

## Avaliação do campo de vento marinho obtido a partir de imagens ENVISAT/ASAR para a Baía de Campos, RJ

Mírcea dos Santos Claro <sup>1</sup>  
João Antonio Lorenzetti <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
mirceaclaro.ambidados@petrobras.com.br,loren@dsr.inpe.br

**Abstract.** The oceanic surface wind is a very important environmental variable for oceanographic and meteorological studies as well as for practical applications such as the forecasting the wave field. Considering the great difficulty of installation, operation and maintenance of instrumentation for *in situ* measurement of marine winds, it is of interest the development of methodologies for obtaining this variable by remote sensors. Although the wind field can be derived by the orbital scatterometers, the spatial resolution of such data (25 km) is not adequate for applications over the coastal ocean. High-resolution wind data (500 – 1500 m) can be extracted from SAR images. This is possible because radar backscatter signal, after calibration into sigma-naught values, can be related to wind speed. In this context, the objective of this study was to determine the potential of the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) sensor, flying onboard the ENVISAT satellite, to derive high spatial resolution (~1 km) wind field (10 m above the sea surface). Wind speeds fields were determined using C-Band geophysical models with the wind direction data obtained from the QuikSCAT scatterometer. Three geophysical models were used: CMOD4, CMOD5 and CMOD-IFR2. The final accuracy of this procedure was evaluated by comparing ASAR and QuickSCAT scatterometer wind speeds. The results here presented show wind speeds with a mean correlation coefficient against QuikSCAT data of 0,75 and a RMS= 2 m/s. The more accurate results were found using CMOD4 and CMOD-IFR2 models.

**Palavras-chave:** SAR, wind speed, QuikSCAT, SAR, velocidade do vento, QuikSCAT.

### 1. Introdução

O conhecimento do comportamento do vento na superfície dos oceanos é importante em estudos oceanográficos e meteorológicos. O vento é o principal forçante de vários processos dinâmicos e termodinâmicos que acontecem na superfície dos oceanos (Du et. al, 2002). É por meio da transferência de momentum e da modulação das trocas de calor entre o oceano e a atmosfera que o vento se caracteriza como um parâmetro fundamental em modelos de circulação oceânica, de previsão de ondas e nos estudos de interação oceano-atmosfera e climatologia (Monaldo e Beal, 2004).

O comportamento do vento pode ser estudado através da análise de medidas quantitativas da sua direção e velocidade, que podem ser adquiridas por sensores *in situ*, sensores remotos de microondas ou geradas por modelos atmosféricos.

Os sensores orbitais que têm sido utilizados para a determinação de campos de vento são os radares escaterômetros, como os dos satélites ERS-2 e QuikSCAT, e de abertura sintética (SAR) como os dos satélites ENVISAT e Radarsat. A extração do campo de velocidade do vento a partir de dados de radar é possível porque o retroespalhamento do sinal emitido pelo radar, depois de calibrado, pode ser relacionado com a magnitude do vento e a orientação do vento em relação à direção de imageamento radar. Os dados de direção e velocidade do vento do escaterômetro QuikSCAT são disponibilizados gratuitamente, em escala global, com resolução espacial de, aproximadamente, 25 km (RSS, 2005). Essa resolução, excelente para aplicações em grande escala, pode ser um fator limitante para aplicações sobre a plataforma continental. Assim, o objetivo deste trabalho é determinar a viabilidade de derivar os campos de vento na Baía de Campos a partir de imagens ASAR utilizando três modelos empíricos: CMOD4, CMOD5 e CMOD-IFR2, e dados de direção do vento QuikSCAT para inicializar os modelos. Os resultados são analisados comparando os resultados obtidos com os três modelos

a partir das imagens SAR, com dados de magnitude do vento fornecido pelo escaterômetro QuikSCAT.

## 2. Materiais e Métodos

Para a determinação de campos de velocidade do vento marinho de alta resolução foram utilizadas três imagens ENVISAT/ASAR, adquiridas no modo de imageamento *Wide-swath*, com resolução espacial de 150m e largura de faixa imageada de 405 km. Dados de direção do vento do escaterômetro QuikSCAT, disponíveis no sítio *Remote Sensing Systems*, foram utilizados como dados de entrada dos modelos de banda C e os dados velocidade desse sensor foram utilizados para a avaliação dos campos de velocidade SAR.

### 2.2 Determinação do Campo de Velocidade do Vento Marinho

O campo de velocidade do vento marinho de superfície (a 10m e correspondente a estratificação neutra) pode ser estimado por meio de modelos empíricos, como os modelos CMOD4 (Stoffelen et al., 1997), Equação 1, CMOD-IFR2 (Quilfen et al., 1998) e CMOD5 (Hersbach, 2002). Esses modelos relacionam o sinal de retroespalhamento de radar ( $\sigma^\circ$ ) com a velocidade do vento (V), se conhecidas a direção do vento e a geometria de visada do radar.

$$\sigma^\circ = b_0(1 + b_1 \cos \phi + b_3 \tanh b_2 \cos 2\phi)^{1.6} \quad (1)$$

onde

$\phi$  é o ângulo azimutal entre a direção do vento e a direção do feixe de radar. As constantes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  são funções das demais variáveis, isto é, a magnitude do vento e o ângulo de incidência do feixe radar na superfície.

Os três modelos fornecem um valor de sigma-zero ( $\sigma^\circ$ ), se conhecidos a velocidade do vento (V), o valor do ângulo entre a direção de visada do radar e a direção do vento ( $\Phi$ ), e o ângulo de incidência do feixe de radar Theta ( $\theta$ ) (modelo direto).

Nesse estudo, a abordagem é inversa, isto é, a partir de medições de  $\sigma^\circ$ , obtidas de cada *pixel* da imagem SAR, e conhecidos os ângulos de incidência do radar e o ângulo entre vento e feixe radar, pode-se em princípio inverter os modelos CMODs e determinar a velocidade do vento.

#### 2.2.1 Sigma-zero ( $\sigma^\circ$ )

As imagens ASAR *Wide Swath*, são compostas de *pixels* com valores de níveis digitais que variam de zero a 65536 (16 bits), de acordo com a intensidade do retroespalhamento do pulso do radar. Mas, para estimar a velocidade do vento utilizando uma imagem SAR, a imagem deve apresentar pouco ruído *speckel* e valores calibrados de sigma-zero.

A conversão dos valores de níveis digitais em valores de sigma-zero, ou Normalized Radar Cross Section (NRCS) é chamada de calibração absoluta. A calibração absoluta foi realizada no software BEST desenvolvido pela ESA (European Space Agency), com uma ferramenta específica para calibração, em que os algoritmos seguem a metodologia proposta por Rosich e Meadows (2004). Além da complexidade de inversão do modelo, a presença de ruído *speckle* e outros efeitos ambientais sobre a resposta SAR introduzem complicações que devem ser adequadamente tratadas para a efetivação dessa inversão e do procedimento de calibração. Evidentemente, erros no processo de conversão dos valores digitais da imagem em  $\sigma^\circ$  são convertidos automaticamente em erros de velocidade do vento.

A redução do ruído *speckle* da imagem de radar é feita aumentando-se o número equivalente de “looks” (NEL) da imagem SAR (Hasager et al., 2004). Como o NEV é proporcional ao inverso da variância amostrada, quanto maior NEV, menor a variância, e conseqüentemente, menor o efeito do *speckle*. O NEL das imagens ASAR *Wide Swath*,

originalmente igual a 11,5 (Harris, 1998) foi aumentado para 240 na resolução de 1120 metros. Isso foi realizado por um processo progressivo de suavização por média em caixa e reamostragem dos valores de retroespalhamento da imagem SAR. Esse processo também tem o papel de remover efeitos de pequena escala, não associados à variação do vento, sobre as variações de  $\sigma^\circ$ . Estudos indicam que promediações de, no mínimo, 500 m são necessárias para resolver esses problemas (Horstmann et al., 2000). O resultado pode ser visto na Figura 1.

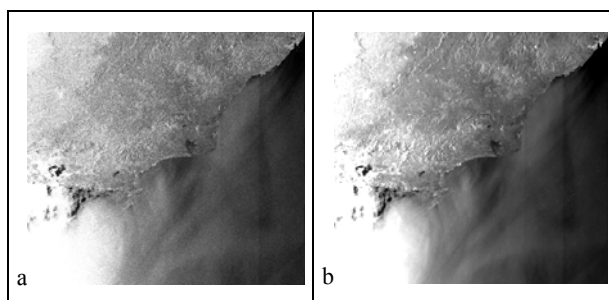


Figura 1. Imagem ASAR a) antes dos procedimentos de filtragem e reamostragem, NEV=11,5; b) depois dos procedimentos de filtragem e reamostragem, NEV=240.

Um exame mais detalhado na imagem ASAR da Figura 1a revela a existência de uma diferença de intensidade média entre as diferentes faixas de imageamento do sensor ASAR no modo Wide Swath. Esse é um problema conhecido em imagens ScanSAR, ENVISAT e RADARSAT, já que sua ampla faixa imageada é gerada a partir de mais de uma faixa de imageamento, que, quando processadas, podem causar diferença radiométrica entre as faixas da imagem. Este problema, ligado diretamente ao processador SAR, ainda não foi resolvido satisfatoriamente (Monaldo e Kerbaol, 2003) e dificulta a obtenção de melhores resultados.

### 2.2.2 Ângulo de Incidência ( $\theta$ )

Segundo Rosich e Meadows (2004) o ângulo de incidência do feixe radar varia ao longo das colunas da imagem segundo uma função quadrática. Se conhecida essa função é possível determinar o ângulo de incidência para cada *pixel* da imagem. Assim, depois de realizado o procedimento de reamostragem, foram coletados, com o software BEST, 12 pontos (coluna,  $\theta$ ) bem distribuídos ao longo das colunas, a partir dos quais foi gerada a função quadrática de melhor ajuste à variação dos 12 pontos.

Depois de conhecida a função quadrática, a mesma foi implementada no aplicativo Matlab, fazendo-se variar a coluna de ângulo de incidência até completar todas as colunas da imagem. Ao final deste procedimento têm-se uma matriz de mesma dimensão da imagem analisada, com um valor de ângulo de incidência para cada *pixel*.

### 2.2.3 Ângulo Phi ( $\Phi$ )

O ângulo Phi é definido como o ângulo entre a visada do feixe radar e a direção do vento. Quando o vento sopra na direção do feixe radar e no mesmo sentido do feixe, o ângulo  $\Phi=180^\circ$  e quando o vento sopra na mesma direção, mas ao encontro do feixe  $\Phi=0^\circ$ . Para a determinação de Phi foram utilizados dados de direção do vento do escaterômetro QuikSCAT para as mesmas datas das imagens SAR analisadas. Depois de determinada a grade de direção do vento QuikSCAT correspondente ao recorte geográfico da imagem, os dados de direção são extrapolados de maneira que a grade de direção do vento, de resolução menor do que a imagem SAR, resulte em uma matriz com as mesmas dimensões da imagem analisada.

Como os dados QuikSCAT têm resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , e as imagens SAR foram reamostradas para *pixels* de  $0,01^\circ$ , a direção QuikSCAT é repetida em janelas de  $25 \times 25$  *pixels*, centrada no ponto geográfico da grade de direção QuikSCAT. Para um dado valor de velocidade de vento, o valor do NRCS é maior quando a direção de visada e o vento estão alinhados ( $0^\circ$  e  $180^\circ$ ) e mínimo quando essas direções são ortogonais. Para a determinação do ângulo  $\Phi$ , deve ser levado em consideração se a passagem do satélite ENVISAT é ascendente ou descendente uma vez que o feixe radar aponta à direita do satélite.

Depois de determinadas as variáveis de entrada, para se determinar a magnitude do vento ( $V$ ) no modelo inverso, são atribuídos valores de velocidade (intervalo de 0 a 20 m/s, com incrementos de 0,001 m/s) aos modelos diretos CMODs, até que, para um determinado valor de  $V$ , a diferença entre o  $\sigma^\circ$  dado pelo modelo direto e aquele medido na imagem SAR seja igual ou menor que 1%. Esse processo é feito repetidamente para cada *pixel* da imagem, gerando, para cada célula de resolução, um valor correspondente de velocidade do vento em metros por segundo. Esse procedimento foi realizado para os três modelos por meio de rotinas no aplicativo Matlab.

### 2.3 Avaliação dos Resultados

Os valores de  $V$  obtidos foram avaliados por meio de comparações das velocidades obtidas por meio dos modelos geofísicos com dados de velocidade do escaterômetro QuikSCAT. As comparações entre esses dados foram feitas através do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson e do cálculo dos valores dos erros médios quadráticos (RMS) tal como realizado por Portabella et al. (2002).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

### 3. Resultados e Discussão

Foram gerados campos de velocidade do vento para 4 imagens de diferentes datas, utilizando como entrada os dados de direção do vento QuikSCAT e os modelos empíricos CMOD4, CMOD5 e CMOD-IFR2, totalizando 12 campos. Os 12 campos de velocidade do vento SAR foram então comparados com os campos de velocidade do vento QuikSCAT.

Considerando os melhores resultados entre os 3 campos gerados para cada data (Tabela 1), o coeficiente de correlação médio foi de 0,76 entre os dados de velocidade do vento SAR e os dados de velocidade do vento QuikSCAT, com RMS médio de 2 m/s.

O campo de velocidade do vento SAR para a data 28/11/2004 (Figura 2b), gerado com o modelo CMOD-IFR2, apresentou maior concordância com os dados de velocidade QuikSCAT, com coeficiente de correlação de 0,89 e RMS=1,99 m/s. Para a derivação desse campo de vento foi utilizado o recorte da imagem SAR do dia 28/11/2004 (Figura 2a), horário de aquisição 01:16 UTC, e dados de direção do vento QuikSCAT da mesma data e horário de aquisição 08:54 UTC (Figura 1c).

Tabela 1. Melhores resultados entre os três campos de velocidade do vento gerados para cada data, com dados de direção QuikSCAT e modelos de banda C.

Campo	Modelo	r	RMS (m/s)
19/10/2005	CMOD4	0,69	2,95
11/12/2004	CMOD4	0,84	1,26
28/11/2004	CMOD-IFR2	0,89	1,99
19/08/2005	CMOD-IFR2	0,64	1,87
	Média	0,76	2

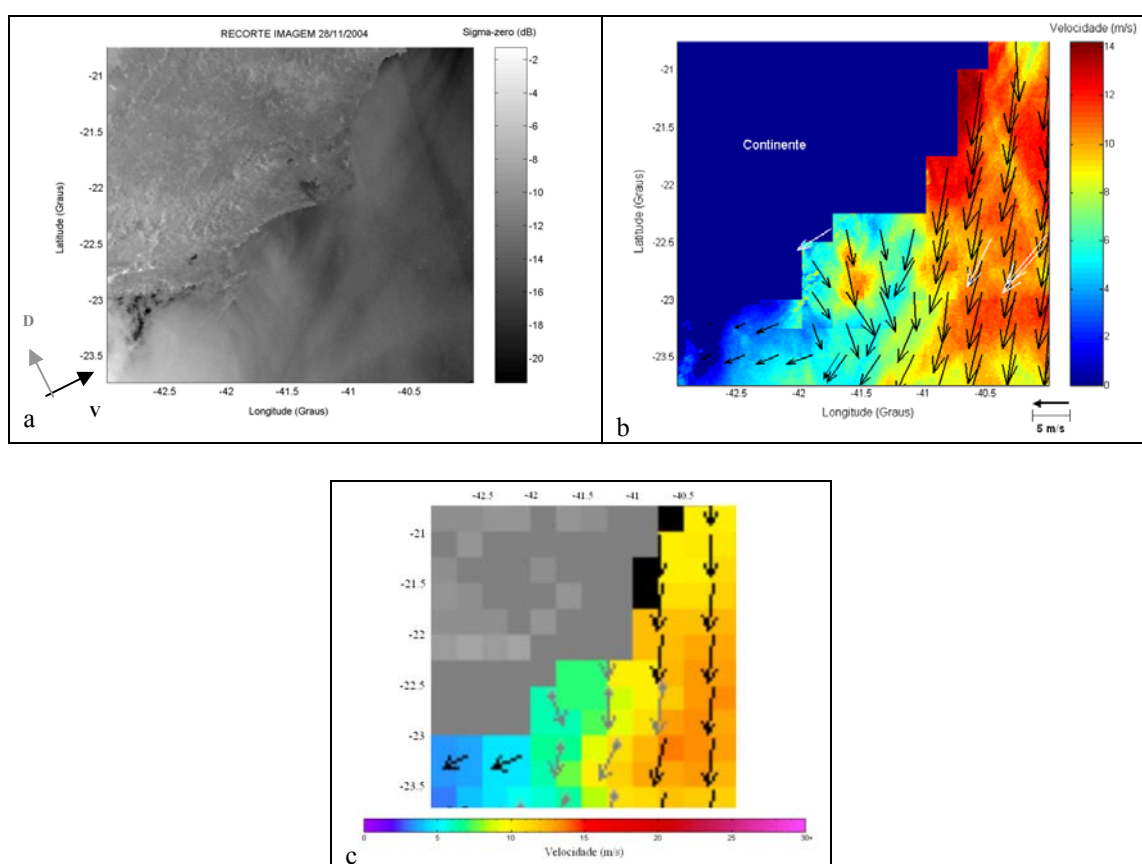


Figura 2. a) Recorte da imagem ASAR de 28/11/2004, 01:16 UTC, passagem ascendente e resolução de 1120 m A seta cinza indica a direção do satélite *along-track* e a seta preta representa a direção de visada do feixe radar b) Campo de vento SAR do dia 28/11/2004, com resolução de 1120 m, gerado com o modelo CMOD-IFR2. Os vetores indicam a direção do vento do satélite QuikSCAT do dia 28/11/2004, horário de aquisição 08:54 UTC c) Campo de vento QuikSCAT do dia 28/11/04, passagem ascendente, 08:54 UTC.

O campo de velocidade SAR (Figura 2b) é caracterizado por grande variabilidade em intensidade, com valores de zero a 14,2 m/s e desvio padrão de 4,75 m/s. De nordeste para sudoeste observa-se um forte gradiente nos valores de velocidade do vento, que também é visível no campo de velocidade QuikSCAT para a mesma data. A variabilidade no campo direcional na parte externa da plataforma continental é pequena, com predominância de ventos de nordeste, como observa-se nos vetores de direção do vento QuikSCAT.

A Tabela 2 apresenta os valores de coeficiente de correlação, desvio padrão e erro mínimo quadrático de comparações de campos de velocidade SAR com diferentes tipos de dados (medidas *in situ*, modelos atmosféricos e dados QuikSCAT) e modelos de banda C, apresentados por diferentes autores. Vê-se, portanto, que os valores aqui apresentados (Tabela 1) apresentam acurácia semelhantes aos valores publicados na literatura.

Tabela 2. Comparações de vento SAR com dados *in situ*, ventos QuikSCAT e de modelos

Trabalho	Modelo de banda C	$r^2$	Desvio Padrão (m/s)	RMS (m/s)
Monaldo et al. (2001)	CMOD4	----	1,76 m/s	----
Monaldo et al. (2004)	CMOD4	----	1,36	
Horstmann e Koch (2003)	CMOD4	0,87	2,54	----
Horstmann et al. (2004)	CMOD4	0,87	2,5	----
Horstmann et al. (2003)	CMOD4	0,95	1	
Horstmann et al. (2005)	CMOD4	0,68	----	3,77
	CMOD5	0,72	----	3,75

A maioria desses trabalhos não especifica a qualidade radiométrica das imagens, mas imagens com melhor qualidade radiométrica, geram melhores resultados.

Considerando uma diferença média de 4 horas entre a aquisição das imagens SAR e os dados de direção QuikSCAT e a dinâmica da variabilidade espaço-temporal do vento nesse período, a metodologia foi considerada adequada para essa aplicação. Espera-se que com a disponibilidade de dados de direção do vento obtidos por satélite com menores diferenças temporais esses resultados apresentem menores valores de RMS e maiores valores de coeficientes de correlação.

Os modelos CMOD4, CMOD5 e CMOD-IFR2 apresentaram comportamentos semelhantes para os campos de vento gerados com dados de direção QuikSCAT na Baía de Campos. Os melhores resultados foram obtidos com os modelos CMOD4 e CMOD-IFR2, sendo que a diferença entre os resultados dos três modelos foi pequena.

#### 4. Conclusões e Recomendações

Os campos de vento SAR gerados com dados de direção de vento QuikSCAT apresentaram resultados consistentes quando comparados com dados de magnitude da velocidade QuikSCAT, com coeficiente de correlação médio de 0,76 e RMS de 2 m/s. Esses resultados são, entretanto, apenas indicações das precisões possíveis de serem obtidas no processamento de imagens ASAR para a extração de campos de vento. O número de imagens processadas não é suficientemente grande para se estabelecer valores definitivos de RMS e  $r$  para a região de interesse.

Com relação aos procedimentos de filtragem e reamostragem, concluiu-se que os procedimentos proporcionaram bons resultados na redução da variância da imagem, reduzindo o *speckle*.

Foi possível se constatar que as imagens ASAR com diferenças radiométricas significativas entre as faixas de imageamento ScanSAR resultam em campos de vento menos acurados do que as imagens que não continham essa anomalia tão evidente. Este ainda é um problema para o uso deste tipo de imagens (*ScanSAR Wide Swath*) na estimativa de campos de vento.

Os melhores resultados foram obtidos com os modelos CMOD4 e CMOD-IFR2, sendo que a diferença entre os resultados dos três modelos foi pequena.

Para a obtenção de melhores resultados recomenda-se a utilização de imagens SAR sem diferenças radiométricas entre as faixas de imageamento das imagens *ScanSAR Wide Swath*, o uso de imagens que apresentem horário de aquisição mais próximo do horário de aquisição

dos dados QuikSCAT e o uso de algoritmos para a determinação da direção do vento a partir de feições lineares (*roll vórtices*), quando presentes nas imagens SAR.

**Agradecimentos:** Os autores desejam agradecer ao CENPES/PETROBRAS na figura da Dra. Cristina M. Bentez, pela disponibilização das imagens Envisat/ASAR utilizadas.

## **Bibliografia**

- Du, Y.; Vachon, P. W.; Wolfe, J. Wind direction estimation from SAR images of the ocean using wavelet analysis. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 03, p. 498-509, 2002.
- Harris, R. A. **ENVISAT ASAR Science and Applications**. Noordwijk: ESA, 1998. 53 p. (92-9092-496-9)
- Hasager, C. B.; Dellwik, E.; Nielsen, M.; Furevick, B. R. Validation of ERS-2 SAR offshore wind-speed maps in the North Sea. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 19, p. 3817-3841, oct. 2004.
- Hersbach, H. **CMOD5; an improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry**. England: European Centre for Medium-Range, 2002. 47p.
- Horstmann, J.; Lehner, S.; Koch, W.; Tonboe, R. Computation of wind vectors over the ocean using spaceborn synthetic aperture radar. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, v. 21, n. 01, p. 100-107, 2000.
- Horstmann, J.; Schiller, H.; Schulz-Stellenfleth, J.; Lehner, S. Global wind speed retrieval from SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 10, p. 2277-2286, out. 2003.
- Horstmann, J.; Koch, W. High resolution ocean surface wind fields retrieved from spaceborne synthetic aperture radars operating at C-Band. In: Workshop Coastal and Marine Applications of SAR, II, 2003, Svalbard. **Proceedings...** Svalbard: ESA, 2003. p. 61-67.
- Horstmann, J.; Koch, W.; Lehner, S. Ocean wind fields retrieved from advanced synthetic aperture radar aboard ENVISAT. **Ocean Dynamics**, v. 54. p. 570-576, 2004.
- Horstmann, J.; Graber, H. C.; Koch, W.; Iris, S. Investigation of SAR wind field retrieval with respect to hurricane winds. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05, 2005, Seoul. **Proceedings...** Seoul: IEEE International, 2005. p. 4018-4021.
- Monaldo, F.; Thompson, D. R.; Beal, R. C.; Pichel, W. G.; Clemente-Colón, P. Comparison of SAR-derived wind speed with model predictions and ocean buoys measurements. **IEEE Transactions and Remote Sensing**, v. 39, n. 12, p. 2587-2600, 2001.
- Monaldo, F.; Kerbaol, V.; SAR Wind Team. The SAR measurement of ocean surface winds: an overview. In: Workshop Coastal and Marine Applications of SAR, II, 2003, Svalbard. **Proceedings...** Svalbard: ESA, 2003. p. 15-32.
- Monaldo, F. M.; Beal, R. Wind speed and direction. In: Jackson, C. R.; Apel, J. R. **Synthetic Aperture Radar marine user's manual**. Washington, DC: 2004. cap. 13, p. 305-320.
- Monaldo, F. M.; Thompson, D. R.; Pichel, W. G.; Clemente-Colón, P. A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface wind speeds. **IEEE Transactions and Remote Sensing**, v. 42, n. 02, p. 283-291, fev. 2004.
- Portabella, M.; Stoffelen, A.; Johannessen, J. A. Toward an optimal inversion method for synthetic aperture radar wind retrieval. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. C8, p. 1-13, 2002.
- Quilfen, Y.; Chapron, B.; Elfouhaily, T.; Katsaros, K. Tournadre, J. Observation of tropical cyclones by high-resolution on scatterometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 7767-7786, 1998.
- Rosich, B.; Meadows, P. **Absolute calibration of ASAR Level 1 products generate with PF-ASAR**. Frascati: ESA, 2004. 27 p. (ENVI-CLVL-EOPG-TN-030010)
- Stoffelen, A.; Anderson, D. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. C03, p. 5767-5780, 1997.
- Remote Sensing Systems Home Page. QSCAT. Disponível em: <[http://www.ssmi.com/qscat/qscat\\_browse/html](http://www.ssmi.com/qscat/qscat_browse/html)>. Out. 2005.