f\left(\frac{gF}{U^2}\right). \quad (9)$$

De acordo com Marques (2013), o método SMB foi revisado por vários autores, os quais propuseram coeficientes diversos para relacionar os parâmetros adimensionais da equação (9). A versão do método aqui apresentada foi proposta por *United States Department of the Interior – Bureau of Reclamation* (1973) para estimativa da altura significativa ($H_{1/3}$) e do período de pico significativo ($T_{1/3}$):

$$H_{1/3} = \frac{U_{10}^2}{g} 0,283 \tanh\left[0,0125\left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{0,42}\right], \quad (10)$$

$$T_{1/3} = \frac{U_{10}}{g} 7,54 \tanh\left[0,077\left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{0,25}\right]. \quad (11)$$

O método SMB considera o vento com intensidade e direção constantes. Um método paramétrico alternativo que contempla a variação da força exercida pelo vento foi proposto por Wilson (WILSON, 1961 apud MARQUES, 2013).

Donelan (1980) propôs um conjunto de equações paramétricas desenvolvidas em águas continentais que consideram os casos em que a direção de propagação das ondas não coincide com a direção do vento (Figura 4). Deste modo, estas equações (12 e 13), que relacionam a altura característica (H_c) e a frequência de pico (f_p) com o *fetch* e a intensidade do vento, possuem uma função cosseno do ângulo entre a direção das ondas e do vento e seus coeficientes foram determinados a partir de dados coletados no lago Ontário (EUA).

$$H_e = 0,00366g^{-0,62}F^{0,38}(U \cos\theta)^{1,24}, \quad (12)$$

$$f_p = 0,54g^{-0,77}F^{-0,23}(U \cos\theta)^{-0,54}, \quad (13)$$

onde θ é o ângulo entre a direção do vento e a direção de propagação das ondas e o *fetch* (F) é definido como o comprimento livre na direção oposta ao vento.

A análise espectral de ondas possibilitou a inserção do conceito de energia de onda, o que contribuiu para a elaboração de outros modelos paramétricos de previsão baseados neste conceito (MARQUES, 2013), tais como os métodos PNJ (PIERSON et al., 1955) e JONSWAP (HASSELMANN et al., 1973).

Pierson et al. (1995) desenvolveram um método pioneiro na utilização do espectro de potência das ondas, conhecido como PJN em referência aos três autores. Tal método, que considera a situação de mar completamente desenvolvido, isto é, sem limitação do *fetch* e da duração do vento, é descrito matematicamente por meio de uma função que relaciona o quadrado das alturas das vagas com a frequência (KOMEN et al., 1994).

Outro modelo desenvolvido a partir da análise do espectro de energia das ondas foi elaborado durante o projeto JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*). Trata-se de uma série de medições e levantamentos realizados no Mar do Norte entre 1968 e 1969, em uma faixa que se estende 160 km a partir da costa da ilha de Silty na Alemanha, com a finalidade de se estudar a geração de ondas pelo vento (HASSELMANN et al., 1973). A partir dos dados coletados foram formuladas as equações paramétricas para intensidade do vento constante, considerando as ondas limitadas pelo *fetch* (equações 14 e 15) e aquelas limitadas pela duração do vento (equações 16 e 17).

Para a altura ($H_{1/3}$) e o período ($T_{1/3}$) de ondas limitadas pelo *fetch* (F), têm-se:

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0,0016 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{U} = 0,286 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (15)$$

Para a altura ($H_{1/3}$) e o período ($T_{1/3}$) de ondas limitadas pela duração do vento (t), têm-se:

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 8,29 \cdot 10^{-5} \left(\frac{gt}{U}\right)^{\frac{5}{7}}, \quad (16)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{U} = 0,0676 \left(\frac{gt}{U}\right)^{\frac{3}{7}}, \quad (17)$$

sendo que, para ondas limitadas pela duração (t), admite-se a seguinte relação:

$$\frac{gT_{1/3}}{U} = 68,8 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{\frac{2}{3}}. \quad (18)$$

Com a evolução dos recursos computacionais surgiram os modelos numéricos de base física, os quais apresentam soluções concebidas a partir da aplicação de métodos numéricos que contemplam múltiplas variáveis, capazes de gerar resultados mais próximos à realidade. Segundo Marques (2013), nestes modelos são considerados os mecanismos de geração e dissipação de onda, influência das condições topo-batimétricas locais, influências não lineares decorrentes de interação entre ondas e a possibilidade de se considerar campo de vento variável.

Existe uma grande variedade de modelos numéricos que foram desenvolvidos nas últimas décadas, sendo alguns deles abordados de maneira mais aprofundada por Candella (1997). Apesar de haver esta diversidade, todos os modelos têm em comum a simulação de processos físicos relevantes na formação de ondas pelo vento.

De maneira geral, estes modelos possuem um termo fonte (S) composto pela energia fornecida pelo vento (S_{in}), pela transferência não linear de energia resultante da interação entre ondas (S_{nl}) e pela dissipação de energia (S_{ds}) (MARQUES, 2013). Segundo Candella (1997), é possível classificar os diferentes modelos de acordo com a determinação do termo de interação não linear (S_{nl}) em primeira, segunda e terceira geração.

Um exemplo de modelo numérico para previsão de ondas é o WAN (KOMEN et al., 1994). Trata-se de um modelo de terceira geração e, portanto, diferentemente dos modelos de primeira e segunda geração que possuem o termo fonte de dissipação

(S_{ds}) parametrizado, calcula o espectro de onda por integração direta de uma equação do balanço de energia. O WAN é base para outros modelos que recebem esta denominação no sufixo, como, por exemplo, o modelo SWAN (BOOIJ et al., 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREAS DE ESTUDO

Neste trabalho serão estudados os reservatórios de Salto Caxias e Itaipu, ambos formados pela implantação de usinas hidrelétricas localizadas no estado do Paraná, região sul do Brasil. Estas áreas foram selecionadas por estarem próximas geograficamente, sujeitas às mesmas condições meteorológicas, e por possuírem seus comprimentos principais em direções aproximadamente perpendiculares entre si, além da importância energética referente às respectivas usinas.

3.1.1 Reservatório de Salto Caxias

A Usina Hidrelétrica Governador José Richa, originalmente chamada de Salto Caxias, está localizada na divisa dos municípios de Capitão Leônidas Marques (margem direita) e Nova Prata do Iguaçu (margem esquerda), no trecho conhecido como Baixo Rio Iguaçu, sendo a última barragem antes que este rio deságue no Rio Paraná.

A primeira unidade geradora desta usina, administrada pela Companhia Paranaense de Energia (Copel), começou a operar em fevereiro de 1999. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), seu reservatório possui uma área inundada de 85 km² e profundidade média de aproximadamente 25 m, armazenando, portanto, cerca de 3,5 bilhões de m³ de água. A Figura 11 representa o formato da margem deste reservatório obtida por uma imagem de satélite.

É a terceira maior central geradora operada pela Copel, com 1.240 MW de capacidade instalada, e taxa recorde de 7,46 bilhões de KWh produzidos no ano de 2010. Sua barragem, que de acordo com a Copel é a maior estrutura em volume construída a partir de concreto compactado com rolo no país, possui 1.100 m de comprimento e altura de 67 m.

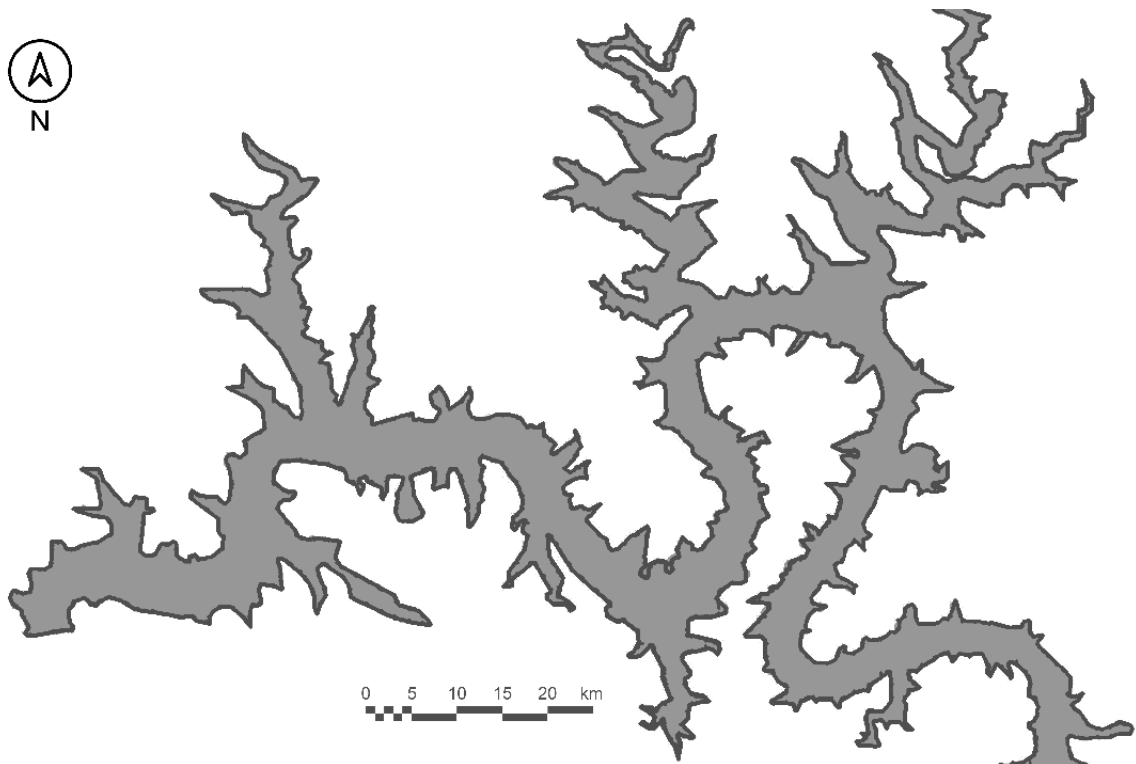


Figura 11 – Imagem de satélite do reservatório de Salto Caxias
Fonte: adaptado de Marques e Andrade (em preparação)

3.1.2 Reservatório de Itaipu

A usina hidrelétrica de Itaipu é chamada binacional por pertencer a Brasil e Paraguai, estando localizada no Rio Paraná na divisa entre estes países, no oeste do estado brasileiro do Paraná, conforme ilustrado na Figura 12. Sua operação teve início em 1984 e desde então já foram produzidos 2,3 bilhões de MWh. É a segunda maior usina hidrelétrica em geração de energia do mundo, com potência instalada de 14.000 MW e sua maior produção anual de energia elétrica foi estabelecida em 2013, quando foram produzidos 98,63 milhões de MWh.

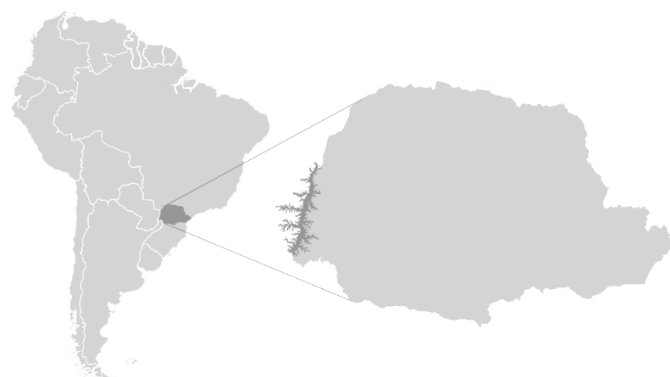


Figura 12 – Localização do lago de Itaipu.
Fonte: adaptado de Marques et al., 2013

De acordo com as informações disponíveis no site da administração da usina, seu reservatório possui uma superfície de 1.350 km², com aproximadamente 170 km de extensão, largura média de 7 Km e profundidade média de 22,5 m, chegando a 170 m nas proximidades da barragem, resultando em um volume do nível máximo normal de 29 bilhões de m³ de água. É apenas o sétimo maior reservatório do Brasil em termos de espelho d'água, no entanto, possui o maior índice de produção relativo à área inundada com 10,4 MW/km². Devido à grande extensão do lago e o maior interesse nos valores de *fetch* e altura de onda próximos à barragem, será adotada somente a porção sul do reservatório, em destaque na Figura 13, equivalente a uma

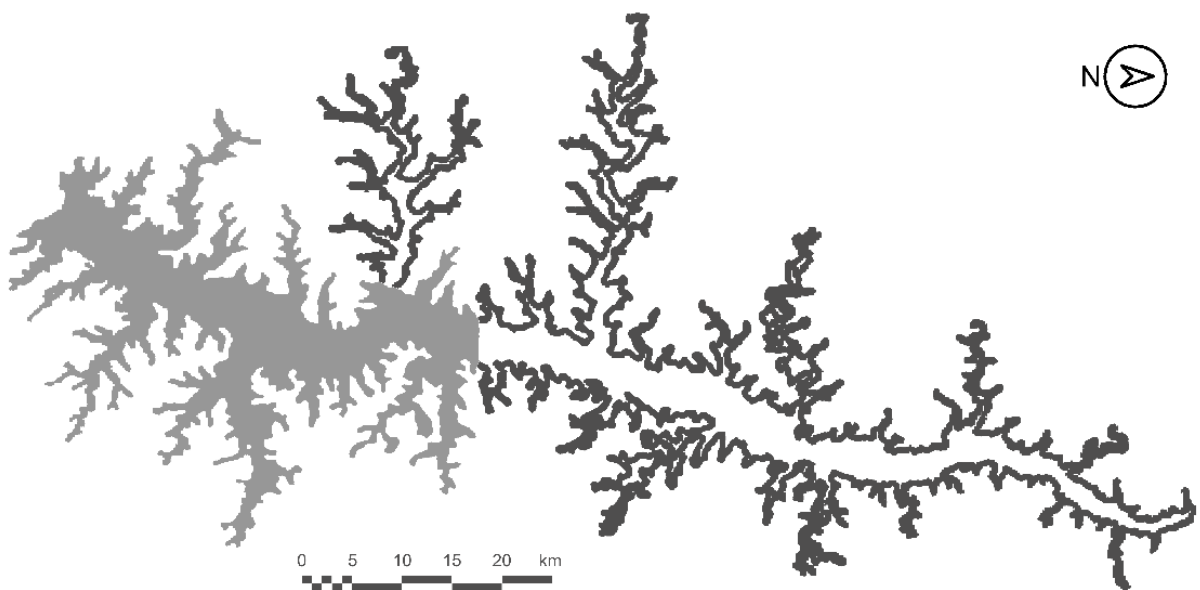


Figura 13 – Delimitação do lago de Itaipu, com a porção sul em destaque
Fonte: Adaptado de Marques et al. (2013)

área de 600 km².

3.2 SOFTWARE ONDACAD

Para fazer o cálculo do *fetch* de maneira automatizada e a simulação da altura significativa das ondas para uma dada intensidade do vento será utilizado o modelo computacional ONDACAD. Este software foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, apresentado pela primeira vez por Marques e Guetter (2011) e descrito mais detalhadamente por Marques (2013). Atualmente encontra-se em fase de testes e aprimoramentos, não sendo um software de domínio público.

Inicialmente, determina-se o traçado da margem do corpo d'água a partir de um mapa, uma foto aérea ou uma imagem de satélite, sendo esta última opção a adotada no presente trabalho. Com a geometria da superfície definida, são estabelecidas a dimensão e a orientação da malha utilizada para discretizar a área de estudo. O programa aplica o método de cálculo de *fetch* selecionado em cada nó da malha, resultando em um campo de *fetch*. A precisão deste campo é tanto maior quanto melhor for a resolução da malha, a qual é calculada pela seguinte equação:

$$\phi = \left(\frac{A}{N}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

onde ϕ é a distância entre os nós da malha, A é a área da superfície do corpo d'água e N é o número de nós. O número de nós é função direta do tempo de processamento computacional disponível. A quantidade de nós considerada adequada para um duplo processador de 2.1 GHz em um computador pessoal com 4 GB de memória RAM é da ordem de 15.000 (MARQUES et al., 2013).

Desta forma, aplicando-se a equação (19) para os reservatórios de Salto Caxias e Itaipu são encontradas as resoluções das malhas de 75 m e 200 m respectivamente. O tempo estimado para se obter o campo de *fetch* desta quantidade de pontos (15.000) é de 5,5 horas em um computador equipado com duplo processador de 2.1 GHz e 4 Gb de memória RAM.

Devido à necessidade de se combinar informações gráficas ao processamento matemático, os autores decidiram desenvolver o programa na linguagem computacional LISP, a qual possui flexibilidade suficiente na manipulação de estruturas de dados genéricos aliada a uma essencial interface gráfica. Segundo Marques e Andrade (em preparação) o principal desafio na elaboração deste software é adaptar um programa de natureza geométrica de modo a se comportar como um modelo de natureza numérica. Tal problemática foi contornada por meio do emprego da linguagem AutoLISP, que consiste na linguagem LISP em um ambiente AutoCAD.

Na Figura 14 é possível observar os elementos envolvidos na determinação do campo de *fetch* a partir da execução do programa ONDACAD para um reservatório de margens tipicamente dendríticas e para o vento de direção norte, na qual o processo de aplicação do método de Saville foi propositalmente interrompido. Podem-se verificar as linhas auxiliares para a determinação do *fetch* efetivo, a malha utilizada

para definir os pontos de cálculo e a delimitação da geometria do reservatório. Nesta imagem, o campo de *fetch* já foi parcialmente obtido.

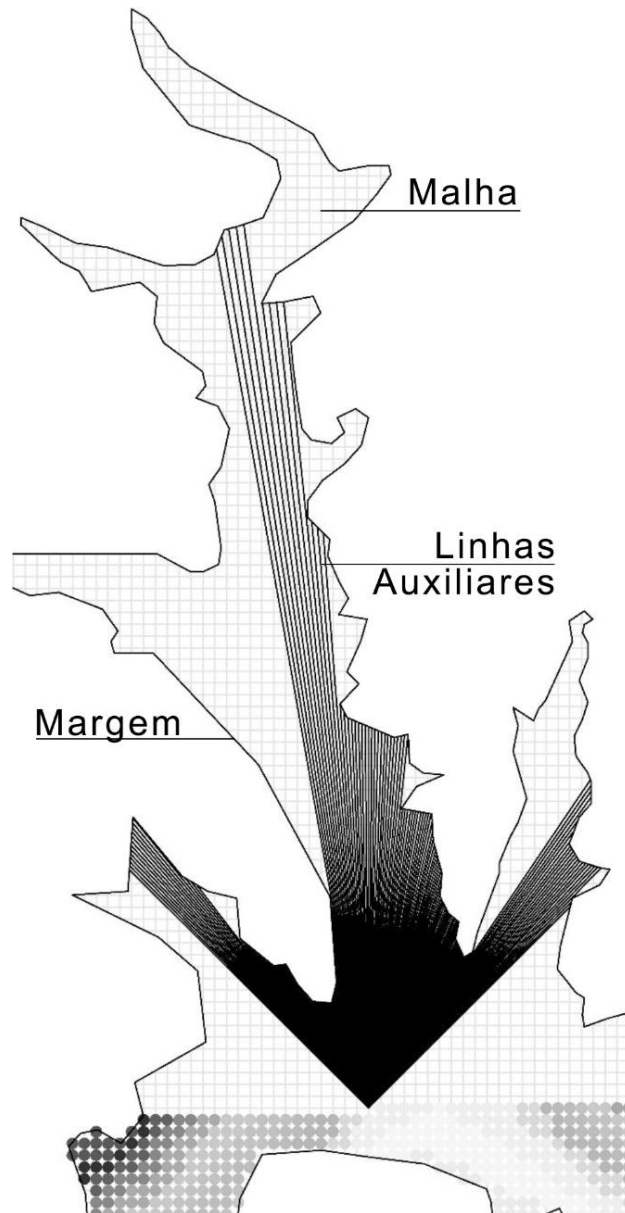


Figura 14 – Detalhe dos elementos gráficos envolvidos na execução do modelo
Fonte: adaptado de Marques e Andrade (artigo aceito no *Lake and Reservoir Management*)

A execução do modelo computacional é bastante simples e direta. O usuário deve inserir o formato das margens do reservatório, cujas coordenadas são estabelecidas diretamente no display do AutoCAD, a distância entre os pontos da malha e a direção da mesma, ambas inseridas na linha de comando do AutoCAD. É necessária uma etapa de pré-processamento para gerar a malha, a qual é repetida somente uma vez para cada direção do vento considerada.

A execução do *software* ONDACAD gera 16 arquivos no formato *ascii*, um para cada direção principal do vento. Tais arquivos apresentam os dados em três colunas, sendo que as duas primeiras referem-se à latitude e longitude do ponto, respectivamente, e a terceira ao valor do *fetch* associado em metros. A partir destes arquivos são gerados mapas cromáticos dos campos de *fetch* do reservatório.

Para a simulação da altura significativa das ondas geradas por ventos no reservatório de Salto Caxias serão utilizadas equações paramétricas. Tais equações relacionam a altura significativa diretamente com o *fetch* para uma dada direção do vento. Esta relação pode ser genericamente expressa por:

$$H^* = \alpha F^{*\beta}, \quad (20)$$

onde H^* e F^* são os parâmetros adimensionais relacionados à altura significativa da onda e ao *fetch*, respectivamente. Estes parâmetros são definidos de acordo com as seguintes equações:

$$H^* = \frac{gH}{U_{10}^2}, \quad (21)$$

$$F^* = \frac{gF}{U_{10}^2}, \quad (22)$$

em que H é a altura significativa da onda, F é o *fetch*, g é a aceleração da gravidade e U_{10} é a velocidade média do vento em um nível de 10 m acima da superfície da água.

Para que seja possível assumir essa relação direta entre *fetch* e altura significativa da onda devem-se considerar uma série de simplificações, já descritas no capítulo de revisão bibliográfica. Dentre estas considerações, destacam-se a independência da profundidade do corpo d'água e da duração do vento, assumindo-se que as ondas se propagam em águas profundas e que está estabelecida a condição de campo de ondas limitado pelo *fetch*. Tais considerações são perfeitamente aplicáveis em águas interiores que possuam profundidade média maior que a metade do comprimento de onda.

Vários trabalhos já utilizaram equações paramétricas deste tipo, como os métodos derivados dos experimentos JONSWAP (HASSELMANT et al., 1973) e o

SMB (SVERDRUP e MUNK 1947, BRETSCHEIDER 1966). A diferença entre as equações utilizadas nesses estudos está na determinação dos coeficientes α e β , estando estes relacionadas à série de dados históricos de altura de onda e *fetch* das áreas estudadas.

No presente trabalho decidiu-se adotar a formulação referente ao método SMB (equação 10) para intensidades do vento de 5, 15 e 20 m/s atuando sobre o reservatório de Salto Caxias em quatro direções distintas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da aplicação do programa computacional ONDACAD. Tal ferramenta permitiu a realização do cálculo de *fetch* para uma grande quantidade de pontos distribuídos sobre as superfícies dos reservatórios estudados, considerando diferentes direções do vento, com precisão adequada e em pouco tempo de processamento.

Os campos de *fetch* resultantes para os dois reservatórios foram construídos com base no Método de Saville. Com o objetivo de se realizar uma comparação entre métodos distintos para cálculo de *fetch*, foram obtidos também os campos de *fetch* para a direção principal de cada reservatório de acordo com o Método Oceânico.

Além destes resultados relativos aos campos de *fetch*, foi realizada a simulação das alturas significativas de ondas para o reservatório de Salto Caxias, com a intenção de se estudar uma importante aplicação destes campos. Para estimar a altura de onda empregou-se um modelo paramétrico, conhecido como SMB, a partir do *fetch* efetivo calculado.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DE *FETCH*

Foram realizados os cálculos dos campos de *fetch* de ambos os reservatórios estudados para 16 direções do vento conforme o Método de Saville. A malha de Salto Caxias foi composta por elementos computacionais quadrados com lados equivalentes a 75 m, enquanto que para a malha de Itaipu foram adotados elementos com 200 m de lado. Os valores de *fetch* foram calculados para cada elemento computacional, formando assim uma distribuição bidimensional de *fetch*.

Por meio destes cálculos, realizados com o auxílio do software ONDACAD, foi possível a elaboração de mapas cromáticos que permitem visualizar a distribuição dos valores de *fetch* para cada reservatório, em todas as direções consideradas.

4.1.1 Reservatório de Salto Caxias

Após o processamento dos dados pelo programa computacional, foram construídos os mapas cromáticos que representam os campos de *fetch* para cada direção do vento do reservatório de Salto Caxias. Tais mapas estão ilustrados da Figura 15 e 16. Para o caso deste reservatório, foi adotada uma escala cromática de modo que cada coloração representa 0,2 Km, possibilitando uma melhor visualização da distribuição dos valores de *fetch*.

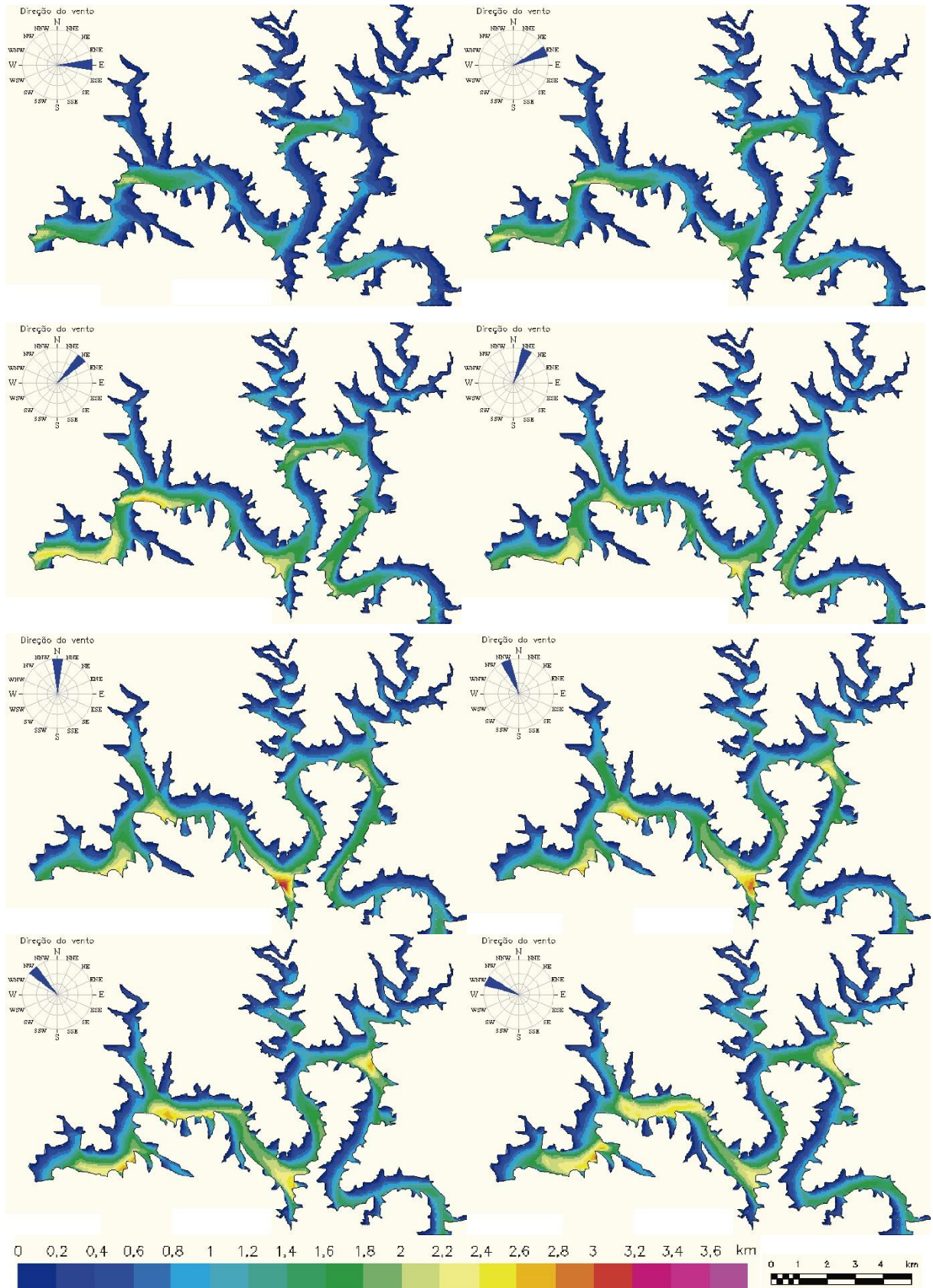


Figura 15 – Campos de fetch de Salto Caxias para as direções E, ENE, NE, NNE, N, NNW, NW e WNW.

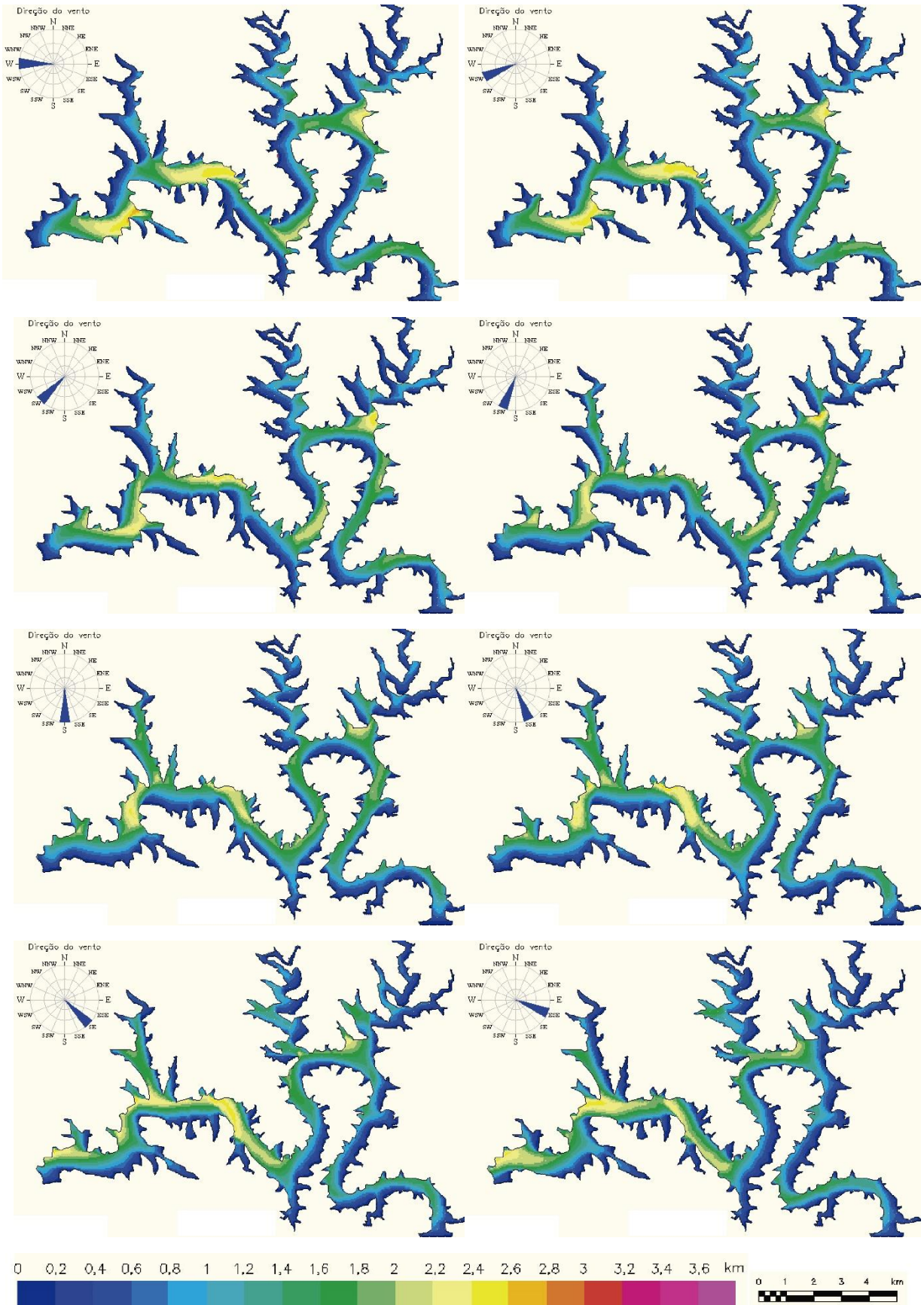


Figura 16 – Campos de *fetch* de Salto Caxias para as direções W, WSW, SW, SSW, S, SSE, SE e ESSE

Por meio da análise destes mapas cromáticos, foi possível localizar os pontos onde ocorrem os *fetches* máximos para cada direção do vento neste reservatório, conforme exibido na Figura 17. Este mapeamento dos pontos críticos é importante para identificar quais direções do vento influenciam de maneira mais contundente em determinada região a ser estudada. Por exemplo, para o dimensionamento da barragem deste reservatório as direções do vento gerador de ondas mais relevantes em relação ao *fetch* são Leste (E) e Leste-Nordeste (ENE). Contudo, não se devem desprezar as demais direções, pois pode haver propagação de ondas geradas no interior do reservatório até regiões próximas à barragem.

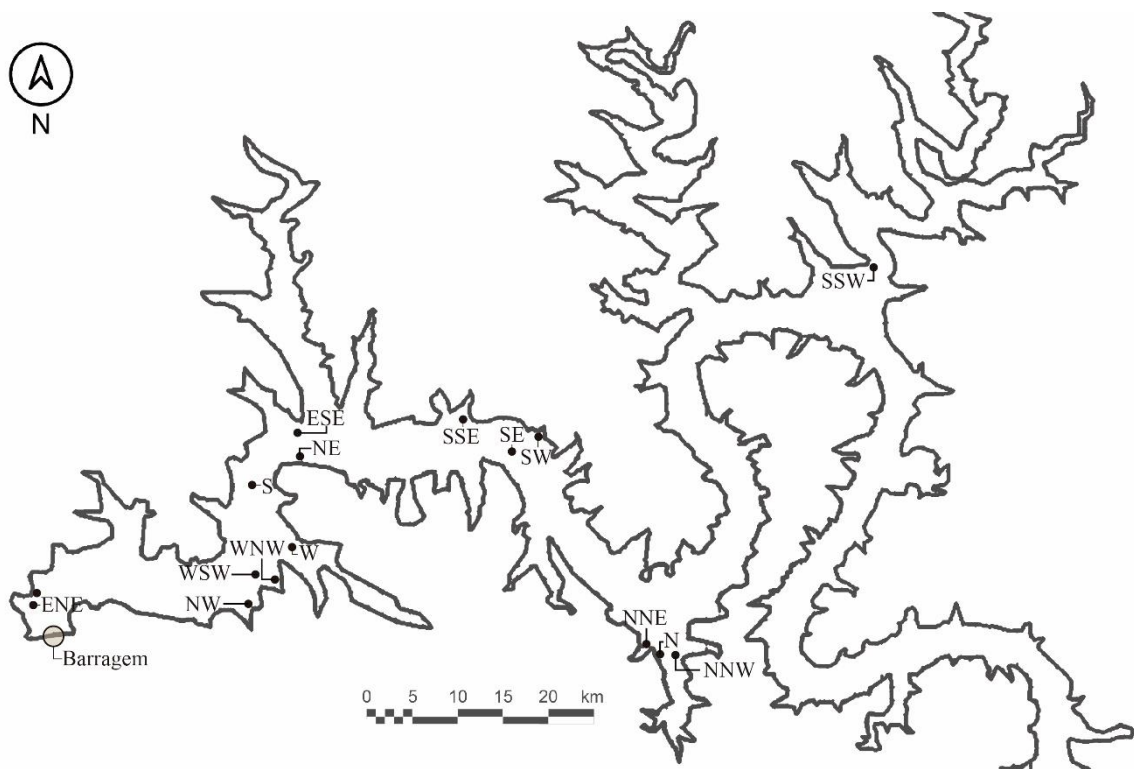


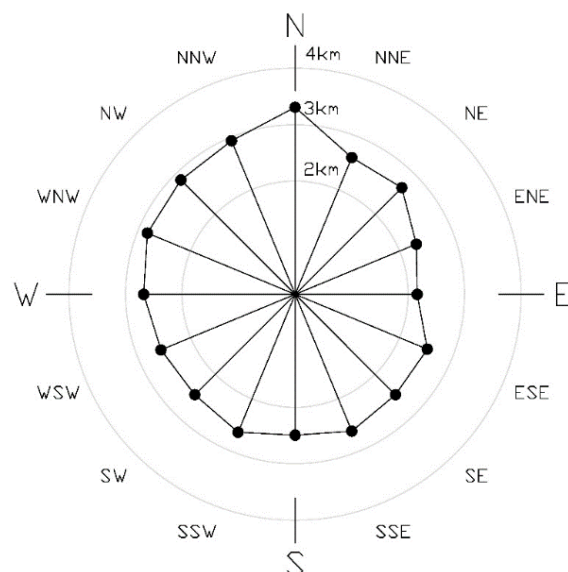
Figura 17 - Localização dos fetches máximos em Salto Caxias

Os valores de *fetch* máximos calculados com base no Método de Saville para o reservatório de Salto Caxias estão expostos na Tabela 1. Os comprimentos máximos de pista de vento variam de 2,2 km (direção Leste) a 3,3 km (direção Norte). O valor médio dos *fetches* máximos das 16 direções consideradas é de 2,6 km e o desvio padrão é de 10,0%.

Tabela 1 - Fetches máximos para Salto Caxias

Direção do Vento	Fetch (km)
E	2,2
ENE	2,3
NE	2,7
NNE	2,6
N	3,3
NNW	2,9
NW	2,9
WNW	2,8
W	2,7
WSW	2,6
SW	2,5
SSW	2,6
S	2,5
SSE	2,6
SE	2,5
ESSE	2,5

Com o intuito de se comparar os valores máximos de cada direção, os dados da Tabela 1 podem ser organizados em um gráfico radial, como mostrado na “rosa dos *fetches*” da Figura 18. Observa-se que os maiores valores de *fetches* resultantes são aqueles para as direções do vento do segundo quadrante, ou seja, de Norte à Oeste.

**Figura 18 - Rosa dos Fetches de Salto Caxias**

4.1.2 Reservatório de Itaipu

De maneira análoga ao reservatório anterior, os dados foram processados para o reservatório de Itaipu, obtendo-se os mapas cromáticos dos campos de *fetch* para 16 direções do vento (Figuras 19 a 22). A escala cromática ajustada para representar estes mapas de maneira adequada foi de 1 km para cada coloração.

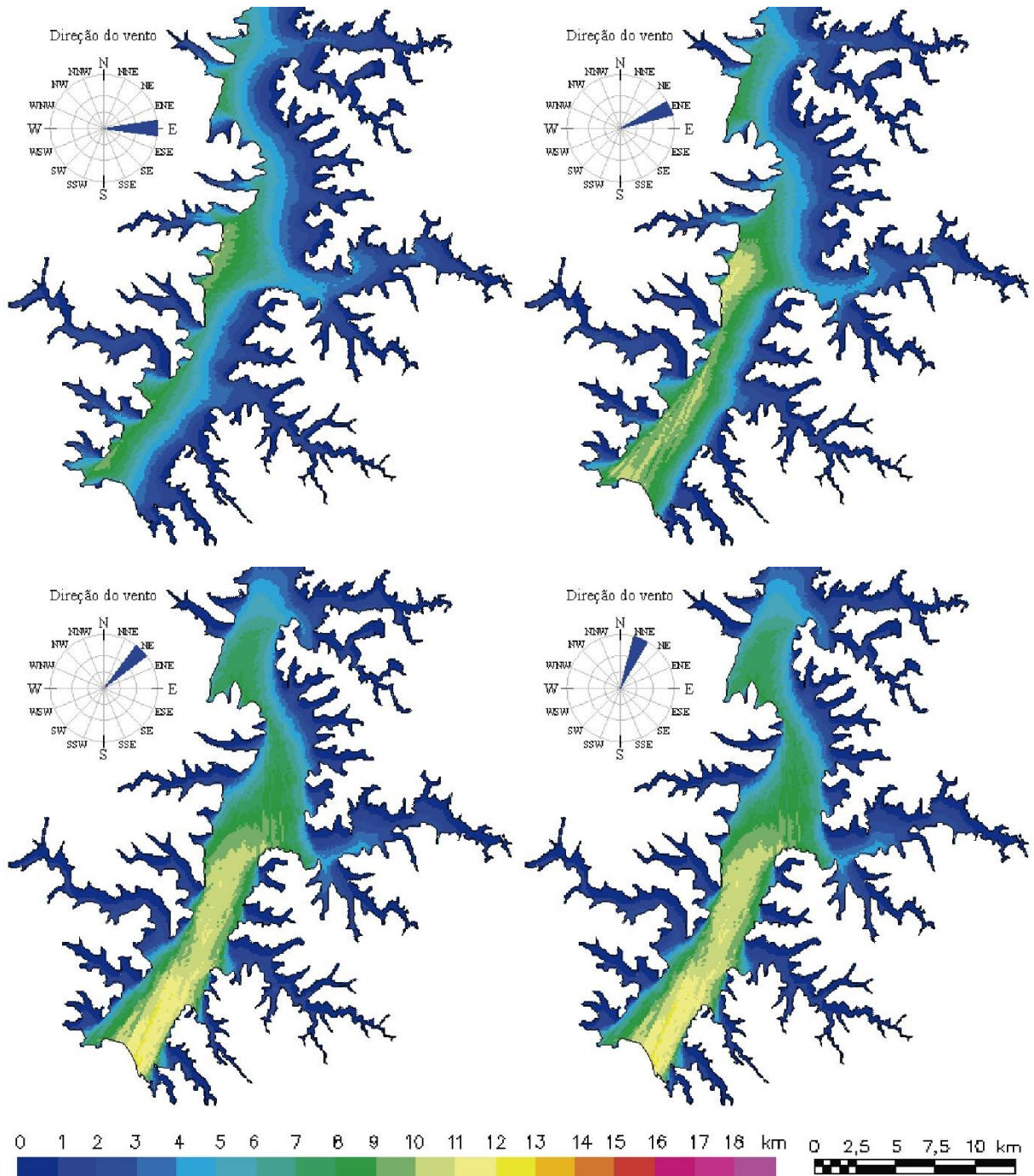


Figura 19 – Campos de fetch de Itaipu para as direções E, ENE, NE e NNE

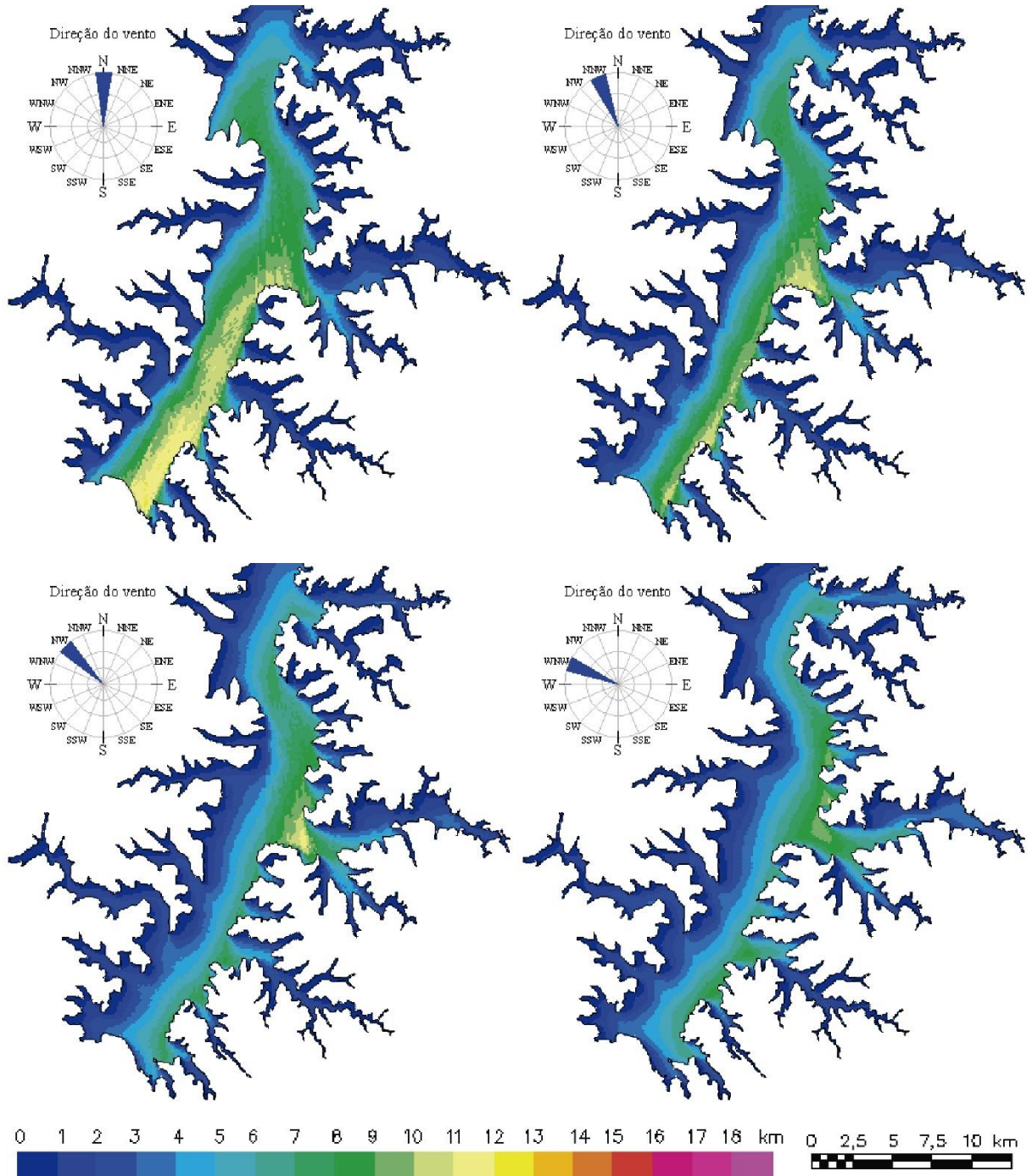


Figura 20 – Campos de fetch de Itaipu para as direções N, NNW, NW e WNW

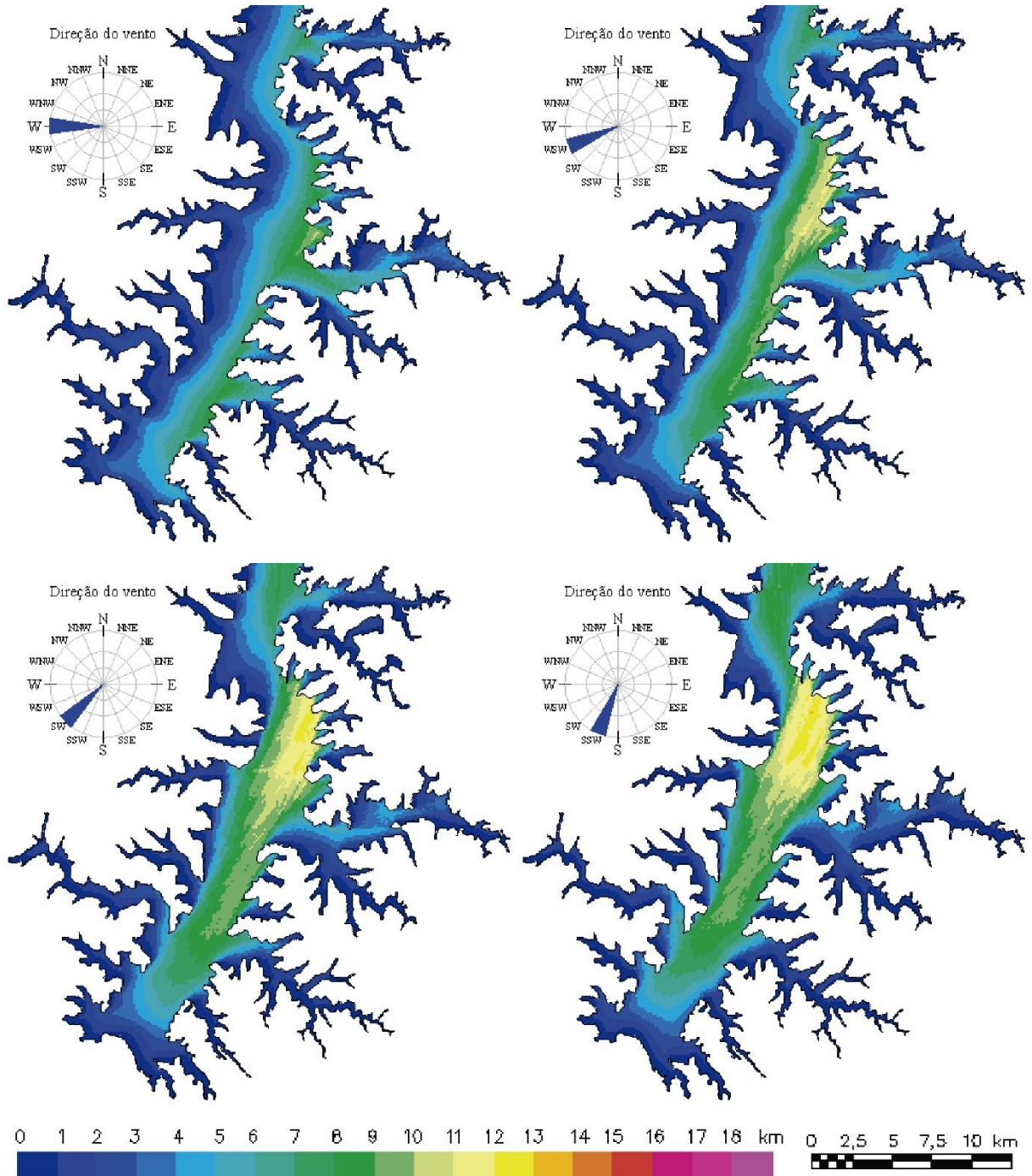


Figura 21 – Campos de fetch de Itaipu para as direções W, WSW, SW e SSW

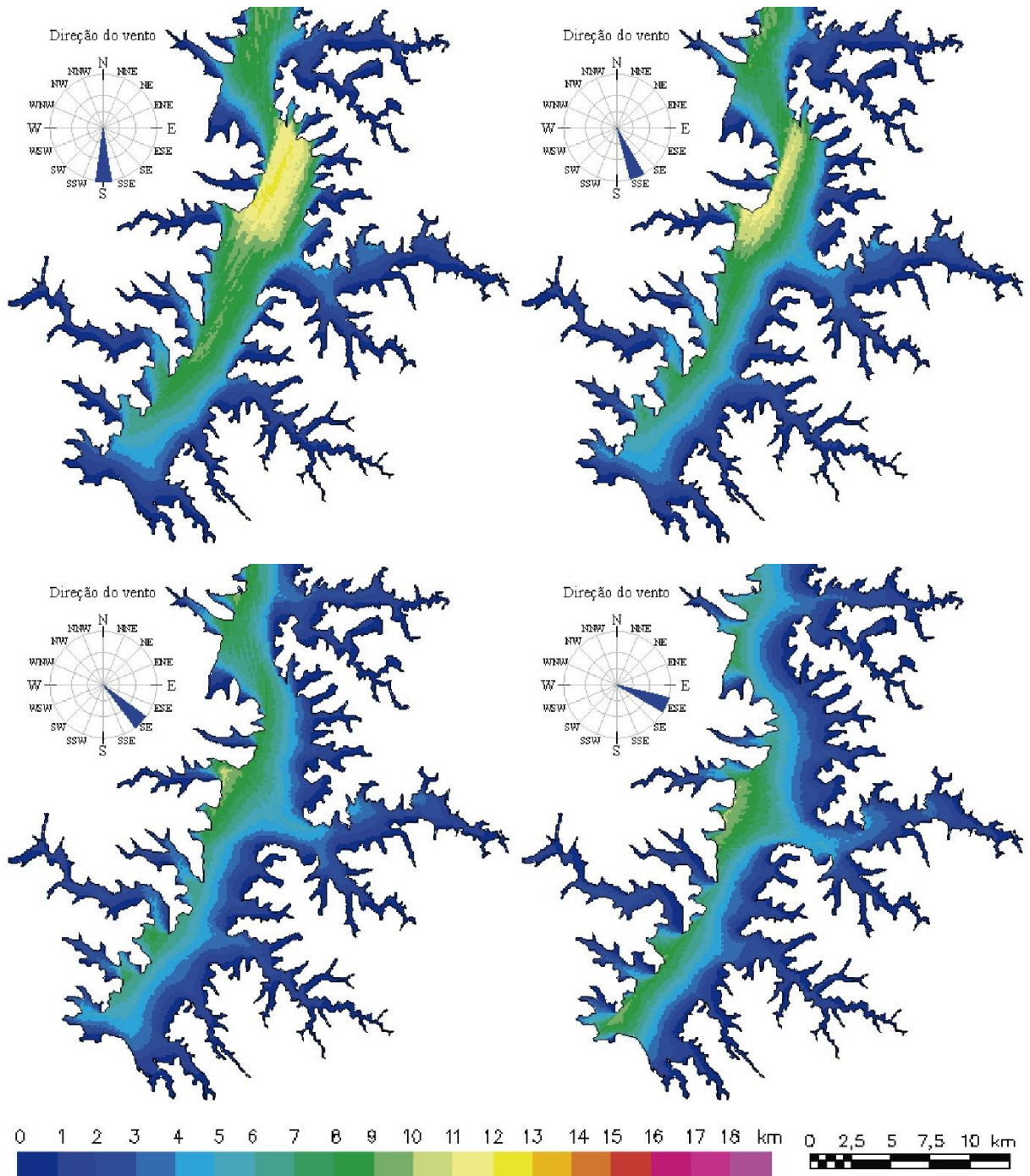


Figura 22 – Campos de fetch de Itaipu para as direções S, SSE, SE e ESE

A distribuição dos valores máximos de *fetch* para cada direção do vento está ilustrada na Figura 23. Nota-se que para três direções (N, NNE e NE) o comprimento máximo está localizado na região Sul da área estudada, mais próxima à barragem, enquanto que para as demais direções estes ocorrem em uma região na qual as margens estão mais distantes umas das outras, atenuando a interferência das mesmas sobre o valor do *fetch* efetivo.

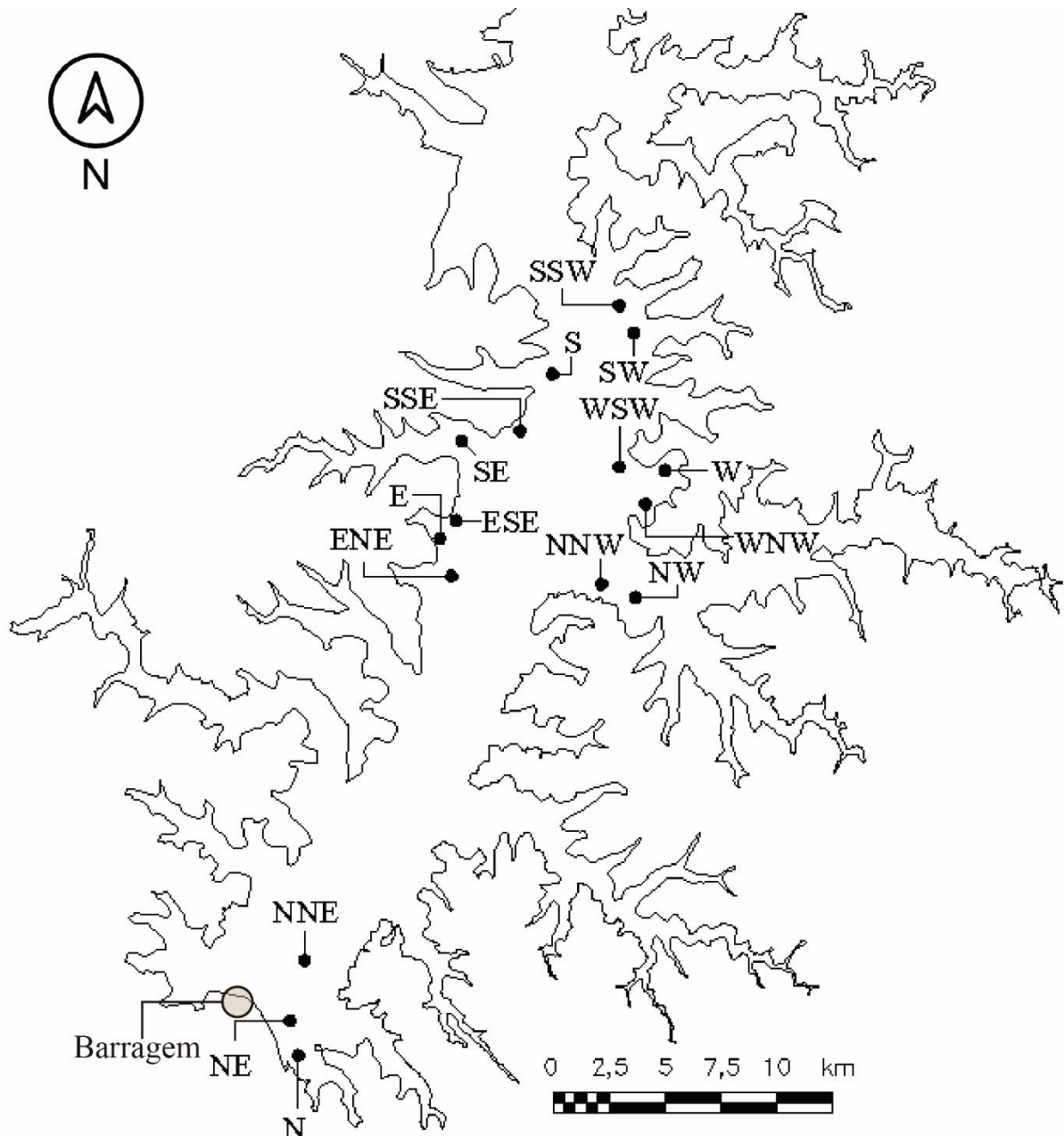


Figura 23 - Localização dos fetches máximos em Itaipu

Fonte:

Os *fetches* máximos resultantes para cada direção do vento estão relacionados na Tabela 2. Estes valores variam de 9,3 km (direção WNW) a 13,0 km

(direção SSW). A média destes valores máximos de *fetch* é de 11,2 km com desvio padrão de 9,6%.

Como se pode perceber, o *fetch* máximo calculado para este reservatório é bem maior que o valor resultante da aplicação do mesmo método de cálculo para o reservatório de Salto Caxias (cerca de quatro vezes maior), condição esta já esperada devido à diferença de dimensões entre ambas as superfícies em estudo.

Tabela 2 - Fetches máximos para Itaipu

Direção do Vento	Fetch (km)
E	10,1
ENE	11,2
NE	12
NNE	12,1
N	12
NNW	11
NW	11,1
WNW	9,3
W	10,1
WSW	11,1
SW	12,3
SSW	13
S	12,2
SSE	12
SE	10,3
ESSE	9,7

Representando-se os dados da Tabela 2 em um gráfico radial é obtido o esquema da Figura 24. Nota-se que os maiores valores de *fetch* são relativos às direções do vento pertencentes ao primeiro e terceiro quadrantes. Tal resultado se deve ao fato de o maior comprimento desta superfície ocorrer aproximadamente paralelo a estas direções.

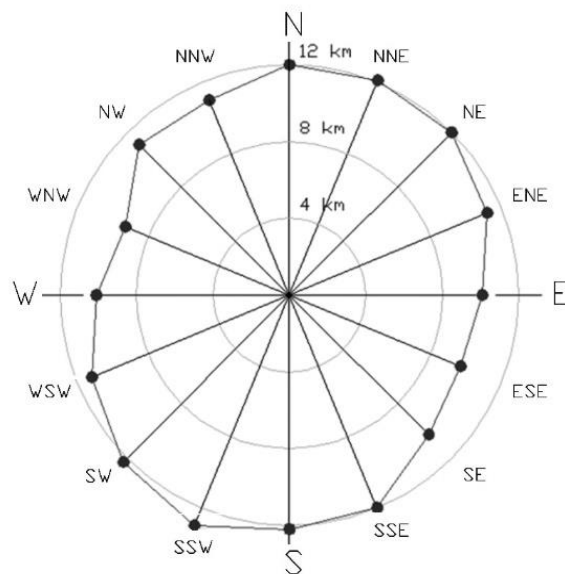


Figura 24 - Rosa dos Fetches de Itaipu

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS

Devido à diversidade de métodos para determinação do *fetch*, realizou-se o cálculo do campo de *fetch* para a direção principal de cada reservatório com base no Método Oceânico. Pode-se observar nas figuras 25 e 26 os mapas cromáticos resultantes para os reservatórios de Salto Caxias e Itaipu respectivamente, incluindo também os campos de *fetch* resultantes da aplicação do Método de Saville para as mesmas direções do vento. Como os valores resultantes para cada método de cálculo são bem diferentes, foram adotadas escalas de cores distintas para cada mapa, conforme representado nas Figuras 25 e 26.

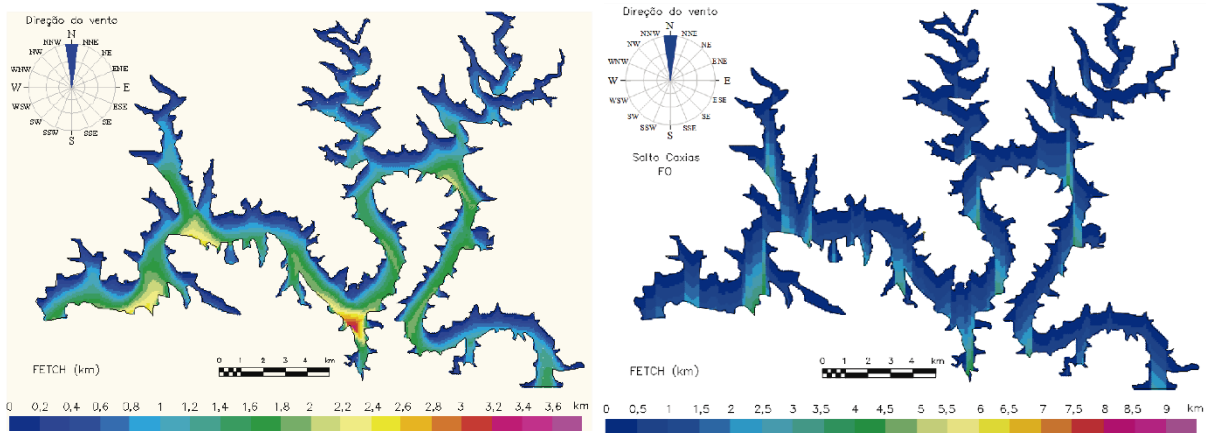


Figura 25 – Comparação entre os campos de *fetch* obtidos pelo Método de Saville (esquerda) e Oceânico (direita) para a direção Norte do reservatório de Salto Caxias

De acordo com os mapas da Figura 25, o *fetch* máximo para a direção Norte do reservatório de Salto Caxias é da ordem de 5,0 km quando calculado a partir do Método Oceânico e de 3,3 pelo Método de Saville. Portanto, o *fetch* oceânico máximo superou o *fetch* efetivo máximo em 51,5%. Pode-se observar também que estes pontos máximos estão localizados em regiões distintas para cada método utilizado.

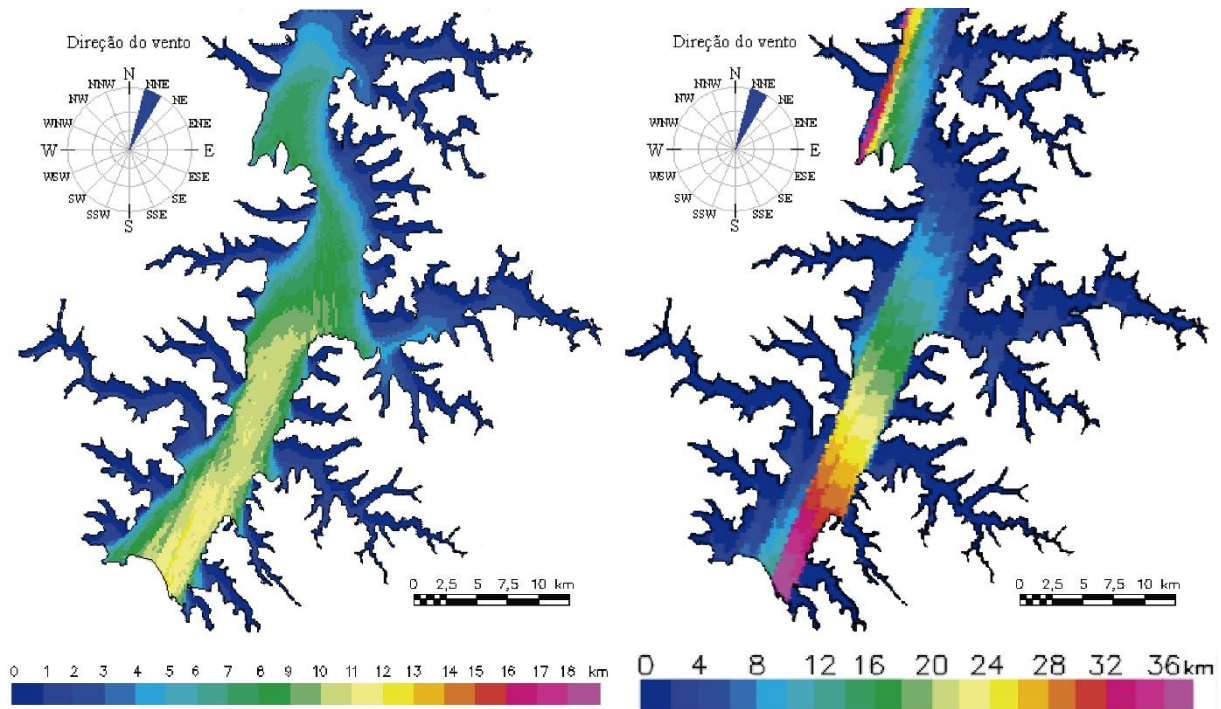


Figura 26 – Comparação entre os campos de *fetch* obtidos pelo Método de Saville (esquerda) e Oceânico (direita) para a direção Norte-Nordeste do reservatório de Itaipu

Para a direção NNE do reservatório de Itaipu (Figura 26), o *fetch* máximo calculado pela aplicação do Método Oceânico é de 36 km, enquanto que o *fetch* efetivo máximo é de 13 km. Desta forma, para os valores máximos, o *fetch* oceânico superou o efetivo em 176,9%. A exemplo do ocorrido no reservatório de Salto Caxias, neste reservatório os pontos máximos também se situam em regiões diferentes, de acordo com o método empregado.

Estes resultados confirmam a superioridade da magnitude dos valores calculados por meio do Método Oceânico em relação aos valores derivados do Método de Saville. Além disso, analisando-se a distribuição do *fetch* para cada método de cálculo em ambos os reservatórios, é possível constatar que a distribuição do *fetch* resultante do Método de Saville se assemelha mais àquela que se espera, mesmo que de forma intuitiva, da distribuição de ondas.

Cabe ressaltar que o Método de Saville foi desenvolvido de forma a se levar em consideração os efeitos das margens, ao contrário do Método Oceânico que é utilizado para fetches marítimos. Por esse motivo, os resultados do Método de Saville são os mais confiáveis para serem utilizados em aplicações envolvendo reservatórios.

4.3 DISTRIBUIÇÃO DE ONDAS

Considerando-se que a estimativa da altura de ondas é a principal aplicação do *fetch* no meio técnico, foram realizadas simulações baseadas no método paramétrico SMB, utilizando-se o modelo computacional ONDACAD. A partir dos campos de *fetch* obtidos pelo Método de Saville para o reservatório de Salto Caxias, foram estimadas as distribuições espaciais das alturas significativas de ondas para os ventos com intensidade de 5, 15 e 20 m/s, nas direções norte, sul, leste e oeste. Os mapas cromáticos destas distribuições estão mostrados nas Figuras 53, 54 e 55. A escala de cores adotada para representar as alturas de ondas foi mantida constante independentemente da intensidade do vento, de modo a colaborar na compreensão dos resultados.

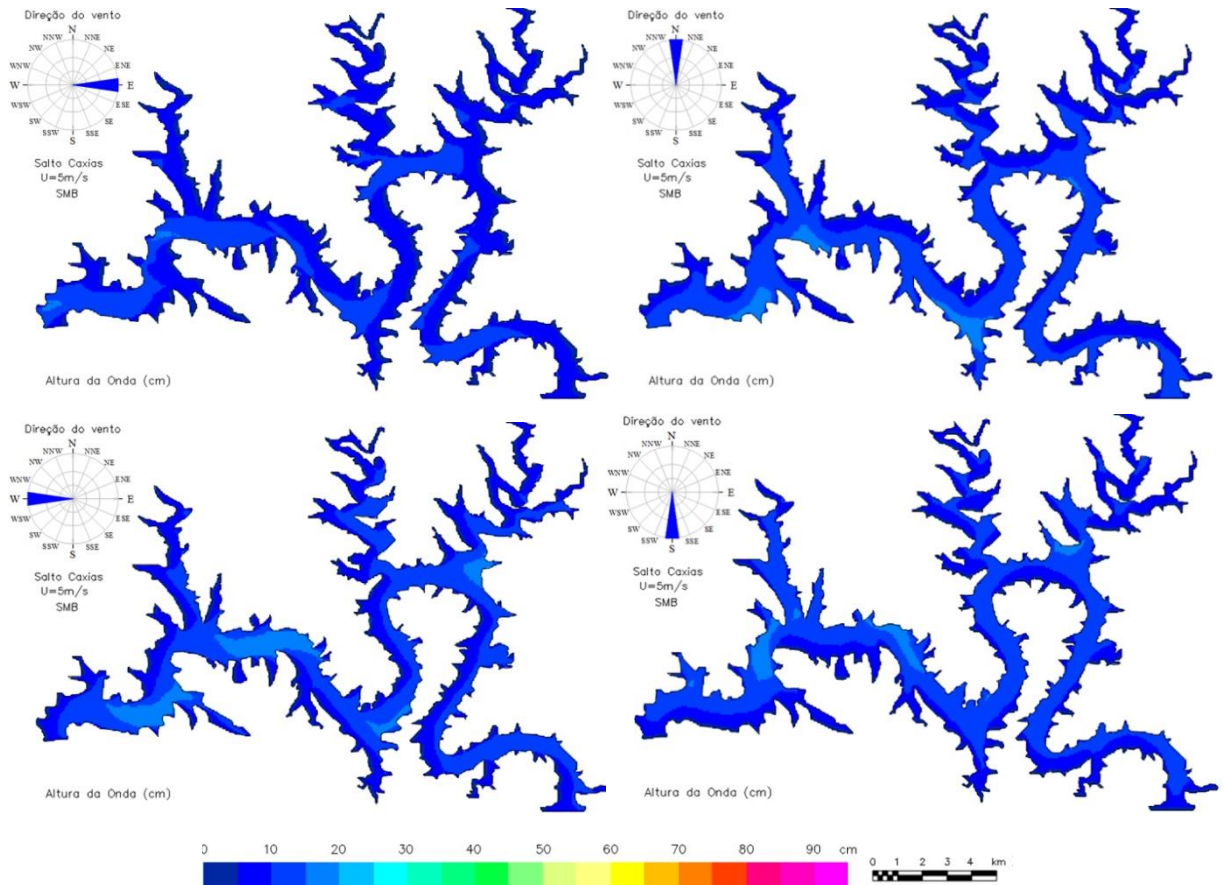


Figura 27 – Campos de ondas do reservatório de Salto Caxias para as direções E, N, W e S, com intensidade do vento de 5 m/s

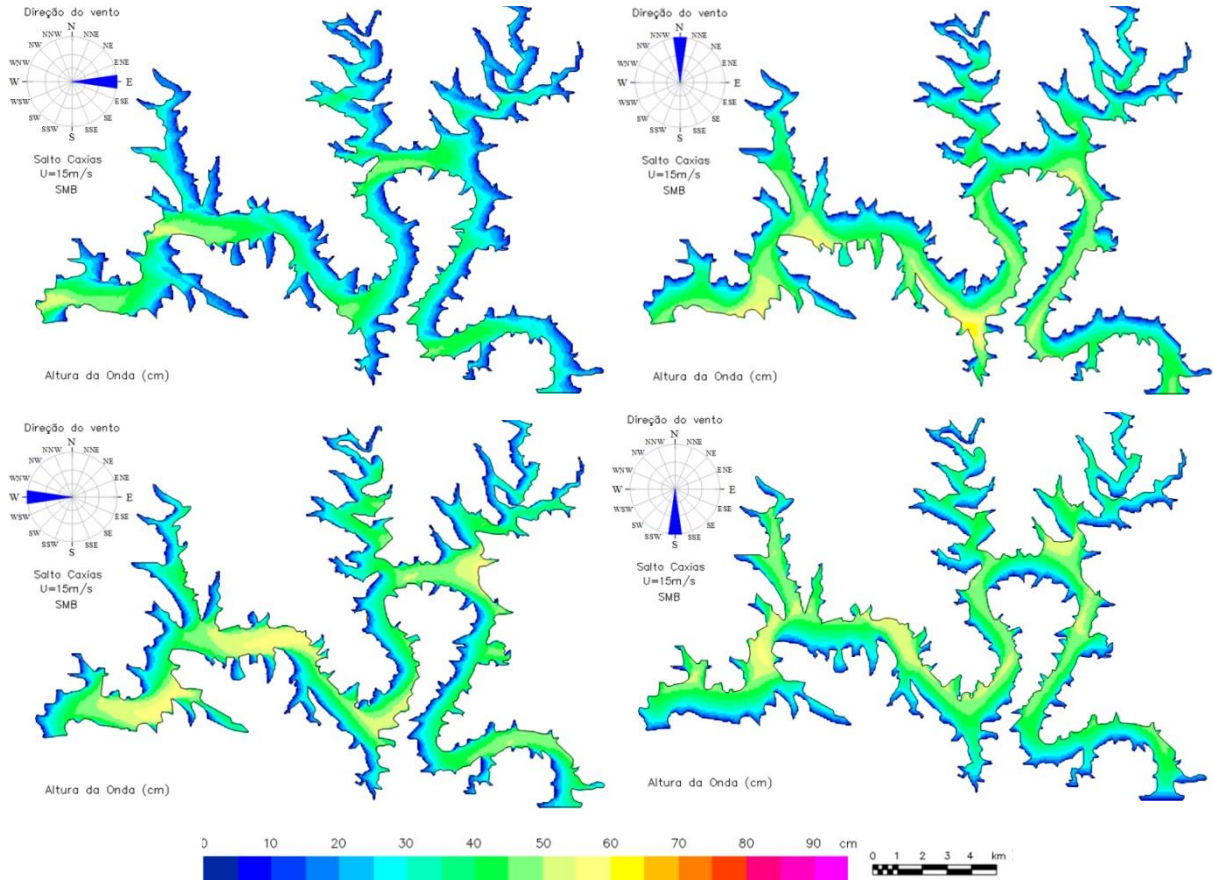


Figura 28 – Campos de ondas do reservatório de Salto Caxias para as direções E, N, W e S, com intensidade do vento de 15 m/s

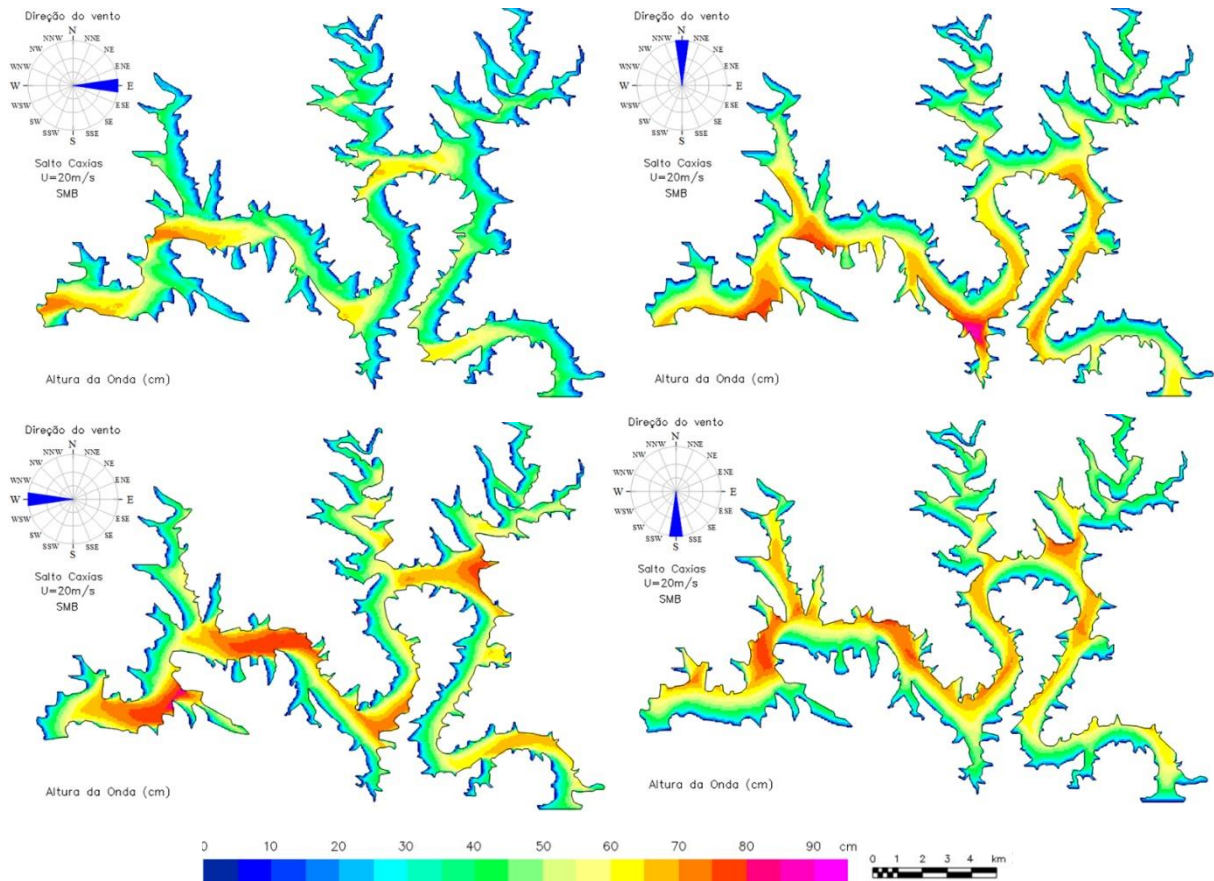


Figura 29 – Campos de ondas do reservatório de Salto Caxias para as direções E, N, W e S, com intensidade do vento de 20 m/s

Como estes campos de onda foram gerados com base nos respectivos campos de *fetch*, é natural que haja semelhança entre estas distribuições. Extraindo-se os dados dos mapas resultantes, é possível determinar os valores máximos de altura significativa de onda estimados para cada condição simulada, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Alturas de ondas (em centímetros) para Salto Caxias

Direção do vento	Intensidade do vento (m/s)		
	5	15	20
E	15	60	80
N	20	65	85
W	20	65	80
S	20	60	80

Observa-se que para a intensidade do vento de 5 m/s as maiores ondas são geradas pelas direções Norte, Oeste e Sul do vento, sendo da ordem de 20 cm. Para

a intensidade do vento de 15 m/s as maiores ondas ocorrem para as direções Norte e Oeste, sendo da ordem de 65 cm de altura. Já para ventos de 20 m/s, as maiores ondas ocorrem para a direção Norte especificamente, sendo estas da ordem de 85 cm de altura.

A validação do cálculo de *fetch* é normalmente realizada indiretamente, mediante a comparação do campo de alturas significativas de ondas construídos por modelos paramétricos baseados no *fetch* e de alturas significativas de ondas medidas em campo ou calculadas por modelos numéricos mais completos. Desta forma, a validação do *fetch* excede o escopo deste trabalho, não sendo contemplada no estudo.

5 CONCLUSÃO

Pelo presente trabalho é verificada a possibilidade de se obter a dimensão da pista de vento em um grande número de pontos sobre a superfície de corpos d'água interiores, de modo a gerar um campo de *fetch*. Tal tarefa foi realizada por meio da aplicação do modelo computacional ONDACAD, que possibilitou o cálculo destes campos com precisão adequada e tempo reduzido.

Foram determinadas as distribuições do *fetch* para os dois reservatórios em estudo, Salto Caxias e Itaipu, para diferentes direções do vento. Os mapas cromáticos elaborados permitiram definir os pontos de *fetch* máximo, sendo de 3,3 km com vento Norte para o reservatório de Salto Caxias e 13,0 km com vento na direção Sul-sudoeste para Itaipu.

A comparação entre dois métodos de determinação do *fetch* realizada comprovou a variabilidade de resultados entre ambos, sendo observado um erro máximo de 176,9%, no caso de Itaipu. Por ser desenvolvido a partir do estudo de águas continentais, o Método de Saville foi aquele que obteve uma distribuição de *fetch* considerada mais adequada para estes ambientes.

Com a finalidade de se demonstrar uma aplicação importante dos campos de *fetch*, foram realizadas simulações por modelagem paramétrica dos campos de alturas significativas de ondas geradas por ventos severos para o reservatório de Salto Caxias. No entanto, estes resultados não foram comparados com outros meios de obtenção de altura de ondas, como simulações feitas por modelos numéricos ou mesmo dados gerados por ondógrafos instalados no local, o que permitiria a validação do método de cálculo de *fetch*, sendo este um aspecto relevante para ser tratado em trabalhos futuros.

A metodologia de obtenção dos campos de *fetch* empregada neste trabalho pode auxiliar na determinação de pontos críticos para o estudo da erodibilidade das margens provocada por ondas em reservatórios. Além da estimativa da altura de ondas geradas por ventos, diversas aplicações do cálculo do *fetch* podem ser analisadas, como a determinação de outras características das ondas (período, comprimento, energia, etc.), os seiches e a tensão tangencial no fundo em águas rasas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1988). NBR-6123: **Forças Devidas ao Vento em Edificações**.

BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H. & RIS, E. R. C. (1996). **The SWAN wave model for shallow water**. Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Orlando, 668-676.

BRETSCHNEIDER, C. L. (1966). **Wave generation by wind, deep and shallow water**. In: A.T. Ippen (Editor), Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill, New York, 744 pp.

CANDELLA, Rogério Neder (1997). **Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul Através de Modelagem Numérica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ.

CARVALHO, Fábio Nascimento (2007). **Geração de vento para estudo de modelos em escala de estruturas offshore em tanques oceânicos**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

DONELAN, H. A. (1980). **Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods, and Directions**. Proceedings of the Canadian Coastal Conference. National Research Council, Canada, pp 47-61.

FENDRICH, Roberto (1993). **Ondas em Reservatórios**. Dissertação (Professor Titular). Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR.

HASSELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D. E.; ENKE, K.; EWING, J. A.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D. E.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MULLER, P.; OLBERS, D. J.; RICHTER, K.; SELL, W. & WALDEN, H. (1973). **Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)**. Deut. Hydrogr. Z., A8(12). Disponível em: <uuiid:f204e188-13b9-49d8-a6dc-4fb7c20562fc>. Acesso em: 31/10/2016.

HOLTHUIJSEN, L. H. (2007). **SWAN - User manual**. Department of Civil Engineering. Delft University of Technology, Delft, USA. 124pp.

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS (2000). **Estrutura da Atmosfera**. Sistema Integrado de Apoio ao Ensino, Universidade de

São Paulo. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/siae98/atmosfera/estrutura.htm>>. Acesso em: 11/10/2016.

KAISER, I. M. (1995). **Ondas geradas por ventos em reservatórios artificiais: um panorama**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

KAMPHUIS, J. W. (2000). **Introduction to Coastal Engineering and Management**. World Scientific Press, 437 pp.

KINSMAN, B. (1965). **Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface**. Prentice Hall, Inc., 676 pp.

KOMEN, G. J. ; CAVALERI, L. ; DONELAN, M. ; HASSELMANN, K. ; HASSELMANN, S. & JANSSEN, P. A. E. M. (1994). **Dynamics and modelling of ocean waves**. Cambridge University Press, 532 pp.

MARQUES, Marcelo (2013). **Modelagem paramétrica bidimensional para simulação do campo de ondas em águas continentais**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

MARQUES, Marcelo; ANDRADE, Fernando O.; GUETTER, Alexandre K. (2013). **Conceito do Campo de Fetch e sua Aplicação ao Reservatório de Itaipu**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, volume 18, n. 4, Out/Dez 2013,243-253.

MARQUES, Marcelo; ARANTES, Eliane P.; ANDRADE, Fernando O.; OKAWA, Cristhiane M. P.; TAKEDA, Adalberto K. (2016). **Estudo comparativo da distribuição do fetch no reservatório de Belo Monte**. XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Peru.

MARQUES, Marcelo & ANDRADE, Fernando O. (Artigo em revisão). **Automated computation of two-dimensional fetch fields: case study of the Salto Caxias reservoir in southern Brazil**. Artigo aceito no Lake and Reservoir Management, 2016.

MARQUES, Marcelo & GUETTER, Alexandre K. (2011). **Determinação da distribuição do fetch no reservatório de Itaipu**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, AL.

MARQUES, Marcelo & GUETTER, Alexandre K. (2011). **Estimativa com modelo paramétrico dos campos de ondas geradas por ventos severos no reservatório de Itaipu**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, AL.

MORAIS, Vinicius Souza (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. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

MURTOJARAVI, Mika; LEPPANEN, Ville; NEVALAINEN, Olli S. (2009). **Determining directional distances between points and shorelines using sweep line technique**. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 23, No. 3, March 2009, 355–368.

PIERSON, W. J.; NEUMANN, G.; JAMES, R. W. (1955). **Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics**. U.S. 192 Navy Hydrographic Office Publ. 603, 284 p.

SAVILLE, Thorndike (1954). **The effect of fetch width on wave generation**. Technical Memorandum No. 70, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 9 pp.

SILVEIRA, Fernanda Lang & VARRIALE, Maria Cristina (2005). **Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis**. Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 22, no. 2 (ago. 2005), p. 190-208. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/85066>>. Acesso em: 27/10/2016.

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

SVERDRUP, H.U. & MUNK, W.H. (1947). **Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting**. Publication 601, Hydrographic Office, U.S. Navy, 50 pp.

U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (1984). **Shore Protection Manual (SPM)**. Third Edition, Volume 1. Washington, D.C.: Department of the Army Corps of Engineers.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1984). **Coastal Engineering Manual (CEM)**. Volume 6. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

_____ (2002). **Coastal Engineering Manual (CEM)**, Engineer Manual 1110-2-1100. Vol,ume 6. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

_____ (2008). **Coastal Engineering Manual (CEM)**, Engineer Manual 1110-2-1100. Volume 6. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR – BUREAU OF RECLAMATION (1973). **Design of small dams**. A water resources technical publication 2. ed. Rev. Washington.

YANG, S.; YONG. J. H.; SUN, J. G.; GU, H. J.; PAUL, J. C. (2010). **A cell-based algorithm for evaluating directional distances in GIS**. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 24, No. 4, April 2010, 577–590.