

## Detecção Automática de Filmes na Superfície Marinha Usando Imagens MODIS e Modelos de Radiância de *Sunglint* Normalizada

Lucas Barbedo de Freitas  
Milton Kampel  
João A. Lorenzetti

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{lucasbf, Milton, loren}@dsr.inpe.br

**Abstract.** The sunglint condition in remote sensing images at the visible spectrum brings information about the sea surface shortwave roughness. Mineral films or biogenic films present in the ocean surface can effectively change this roughness. Therefore, by using normalized radiance of glint contaminated MODIS images one can detect the surfactants. Here, a new automatic technique is developed in which we compare modeled normalized sunglint radiance for clear water and surfaces with films. This approach provides a tool to detect films on sea surface. A case study of biogenic films formed by *Trichodesmium* cyanobacteria in the southeastern Brazilian coast in January 2003 reveals the potential of MODIS images under sunglint to detect biofilms. The global monitoring of natural films is of great importance for the understanding heat, particles, momentum and gases exchanges between ocean and atmosphere. The sunglint condition in MODIS images, even dependent on specific acquisition geometric conditions (Sun and sensor), could mean an improvement in the global detection of natural films. An advantage over other methods is its relatively high spatial resolution (250 m) at zero cost to the scientific community and society. Yet, more importantly, is the possibility of using such images to reveal surfactants at low wind conditions ( $< 2 \text{ ms}^{-1}$ ), very difficult to do using SAR images due to the absence of Bragg scattering.

**Palavras-chave:** *Sunglint*, sea surface roughness, MODIS, *biogenic films*, reflexão especular do sol, rugosidade da superfície marinha, MODIS, filmes biogênicos.

### 1. Introdução

Os sensores ópticos de cor do oceano, dentro de específicas condições geométricas de aquisição e vento, resultam em imagens com reflexão especular bidirecional na superfície do oceano, o *sunglint*, que possui informação predominante a respeito da rugosidade de pequena escala da superfície marinha. No presente trabalho, apresenta-se um método automático desenvolvido para detectar filmes naturais e biogênicos na superfície do mar em imagem de sensoriamento remoto na condição de *sunglint*. Embora o estudo de caso escolhido seja referente a filmes biogênicos produzidos pela cianobactéria *Trichodesmium*, a técnica aqui apresentada pode também ser aplicada a filmes minerais, como exsudações naturais ou vazamento de petróleo.

Os filmes biogênicos são, principalmente, produzidos pelo fitoplâncton e por bactérias. Sua constituição é variada, mas na maioria dos casos são formados por proteínas, lipídios, ácidos orgânicos, sacarídeos e metais associados à matéria orgânica. Por ocuparem uma camada muito fina da superfície do mar ( $\sim 3 \text{ nm}$ ), mesmo em pequenas concentrações, podem se estender por grandes áreas (Alpers e Espedal, 2004).

Assim como os filmes biogênicos, filmes minerais produzidos por exsudações naturais, vazamentos de petróleo e descartes de navios, geram em imagens de Radar de Abertura Sintética, SAR, feições escuras de baixo retroespalhamento devido ao efeito de supressão das ondas de *Bragg*, processo que permite a detecção via SAR. Cabe ressaltar que, diferenciar filmes biogênicos de filmes minerais em imagens de sensoriamento remoto é um processo complexo. Ambas as feições apresentam sinais muito semelhantes, o que resulta em ambiguidade nas interpretações.

Outro problema presente na detecção de biofilmes na superfície do oceano é que outros processos também afetam a rugosidade da superfície. Entre esses, podemos destacar: ondas internas (Myasoedov et al., 2010), bordas de correntes, vórtices e meandros (Gagliardini;

Clemente-Cólon, 2004). Outra dificuldade é que estes processos de mesoescala podem resultar em frentes oceanográficas com impactos locais na distribuição do fitoplâncton, conforme discutido em Holt (2004), resultando numa feição mesclada entre a resposta da rugosidade devido a padrões de circulação e a presença de surfactantes biogênicos originados pelo plâncton. Este fato implica em ambigüidades e dificuldades ao analisar imagens de sensores da cor do oceano com *sunlint*, no intuito de detectar filmes biogênicos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para detecção automática de filmes surfactantes na superfície marinha, utilizando imagens MODIS na condição de *sunlint*. Este trabalho modela as respostas da superfície marinha por meio da radiância captada pelo sensor em condição de *sunlint*, para as condições de água limpa e contaminada por surfactante. O objetivo é comparar o valor das radiâncias captadas pelo sensor remoto com aquelas modeladas, vendo se o valor medido é mais próximo do esperado para superfície com filmes ou de água límpida, e assim processar a detecção dos biofilmes.

## 2. Metodologia e materiais

### 2.1 Base teórica e dados usados

No intuito de quantificar o *sunlint* Cox e Munk (1954) propuseram uma função de densidade de probabilidade (*PDF*), para descrever o comportamento das inclinações das microfacetas do oceano em relação ao vento de superfície local. A partir da *PDF*, os autores quantificaram a energia da reflexão bidirecional pela superfície do oceano, no sistema sol, superfície marinha e sensor. Se a inclinação preferencial das microfacetas da superfície marinha está no plano de reflexão especular entre o sol e o sensor, há um fluxo maior de energia solar para o sensor oriundo das reflexões na superfície marinha. Cabe ressaltar ainda que, estas microfacetas associadas às ondas capilares, são formadas pelo atrito do vento com a superfície marinha. Desta maneira, a quantificação da energia solar que reflete de modo especular na superfície marinha em direção ao sensor, é dependente da velocidade do vento e da geometria de aquisição. A geometria de aquisição (sol, alvo e sensor) é caracterizada pelos seguintes parâmetros: zênite solar  $\theta_{\text{sol}}$ , zênite de visada do sensor  $\theta_{\text{visada}}$  e azimute relativo entre sol e sensor  $\phi$ .

O trabalho de Cox e Munk (1954) utiliza os parâmetros  $\sigma_{\text{água}}^2$  e  $\sigma_{\text{surfactante}}^2$ , presentes na formulação da equação da *PDF*, que representam as médias quadráticas das inclinações das microfacetas da superfície marinha, para água limpa (Equação 1) e com a presença de surfactantes (Equação 2), como por exemplo, biofilmes e filmes minerais como o petróleo.

$$\sigma_{\text{água}}^2 = 0.003 + 0.00512 \bar{V} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{biofilme}}^2 = 0.008 + 0.00156 \bar{V} \quad (2)$$

As Equações 1 e 2 mostram que um aumento do vento provoca uma maior inclinação quadrática média das microfacetas. Ademais, vê-se que para um mesmo valor do vento, as inclinações das microfacetas são bem maiores para a água limpa.

Sendo  $Z_x$  e  $Z_y$  as componentes das inclinações na direção do sol (*eixo-x*) e perpendicular ao azimute solar (*eixo-y*) que produzem reflexão especular, e que podem ser calculadas a partir de  $\theta_{\text{sol}}$ ,  $\theta_{\text{visada}}$  e de  $\phi$ , determina-se a inclinação da superfície ( $\beta$ ) associada, que é dada por (Equação 3):

$$\tan \beta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} \quad (3)$$

A *PDF* (Equação 4) descreve estatisticamente a rugosidade do oceano em função do vento e geometria de aquisição, representando a probabilidade de se encontrar uma dada inclinação sob as condições ambientais assumidas. Observe que, dependendo da condição da superfície quanto à presença, ou não, de biofilmes ou filme mineral, o valor da *PDF* se altera. Considerando que a *PDF* modula o valor da reflectância, isto permite se diferenciar áreas de filmes minerais ou biogênicos na superfície marinha, em áreas de *sunlint*.

$$PDF(\beta, \bar{V}) = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_i^2} \exp\left(\frac{-\tan^2 \beta}{\sigma_i^2}\right) \quad (4)$$

Sendo:  $i = [\text{biofilme}; \text{água}]$

Para as imagens MODIS utilizadas no presente trabalho, e considerando a superfície marinha como isotrópica, a radiância de *sunlint* normalizada,  $LN_{MODIS}$ , é dada em função da *PDF*, do coeficiente de reflexão especular  $\rho$ , e dos ângulos  $\beta$  e  $\theta_{visada}$  por (Jackson e Alpers, 2010), conforme a Equação 5.

$$LN_{MODIS} = \frac{(L_{MODIS}) \cdot \pi}{F_o \cdot \cos \theta_{sol}} = \frac{\rho(\omega, \lambda) \cdot PDF_i}{4 \cdot \cos^4 \beta \cdot \cos \theta_{visada}} \quad (5)$$

Sendo:  $i = [\text{biofilme}; \text{água}]$

A radiância MODIS é normalizada pela radiância incidente ( $F_o \cdot \cos(\theta_{sol})$ ), sendo  $F_o$  obtido pelo espectro solar quantificado por Thuillier et al. (2003) pela irradiância  $158,74 \text{ mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ , para a banda MODIS centrada em  $0,645 \mu\text{m}$  com resolução espectral de  $0,01 \mu\text{m}$ . Para  $L_{MODIS} (\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1})$  utilizamos as radiâncias calibradas e georreferenciadas nível 1B.

Assim, podemos comparar a grandeza adquirida pelo sensor remoto MODIS com a modelada, desde que as condições geométricas de aquisição e velocidade do vento sejam conhecidas. A comparação entre a radiância incidente solar, unidade de energia por área do alvo e por ângulo sólido, com a radiância correspondente ao *sunlint* descreve a reflexão especular na direção do sensor em relação ao espalhamento isotrópico.

As imagens MODIS, em condição de *sunlint*, foram selecionadas e baixadas do site <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (*oceancolor*) em nível 1A. Observa-se neste site que as áreas em condição de *sunlint* são mascaradas para os produtos de concentração de clorofila. Nesta específica condição, a informação obtida pelo sensor remoto sobre o oceano é predominante da reflexão especular solar na superfície livre do mar e não da coluna d'água, ou primeira profundidade óptica. A mesma aquisição MODIS, processada para temperatura da superfície marinha (TSM) no canal  $11 \mu\text{m}$  não necessita de mascaramento, pois neste comprimento de onda o espectro solar tem pouca radiância, e não apresenta sinal redundante para as medidas de TSM. Estes diferentes mascaramentos foram, então, muito importantes para selecionar imagens contaminadas por *sunlint*, a partir do site *oceancolor*.

O produto de vento na superfície do mar utilizado neste trabalho foi o *Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector L3.0 First-Look Analyses*, que é disponibilizado pelo *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC) no site <http://podaac.jpl.nasa.gov>, com resolução temporal de 6 horas, entre julho de 1987 a dezembro de 2010, com resolução espacial de  $0,25 \text{ km}$  e cobertura global (ATLAS et al., 2011).

## 2.2 Segmentação de Imagens MODIS: Biofilmes e Água Limpa

Utilizando os parâmetros da geometria de aquisição MODIS e a magnitude média da velocidade do vento obtida quase simultaneamente na mesma área das imagens analisadas, e a formulação descrita no item anterior, modelamos dois comportamentos sintéticos, através da modelagem da *LN<sub>sunlint</sub>*: um para a superfície limpa, e o outro para região com substâncias surfactantes na superfície marinha.

Para a mesma imagem MODIS, à qual se estabeleceu os parâmetros da geometria de aquisição e vento, comparou-se para cada pixel a distância absoluta entre o resultado dos modelos para água limpa e com biofilmes. Assim, temos para cada *pixel* a radiância normalizada MODIS,  $LN_{modis}$  (longitude,latitude,tempo), e as “distâncias” radiométricas entre os valores modelados para biofilmes,  $LN_{biofilme\_modelado}$ (longitude,latitude,tempo) e  $LN_{água\_modelado}$ (longitude,latitude,tempo). O critério para distinguir entre biofilmes e águas límpidas, foi estabelecido pela menor distância entre os planos. A orientação e posição dos planos modelados, para biofilme e água limpa, podem se alterar por variações do vento e/ou geometria de aquisição. Esta oscilação na posição dos planos modelados, explica porque ora os filmes têm uma assinatura escura, ora são brilhantes em relação à cena. No caso em que o valor da  $LN_{MODIS}$  se encontra entre os dois planos modelados, o *pixel* é classificado como ambíguo. O fluxograma do processamento é mostrado na Figura 1.

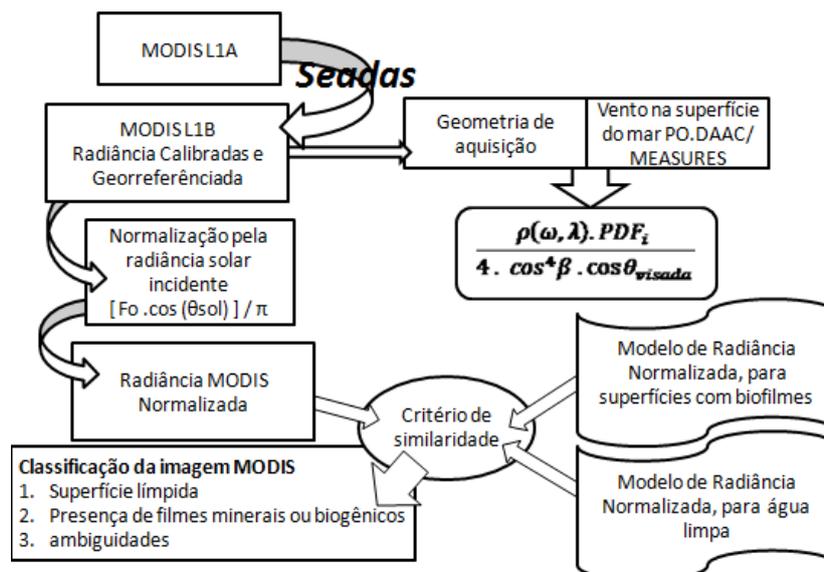


Figura 1. Fluxograma para o método de comparação entre  $LN_{MODIS}$  e  $LN_{sunlint}$ , com filmes na superfície marinha e água limpa A detecção de filmes surfactantes é feito pela similaridade entre  $LN_{sunlint}$  e  $LN_{MODIS}$ , o critério é a menor distância absoluta entre modelado e real.

## 3. Resultados e Discussões

Para avaliar o método proposto de detecção de filmes surfactantes usamos um caso confirmado de filme biogênico, original do metabolismo da cianobactéria *Trichodesmium*, captado pela aquisição MODIS Terra na condição de *sunlint*, no dia 26/01/2003 às 13:15 GMT. Como controle do método, usamos uma imagem MODIS Aqua na condição de *sunlint*, sem presença de filmes superficiais. Para tal, foi selecionada a aquisição MODIS Terra, no dia 24/01/2003 às 16:05 GMT, por se a mais próxima temporalmente e na mesma região.

### 3.1 Estudo de Caso: Biofilmes Originais do Bloom de *Trichodesmium* em 26/01/2003

Uma validação da técnica de detecção de filmes superficiais em imagens MODIS, na condição de *sunlint*, foi aplicada ao estudo de caso do dia 24/01/2003, onde ocorre uma larga

área com presença de filmes biogênicos originais do metabolismo da cianobactéria *Trichodesmium* (Figura 2). Observa-se na imagem MODIS *Aqua*, banda do visível centrada em 0,645  $\mu\text{m}$  (Figura 2), as feições produzidas pelos biofilmes caracterizados por um contraste brilhante de filamentos sobre a superfície marinha, em toda a área sem cobertura de nuvens. Ao avaliar a velocidade do vento, quase concomitante à aquisição da imagem MODIS em questão (não mostrada aqui), nota-se a presença de valores menores que  $2 \text{ ms}^{-1}$ . Nesta condição de vento o processo de dissipação das ondas de Bragg predomina sobre a formação.

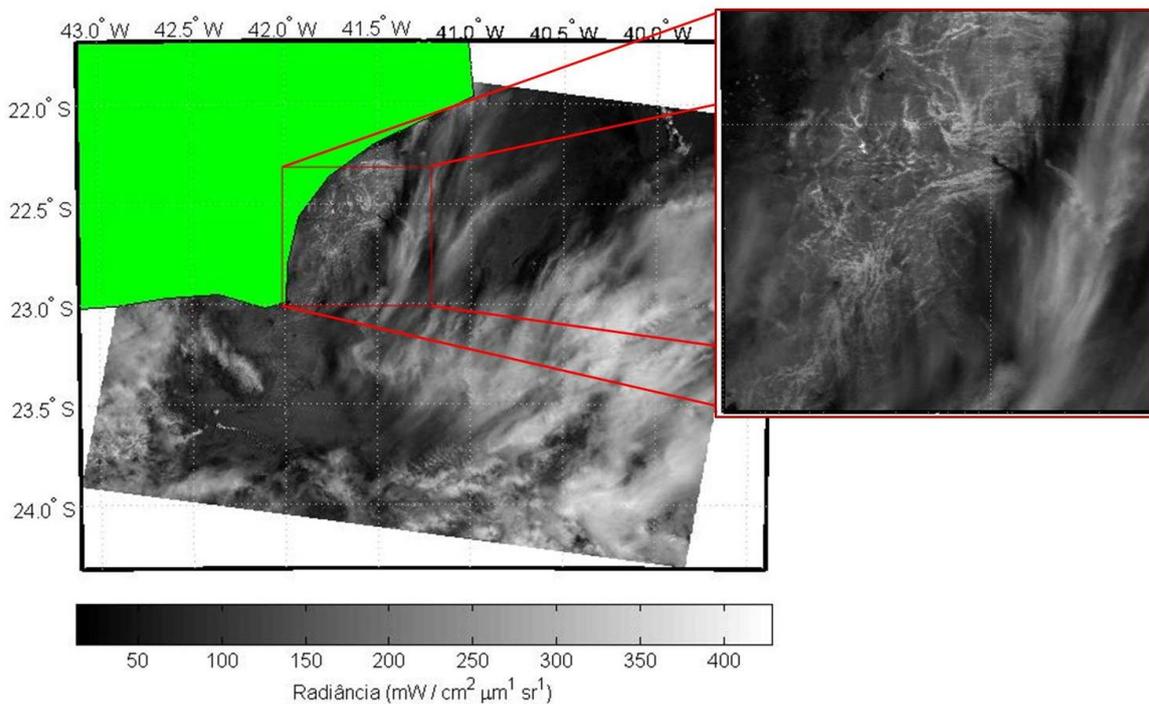


Figura 2. Imagem MODIS *Aqua*, banda centrada em 0.645  $\mu\text{m}$  de resolução espectral 0.01  $\mu\text{m}$ , dia 26/01/2003 às 13:05 GMT. Os biofilmes (filamentados e em branco), originais do metabolismo das cianobactérias *Trichodesmium*, podem ser melhor vistos no *zoom* à direita.

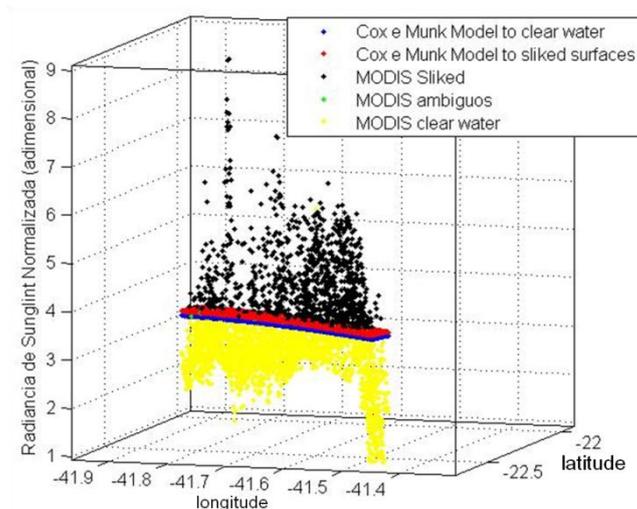


Figura 3. Processamento de segmentação da imagem MODIS em condição de *sun glint* (26/01/2003 às 16:05 GMT). O plano vermelho (azul) representa a modelagem para  $LN_{sun\ glint}$ , para superfícies na presença de filmes (água límpida). Os demais pontos são respectivos à  $LN_{MODIS}$  em condição de *sun glint*.

A ausência de ondas de *Bragg* impede, então, que filmes sejam claramente detectados por sensores SAR. Segundo a escala de vento Beaufort, o estado da superfície marinha é caracterizado por pequenas ondulações, mas sem quebra de ondas. Esta capacidade do *sunlint* em detectar filmes surfactantes, mesmo em condição de vento menor que  $2 \text{ ms}^{-1}$ , demonstra a importância do uso de técnicas do *sunlint* para monitorar filmes minerais ou biogênicos.

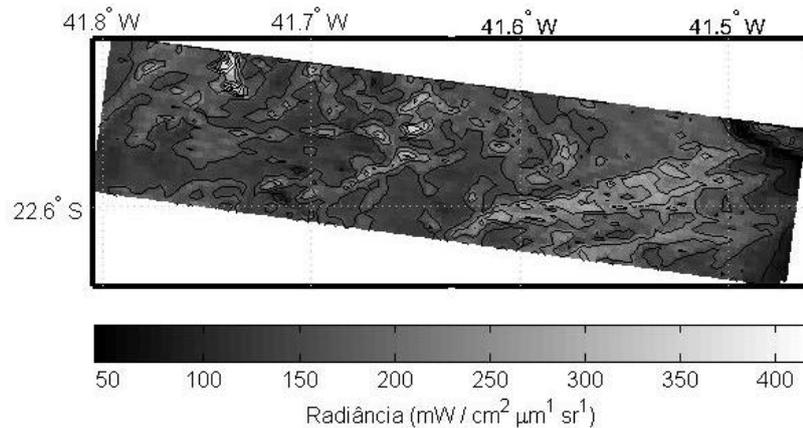


Figura 4. Faixa da imagem MODIS  $0,645 \mu\text{m}$  na condição de *sunlint*, Radiância nível 1B, dia 26/01/2003, 16:05 GMT. As áreas com presença de filmes biogênicos tem  $L_{MODIS}$  elevadas em relação às áreas não contaminadas. Linhas de contorno foram aplicadas, para evidenciar as variações devido à presença dos biofilmes.

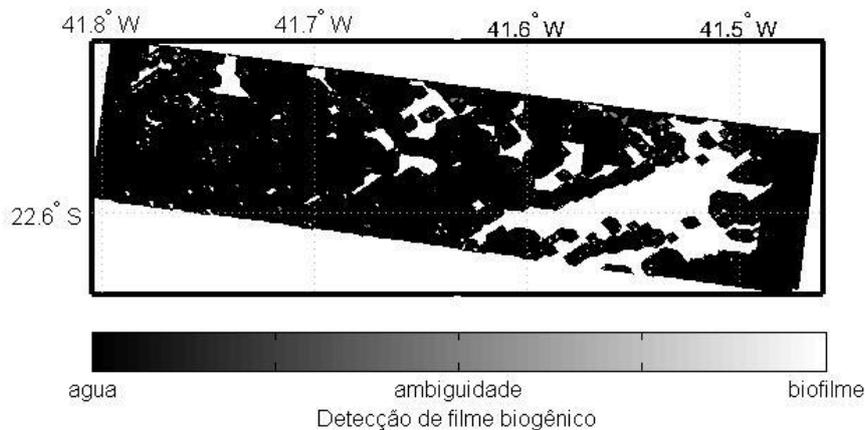


Figura 5. Resultado da segmentação para a detecção de filmes na imagem MODIS  $0,645 \mu\text{m}$  na condição de *sunlint*. Áreas brancas correspondem à detecção positiva para biofilmes.

Na Figura 3 é mostrado o fatiamento dos *pixels*, onde os planos modelados de  $LN_{sunlint}$ , para a presença de filmes e para água limpa, são comparados com a  $LN_{MODIS}$ . Os pontos amarelos (pretos) são aqueles determinados para superfície limpa (com presença de filmes) devido a maior proximidade do plano modelado para água límpida (do plano para filmes). Alguns pontos verdes correspondem às ambiguidades.

Como esperado, nota-se que os valores modelados diferem em relação ao valor adquirido via sensoriamento remoto. Uma das causas desta variação remete à influência da atmosfera na aquisição, por meio dos efeitos de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética, assim como imprecisões na medida do vento real em cada *pixel*. As regiões dentro da imagem consideradas ambíguas podem representar além da imprecisão do método, casos em que num mesmo *pixel*, há áreas com e sem a presença de biofilmes.

A Figura 4 corresponde à região da imagem de  $LN_{MODIS}$  que apresenta os filmes biogênicos e onde se vê os valores mais altos em relação às áreas escuras, caracterizadas por superfícies límpidas. Essa interpretação concorda com a segmentação apresentada, resultado do método de detecção de filmes no *sunlint* (Figura 5).

### 3.2 Imagem de Controle: Sem Filmes Biogênico ou Minerais

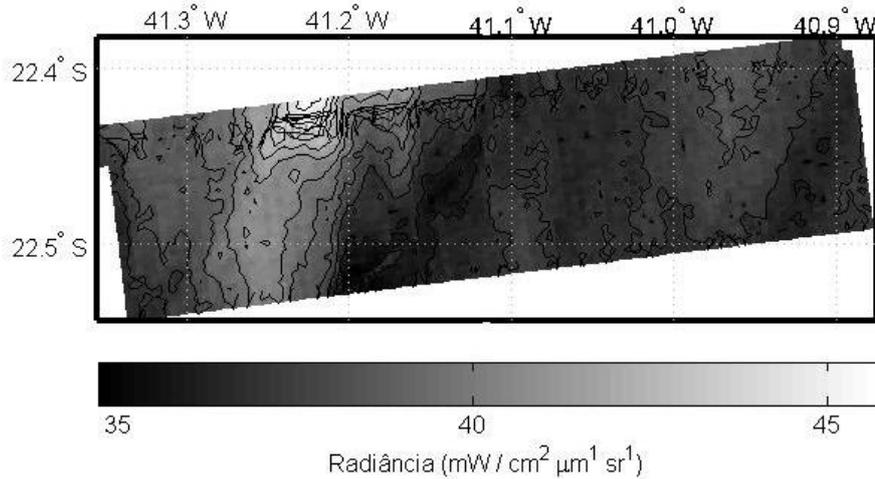


Figura 6. Imagem MODIS Terra, 0,645  $\mu\text{m}$ , na condição de *sunlint*. Embora ocorram variações na intensidade da radiância nível 1B, estas alterações devem-se à geometria de aquisição e interações oceano-atmosfera, como por exemplo, variações no campo de vento.

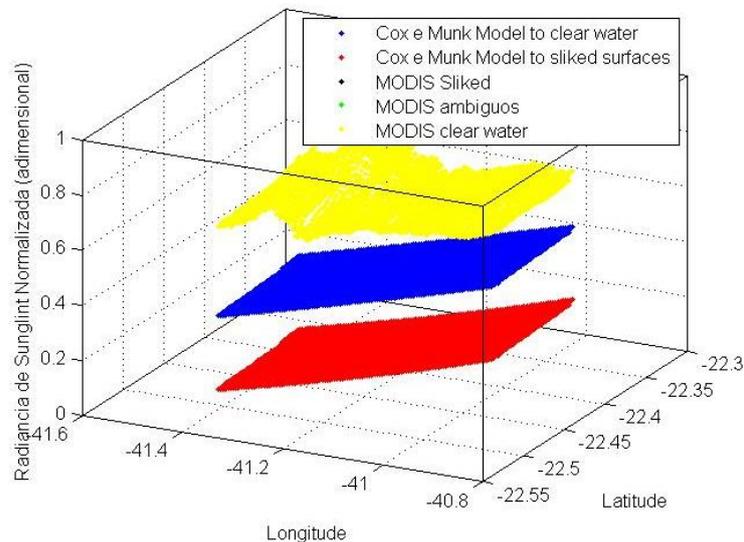


Figura 7. Processamento realizado para segmentar a imagem MODIS em condição de *sunlint*, de 24/01/2003 às 16:05 GMT. O plano vermelho (azul) representa  $LN_{sunlint}$ , para superfícies na presença (sem filmes). Os demais pontos são respectivos à  $LN_{MODIS}$  em condição de *sunlint*. Os pontos amarelos correspondem, portanto, à superfície limpa. Conforme o esperado, não foi detectada a presença de filme surfactante.

Para uma melhor avaliação deste método de detecção de filmes superficiais, selecionamos uma imagem na condição de *sunlint*, na mesma área da imagem com presença de biofilmes, na aquisição mais próxima possível em tempo e sem cobertura de nuvens. Nesta imagem

(Figura 6) do MODIS *Terra*, banda 0.645  $\mu\text{m}$ , com vento médio quase simultâneo próximo a  $5 \text{ ms}^{-1}$ , o modelo não evidencia a presença de filmes superficiais. O gráfico de fatiamento demonstra que todas as  $LN_{MODIS}$  têm valores mais próximos ao plano de  $LN_{sun\text{glint}}$  modelada para superfícies limpas, ou seja, livre de substâncias tenso ativas.

#### 4. Conclusões

A condição de imagens *sun\text{glint}*, mesmo ocorrendo somente em determinadas épocas do ano, em função do zenite solar e da dependência da pouca ou nenhuma cobertura de nuvens, pode incrementar de modo significativo o uso potencial de sensores remotos na faixa do visível para o monitoramento de filmes minerais e biogênicos na superfície marinha.

No estudo de caso apresentado neste trabalho demonstra-se que o *sun\text{glint}* pode ser eficiente ferramenta para detecção de filmes, mesmo em situação de vento bem fracos ( $< 2 \text{ ms}^{-1}$ ). Nesses casos, com a ausência de ondas de Bragg responsáveis pelo retro-espalhamento radar, o uso de imagens SAR para diferenciar filmes de outros alvos escuros se torna difícil, se não, impossível. Podemos concluir dizendo que a técnica de detecção de filmes apresentada foi eficiente em distinguir água de biofilmes. É importante ser reconhecido, entretanto, que uma validação robusta da técnica demanda a análise de um conjunto maior de casos.

#### Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da FUNCATE e PETROBRAS.

#### Referências Bibliográficas

ATLAS, R.; HOFFMAN, R.; ARDIZZONE, J.; LEIDNER, S.; JUSEM, J.; SMITH, D.; GOMBOS, D. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. **Bulletin of American Meteorological Society**, p. 157-174, 2011.

ALPERS, W.; ESPEDAL, H. A. **Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual: Oils and Surfactants**. Washington: NOAA. 2004.

COX, C.; MUNK, W. Measurement of the roughness of sea surface from Photographs of the sun's glitter. **Journal of the optical society of America**, v. 44, n. 11, p. 838-850, 1954.

GAGLIARDINI, D.; CLEMENTE-COLÓN, P. Ocean feature detection using microwave backscatter and sun glint observations. **Gayana (Concepc.), Concepción**, v. 68, n. 2, 2004 .

HOLT, B. **Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual: SAR Imaging of the Ocean Surface**. Washington: NOAA. 2004. Disponível em: < <http://www.sarusersmanual.com/> > Acesso em: 11 fev. 2011.

MYASOEDOV, A.; KUDRYAVTSEV, V.; CHAPRON, B.; JOHANNESSEN, J. Sun\text{glitter} imagery of the ocean surface phenomena. **Proceedings of the 3rd International Workshop SEASAR**, 2010.

THUILLIER, G., M. HERSÉ, P. C. SIMON, D. LABS, H. MANDEL, D. GILLOTAY, AND T. FOUJOLS, 2003, The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS 1-2-3 and EURECA missions. **Solar Physics**, v. 214, n. 1, p. 1-22, 2003.