

**Mapeamento e caracterização de ondas internas ao largo da foz do rio Amazonas através do sensor modis - satélite terra (2008 a 2019)**

**Mapping and characterization of internal waves off the Amazon river through the modis sensor – terra satellite (2008 to 2019)**

DOI:10.34117/bjdv7n3-024

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 01/03/2021

**Marcelo Caetano Barreto Rosa**

Mestrando em Geofísica – Área de Concentração em Oceanografia Física  
Instituição: Universidade Federal da Bahia – IGEO/UFBA – Salvador  
Endereço: Rua Barão de Jeremoabo, s/n - Ondina, Salvador - BA, 40170-290  
E-mail: marcelorosa2005@yahoo.com.br

**Pablicio Vieira Moura**

Licenciado em Geografia  
Instituição: Universidade Federal da Bahia – IGEO/UFBA – Salvador  
Endereço: Rua Barão de Jeremoabo, s/n - Ondina, Salvador - BA, 40170-290  
E-mail: pabliciomoura@hotmail.com

**Luís Felipe Ferreira de Mendonça**

Doutor em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituição: Universidade Federal da Bahia – IGEO/UFBA – Salvador  
Endereço: Rua Barão de Jeremoabo, s/n - Ondina, Salvador - BA, 40170-290  
E-mail: luis.mendonca@ufba.br

**Carlo Alessandre Domingos Lentini**

Doutor em Oceanografia Física e Meteorologia pela Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science  
Instituição: Universidade Federal da Bahia – IF/UFBA – Salvador  
Endereço: Travessa Barão de Jeremoabo, s/n – Ondina, Salvador – BA, 40170-280  
E-mail: clentini@ufba.br

**RESUMO**

Com base em 12 anos (janeiro de 2008 a dezembro de 2019) de imagens de satélite obtidas pelo sensor MODIS, a bordo do satélite EOS-TERRA, foram identificadas quatro regiões de geração de ondas internas solitárias (OIS), na foz do rio Amazonas. Dentro dessas regiões, registrou-se um total de 400 ondas em 63 imagens apenas durante os meses de agosto a outubro, devido às condições favoráveis de *sun glint* e sem cobertura de nuvens. Desse total, foram observados 243 sólitons em 92 pacotes, com uma média de ~ 3 ondas/pacote, enquanto o restante das OIS apresentou apenas a onda interna principal. O ângulo de propagação médio é de 30° com relação ao Norte Verdadeiro (NV), com um comprimento de crista de pouco menos de 50 até 200 km associado a essa direção

predominante. À medida que os meses avançaram, não só uma parte dessas ondas sofre refração e passa a se propagar com um ângulo de  $45^\circ$  em relação ao NV, mas também ocorre um aumento no comprimento de suas cristas, atingindo valores de 50 a 300 km. O histograma de distribuição de classes de comprimento de crista de onda (em km) apresenta uma distribuição unimodal, deslocada para a esquerda em direção a comprimentos de crista inferiores a 150 km, que juntos perfazem um total de  $\sim 80\%$  das observações. O comprimento de crista de onda médio para o período de estudo é de 100 km. A média da frequência de distribuição intrapacotes para todo o período é igual a 8 km, ao passo que a média interpacotes é de 117 km. Os resultados indicam que essas ondas se formam na região da quebra da plataforma/talude em quatro sítios distintos devido à interação da maré barotrópica com a topografia e se propagam em direção ao oceano aberto, sofrendo uma refração sazonal para leste devido à sazonalidade da Contracorrente Norte Equatorial.

**Palavras-chave:** sólitons, componente de maré  $M_2$ , Contracorrente Norte Equatorial, NECC, *sunlint*.

## ABSTRACT

Based on 12 years (January 2008 to December 2019) of MODIS images on board the EOS-TERRA satellite, four regions of internal solitary wave (ISW) generation were identified off the Amazon river mouth. Within these regions, a total of 400 waves in 63 images were recorded only during the months of August to October, due to favorable sunlint conditions and no cloud cover. Out of this total, 243 solitons were observed in 92 wave packages, with an average of  $\sim 3$  waves/package, while the rest of the ISW presented only the main internal wave. The average propagation angle is  $30^\circ$  with respect to the True North (TN), with crest lengths under 50 to 200 km associated with this predominant direction. As the months progress, not only part of these waves undergo refraction and start to propagate with an angle of  $45^\circ$  in relation to the TN, but there is also an increase in the length of their crests, reaching values of 50 km up to 300 km. The histogram of distribution of wavelength classes (in km) shows a unimodal distribution, skewed to the left towards crest lengths less than 150 km, which together make up a total of  $\sim 80\%$  of the observations. The average wavelength for the study period is 100 km. The average frequency of intra-package distribution for the entire period is equal to 8 km, whereas the average inter-package is 117 km. The results indicate that these waves are formed in the region of the shelf-break/slope in four different sites due to the interaction of the barotropic tide with the topography and propagate towards the open ocean, suffering a seasonal refraction towards the east due to the seasonality of the North Equatorial Countercurrent.

**Keywords:** solitons,  $M_2$  tidal component, North Equatorial Countercurrent, NECC, sunlint.

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar de ser uma região oceanograficamente importante, a foz do rio Amazonas e a plataforma continental adjacente ainda se encontram pouco estudadas. Ao largo desta foz, Ondas Internas (OI), sólitons e frentes são observadas desde meados dos anos 90 por

fotografias aéreas e dados de sensoriamento remoto, tanto na faixa do espectro visível como no de micro-ondas. Essas observações apontam para a importância relativa dessas feições de mesoescala na dinâmica da região, com aplicações na indústria de extração de óleo e gás, produção primária, transporte larval e sedimento em suspensão, bem como nos modelos de circulação oceânica.

De fato, as OI e sólitons desempenham um papel relevante em Oceanografia para muitas razões de ordem prática, uma vez que são uma fonte de energia para trocas verticais e horizontais de momentum, mistura turbulenta de águas superficiais e profundas, transporte de massa e remobilização de organismos marinhos, sedimentos e poluentes (e.g., Garret & Laurent, 2002). Elas ocorrem em subsuperfície, tendendo a se concentrar nas regiões de descontinuidade ou interface entre fluidos com densidades diferentes como a termoclina oceânica. Entretanto, sua existência depende apenas de uma estratificação vertical estável, i.e. a densidade do fluido aumentando com a profundidade.

Além disso, boa parte delas estão associadas ao vai-e-vem das marés. Estas, além de provocarem variações do nível do mar, geram correntes de maré com a mesma variabilidade temporal. A interação entre as correntes de marés barotrópicas e irregularidades na batimetria do fundo oceânico cria perturbações verticais na estrutura de densidade da coluna d'água. Tais perturbações podem se propagar tanto em direção à costa (i.e., "*onshore*") quanto ao largo dela (i.e., "*offshore*"), como uma OI com períodos distintos, mas por vezes com frequências iguais a de sua forçante original (e.g., Rattray, 1960; Wunsch, 1975). Nesse contexto, são chamadas de marés internas ou marés baroclínicas. De fato, essas marés internas são geradas com maior intensidade e são observadas com frequência em regiões com forte gradiente topográfico, como taludes, quebras da plataforma continental, cânions e deltas submarinos (e.g., Huthnance, 1989; Nittouer & Demaster, 1996).

Dependendo das condições da estratificação nas camadas oceânicas, campo de profundidade e da circulação, as marés internas podem sofrer processos não-lineares, gerando trens de Ondas Internas Solitárias (OIS), ou sólitons. As OIS podem apresentar amplitudes de dezenas de metros e tem velocidade de propagação proporcional à sua amplitude. Como nas ondas de superfície, esses trens de sólitons podem sofrer processo de arrebenção, gerando turbulência e por vezes, aumento da turbidez da água (e.g., Lauton et al, 2021).

As OIS são feições oceanográficas proeminentes, frequentemente observadas em águas costeiras e oceânicas através de imagens de satélites obtidas por sensores óticos ou

radares (e.g., Jackson, 2004; 2007). Essas ondas podem se propagar ao longo de várias centenas de quilômetros, transportando massa e momentum. De fato, uma das primeiras motivações cruciais para estudá-las ocorreu inesperadamente, decorrente de registros de altos estresses e tensões que elas impõem em plataformas de perfuração de óleo e gás *offshore* (Osborne et al., 1978; Almeida-Filho et al., 2005; Goff et al., 2010). Devido ao efeito baroclínico, suas amplitudes da ordem de dezenas a centena de metros, resultam em áreas de forte convergência superficial e/ou intensas correntes próximas ao fundo, que podem ser perigosas para operações marítimas tais como aquelas associadas à extração de petróleo e gás natural.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho consiste em utilizar dados derivados de sensores imageadores que atuam na faixa do visível do espectro de energia eletromagnética em condição de *sun glint*, a fim de investigar o campo de OIS e seus possíveis sítios de geração na região ao largo da foz do Rio Amazonas. Imagens na faixa do visível sem cobertura de nuvens e em condição de *sun glint* são usadas para a detecção dessas feições lineares, pois os mecanismos de modulação das facetas da superfície do mar em pequenas escalas, que produzem o *glint*, são basicamente os mesmos que determinam a seção reta de radar na faixa de micro-ondas nas imagens de radar de abertura sintética.

### 1.1 ÁREA DE ESTUDO

A plataforma Norte do Brasil, que se estende da Venezuela (10°N, 60°W) à borda oriental do Brasil (5°S, 35°W), compreende a Plataforma Continental Amazônica (PCA). Do ponto de vista fisiográfico, segundo Castro & Miranda (1998), a PCA é delimitada pelo Cabo Orange (~4°30'N) no estado do Amapá, e pela Baía de Turiaçu (~2°S) no Maranhão. Nessa extensão de cerca de 1.000 km, a largura da plataforma varia entre 125 km e 165 km nas proximidades do Cabo Orange e na Baía de Turiaçu, respectivamente, sendo a parte mais larga (i.e., ~ 300 km) encontrada nas proximidades da Foz do Rio Amazonas (**Figura 1**).

Devido a sua localização, a PCA ainda é um ambiente relativamente pouco impactado, onde os processos físicos e hidrodinâmicos são pouco afetados por influências antropogênicas. A PCA é um ambiente marinho único, sujeito a uma gama de processos hidrodinâmicos complexos, correlacionados tanto localmente quanto remotamente. Sendo associados à elevada descarga fluvial do Rio Amazonas, influência das marés

intensas em algumas sub-regiões e a ação dos ventos Alísios e da Corrente Norte do Brasil (Figura 1).

O Rio Amazonas é um dos maiores do mundo tanto em comprimento quanto em vazão, sendo responsável por cerca de 16% de todo o volume de água doce desaguado nos oceanos (Muller-Krarger et al., 1988). Sua vazão máxima ocorre de maio a julho, enquanto a mínima, de outubro a novembro, com valores da ordem de  $1,2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $2,0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  (e.g., Dagg et al., 2004; Coe et al., 2002; 2007). A pluma do Rio Amazonas, cuja assinatura é marcada por águas de baixa salinidade, contém nutrientes, sedimentos em suspensão e material dissolvido, além de uma dinâmica instável e sujeita às mesmas forçantes descritas acima para a PCA.

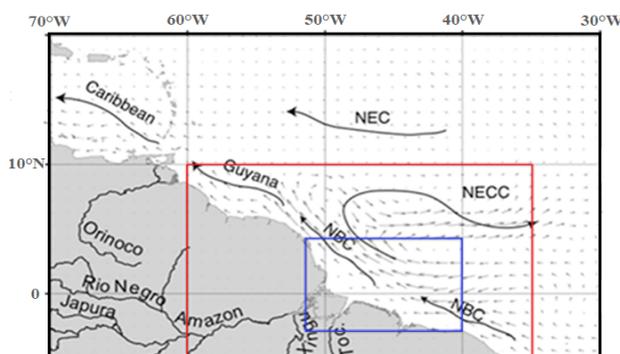


Figura 1: Principais correntes observadas na troposfera oceânica do Oceano Atlântico Tropical Oeste que atuam na Plataforma Norte do Brasil (retângulo vermelho) e Plataforma Continental Amazônica (retângulo azul): Corrente Norte do Brasil (NBC), Corrente Norte Equatorial (NEC), Contracorrente Norte Equatorial (NECC) e Corrente das Guianas. Fonte: Lentini et al. (2021 – no prelo).

Embora a enorme descarga de água fluvial gere uma frente halina bem definida, os processos dinâmicos na PCA são dominados pela forte circulação das marés diurnas (Castro & Miranda, 1998; Nittrouder & Demaster, 1996; Lentz & Limeburner, 1995). Por ser uma plataforma larga, as marés nessa região são cooscilantes, apresentando propagação quase-perpendicular à costa em sintonia com o oceano profundo. Entretanto, a maré barotrópica, principalmente as componentes semidiurnas  $M_2$ ,  $S_2$  e  $N_2$ , apresenta grande amplificação na PCA em consequência do fenômeno de quase-ressonância, que ocorre em plataformas cuja largura é de aproximadamente  $1/4$  do comprimento de onda de maré (e.g., Huthnance, 1989). Beardsley et al. (1995) descrevem a maré  $M_2$  como uma onda quase-ressonante com amplitudes de 3 metros, aproximadamente. As correntes de maré na região são caracterizadas como fluxos intensos de até  $\sim 2,0 \text{ m/s}$ , preferencialmente polarizadas na direção perpendicular à costa.

Poucas pesquisas científicas foram feitas sobre ondas internas e sólitons ao longo da costa brasileira (e.g., Lorenzetti e Diaz, 2013), especialmente no litoral nordestino do Brasil ou ao largo dele, sejam com dados oceanográficos *in situ* (Ivanov et al. 1993; Brandt et al., 2002), dados derivados de satélites, como os de radar de abertura sintética (SAR - Lentini et al., 2016; Magalhães et al. 2016) e sensores óticos na faixa do visível (MODIS – Jackson, 2002; 2004; 2007).

De fato, os trabalhos pioneiros de Ivanov et al. (1993) e Brandt et al. (2002) relatam a ocorrência de OI e OIS nas imediações da Foz do Rio Amazonas e adjacências. Com base em dados oceanográficos coletados *in situ* no período de 25 de abril a 12 de maio de 1989 e através de uma ecossonda de 169 KHz com uma largura de feixe de 2°, Ivanov et al. (1993) observaram a presença de ondas internas com períodos que variavam entre 3 a 30 minutos, embora não tenham conseguido distinguir pacotes de ondas ou ondas internas solitárias em seus dados. Por outro lado, utilizando um perfilador acústico de corrente do tipo Doppler de 75 KHz montado no casco do R/V *Sonne*, Brandt et al. (2002) identificaram a presença de OIS ao largo da Foz do Rio Amazonas em 12 de novembro de 2000. De posse de dados oceanográficos de alta resolução, esses autores observaram a presença de três OIS de grande amplitude propagando-se a mais de 500km da plataforma continental e perpendicular a ela na direção N-NE, sobrepostas ao campo de velocidades associado à Contracorrente Norte Equatorial (NECC). Essas ondas apresentaram velocidades de fase da ordem de 2 m/s e velocidades verticais da ordem de 20 cm/s, com uma distância entre ondas (i.e., interpacotes) de ~ 70 km.

Com base em uma imagem MODIS adquirida em 13 de agosto de 2003 às 16:05 UTC com *sun glint*, Jackson (2007) observou OIS aproximadamente a 500 km da Foz do Rio Amazonas que se estenderam por mais de 700 km em direção ao oceano aberto. Segundo o autor, essas OIS apresentaram uma velocidade média de propagação de 3,3 m/s, que é consistente com a distância de separação de 135 km interpacotes, sugerindo que essas ondas foram geradas em períodos semidiurnos da constituinte de maré  $M_2$ .

Lentini et al. (2016) embora tenham identificado três grupos distintos de OIS através de imagens SAR de acordo com sua direção de propagação, esses autores reportaram, pela primeira vez na literatura, a ocorrência de sólitons propagando-se sobre a plataforma continental e na direção contrária à Corrente Norte do Brasil (NBC). De acordo com esses resultados, as OIS apresentaram distância interpacotes de ~ 4 km, com comprimentos de crista médios de 10 km e distância intrapacotes de ~ 500 m. Essas ondas internas são observadas ao longo de todo o ciclo semidiurno e quinzenal das marés, mas

sua origem parece resultar principalmente da interação da NBC, modulada pelas correntes de maré à medida que fluem sobre a topografia de fundo raso (i.e., isóbata de 80 metros).

Entretanto, apesar de alguns avanços científicos na determinação e caracterização das ondas internas na região da Plataforma Continental Amazônica e adjacências, nenhum trabalho até então sugeriu a região de formação dessas ondas ao largo. Foi o trabalho de Magalhães et al. (2016) o primeiro a indicar duas possíveis regiões de geração dessas OIS observadas a partir da quebra da plataforma continental propagando-se em direção ao oceano profundo. Com base em um conjunto de 17 imagens SAR, os autores observaram dois sítios de geração de OIS na quebra da plataforma definidos como “A” e “B” (vide Figuras 9 e 10 dos autores). Essas OIS propagam-se na direção média de 40° (sítio A) e 60° (sítio B) com relação ao Norte Verdadeiro para o oceano aberto, com velocidades médias ~ 3 m/s, com um comprimento de crista médio de 150 km e com um a dois sólitons/pacote.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

Neste trabalho, utilizamos dados derivados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2019. O MODIS voa a bordo do satélite Terra, um dos carros-chefe da missão *Earth Observing Systems* (EOS) e originalmente conhecido como “EOS AM-1”. Esses doze anos de dados foram obtidos através da “*Level 1 and Atmosphere Archive & Distribution Systems Distributed Active Archive Center at Goddard Space Flight Center*” (LAADS DAAC) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) pelo portal digital <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>.

O satélite Terra, que apresenta uma órbita héliosíncrona, quase-polar circular de Norte a Sul voando a uma altitude de ~ 705 km e um tempo de duração de órbita de 98,1 minutos, imageia a superfície do planeta diariamente e tem um tempo de revisita de 16 dias (<https://terra.nasa.gov/>). Seu horário de passagem pela linha do Equador é aproximadamente 10:30 UTC; daí vem seu acrônimo EOS-AM1 (daqui para frente, definido como EOS-TERRA). Projetado e construído nas décadas de 1980 e 90, os engenheiros da NASA e da Lockheed Martin decidiram construir um satélite que pudesse fazer medições simultâneas da atmosfera, terra e água. Sua missão - entender como a superfície do planeta está em constante mudança.

O MODIS, um dos cinco sensores a bordo do EOS-TERRA, possui uma resolução espacial de 250, 500 e 1.000 metros, e 36 bandas espectrais que vão desde a faixa do visível até a do infravermelho (0,4  $\mu$ m a 14,4  $\mu$ m). Para mais informações sobre o sensor e suas características, o leitor deve consultar o link <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/>.

## 2.2 SELEÇÃO DAS IMAGENS E PROCESSAMENTO DIGITAL

Com base no banco de imagens disponíveis no LAADS DAAC, foram selecionadas as cenas que continham a condição de “*sun glint*”, fenômeno no qual o sol reflete de forma quase que especular na superfície do oceano (i.e., com o mesmo ângulo de visada do satélite - **Figura 2**). Graças à condição de *glint*, as ondas internas e sólitons, que ocorrem em subsuperfície, podem ser detectadas em superfície por conta da diferença de rugosidade oriunda da sua propagação. Isto porque, o movimento de propagação dessas feições no interior do oceano gera zonas de convergência e divergência de massa d’água. Essas zonas apresentam rugosidades diferentes na superfície do mar, gerando uma zona clara versus uma zona sombreada, que ficam evidentes quando aparecem em imagens de *sun glint*.

Desta forma, as imagens que continham *glint* foram selecionadas através dos *quicklooks*, que são um “*preview*” da cena imageada, e em seguida baixadas para pré e pós-processamentos. De posse desse subconjunto, as imagens selecionadas foram processadas no software SNAP (*The Sentinel Application Platform* – Plataforma de Aplicações do Sentinel - <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), corrigidas, georreferenciadas, reprojatadas sob o datum WGS-84 e vetorizadas com o auxílio de softwares de processamento digital de imagens.

Uma vez que as OIS foram identificadas visualmente nas imagens MODIS, com o auxílio de ferramentas de processamento digital de imagens e realce adequados nas mesmas, propriedades geométricas dessas feições como, p. ex., largura do sóliton, comprimento da crista, comprimento do pacote, números de ondas por pacote e distância entre pacotes puderam ser extraídas desse subconjunto.

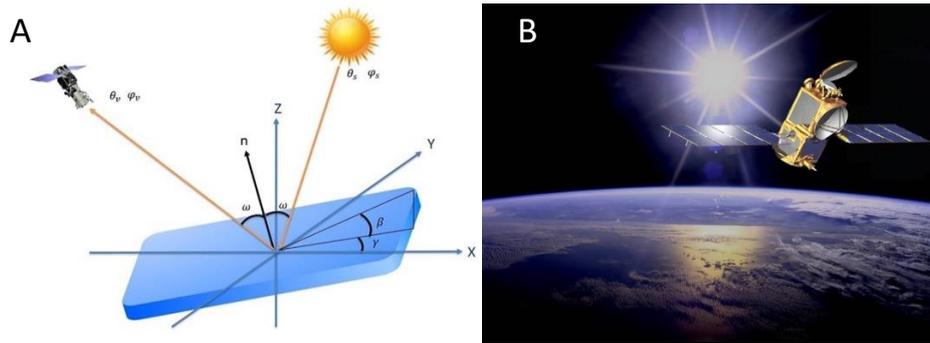


Figura 2: A) Figura esquemática da geometria em condição de *sunlint* (Fonte: Martin et al 2016) e B) imagem ilustrativa de *glint* sobre a superfície do planeta (Fonte: <https://www.jpl.nasa.gov/news/successful-ocean-monitoring-satellite-mission-ends>)

### 3 RESULTADOS

A figura 3A mostra uma imagem MODIS EOS-TERRA para o dia 02 de outubro de 2008 ao largo da Foz do Rio Amazonas em condição de *sunlint*. Conforme mencionado anteriormente (i.e., Introdução), a resposta dos mecanismos de modulação das facetas da superfície do mar em pequenas escalas, que produzem o *glint*, é basicamente a mesma que determina a seção reta de radar na faixa de micro-ondas nas imagens SAR. Desta forma, podemos observar o campo de OIS (**Figura 3B**), sua direção e ângulo de propagação relativos ao Norte Verdadeiro (NV - linha vermelha pontilhada, **Figura 3C**), quantidade de ondas/pacote, distância entre ondas de um mesmo pacote (i.e., distância intrapacote) e entre pacotes (i.e., distância interpacote) de OIS durante três ciclos da componente de maré  $M_2$  (i.e.,  $M_2 0$ ,  $M_2+1$ ,  $M_2+2$ , respectivamente).

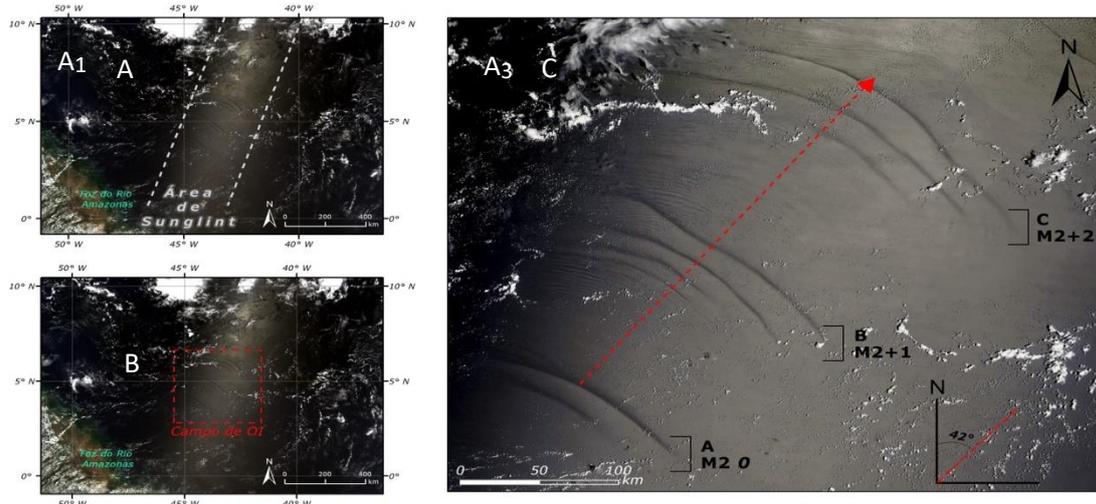


Figura 1: A) Imagem MODIS EOS-TERRA para o dia 02 de outubro de 2008 ao largo da Foz do Rio Amazonas em condição de *sunlint*, B) mostrando um campo de Ondas Internas (OI) que se propaga em direção ao oceano aberto (i.e., *offshore*) e a C) a direção de propagação dessas ondas com relação ao Norte Verdadeiro (linha vermelha pontilhada) durante três ciclos da componente de maré  $M_2$  ( $M_2 0$ ,  $M_2 +1$ ,  $M_2 +2$ , respectivamente).

Com base na série temporal de 12 anos (janeiro de 2008 a dezembro de 2019) de imagens diárias derivadas do sensor MODIS EOS-TERRA, foram identificadas quatro regiões de geração de ondas internas solitárias (sítios A, B, C e D – **Figura 4B**) que correspondem a um total de 400 ondas observadas em 63 imagens apenas durante os meses de agosto a outubro, devido às condições favoráveis de *sunlint* e sem cobertura de nuvens (**Figura 4**). Desse total, foram observados 243 sólitons em 92 pacotes, com uma média de ~ 3 ondas/pacote. O restante das OIS apresentou apenas a onda interna principal. Essas ondas se formam na região da quebra da plataforma/talude em quatro sítios distintos devido à interação da maré barotrópica com a topografia e se propagam em direção ao oceano aberto (**Figura 4B**).

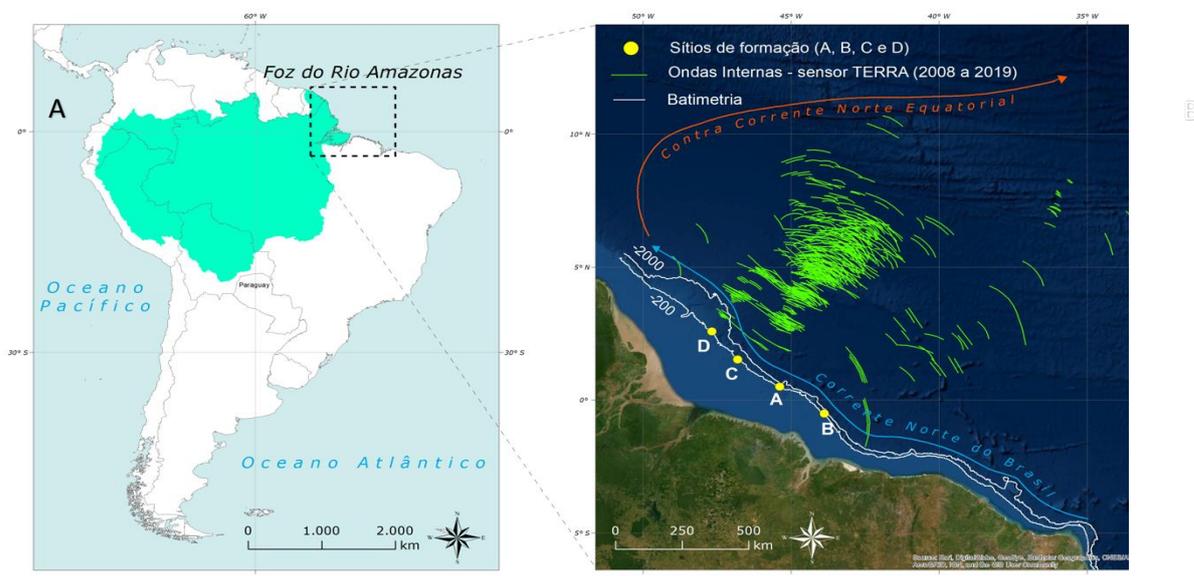


Figura 4: A) América do Sul com a bacia de drenagem Amazônica (polígono verde) e a região de estudo ao largo da Foz do Rio Amazonas (retângulo preto pontilhado); B) Zoom na região interesse. As linhas em verde mostram as OIS observadas e os seus respectivos sítios de formação (círculos amarelos – letras A, B, C e D). Sítios C e D foram identificados neste trabalho apenas, ao passo que A e B também foram identificados por Magalhães et al (2016). As linhas em branco representam as isóbatas de 200m e 2.000m. A seta em azul indica a Corrente Norte do Brasil e em vermelho, a Contracorrente Norte Equatorial.

O ângulo de propagação médio é de 30° com relação ao NV, com um comprimento de crista entre pouco menos de 50 km até 200 km associado à direção predominante. Nota-se que à medida que os meses avançam, não só uma parte dessas ondas sofre refração e passa a se propagar com um ângulo de 45° em relação ao NV, mas também ocorre um aumento no comprimento de suas cristas, atingindo valores de 50 a 300 km (**Figura 5 – A, B e C**).

O histograma de distribuição de classes de comprimento de crista de onda (em km) apresenta uma distribuição unimodal, deslocada para a esquerda em direção a comprimentos de crista inferiores a 150 km, que juntos perfazem um total de ~ 80% das observações (**Figura 5 – D, E, F**). As classes dominantes (~ 42%) correspondem a comprimentos de onda de 50 a 100 km e comprimento de crista médio para o período de estudo foi de 100 km, apesar de pequenas diferenças em seus valores médios: agosto com 100 km, setembro com 90 km e outubro, 108 km.

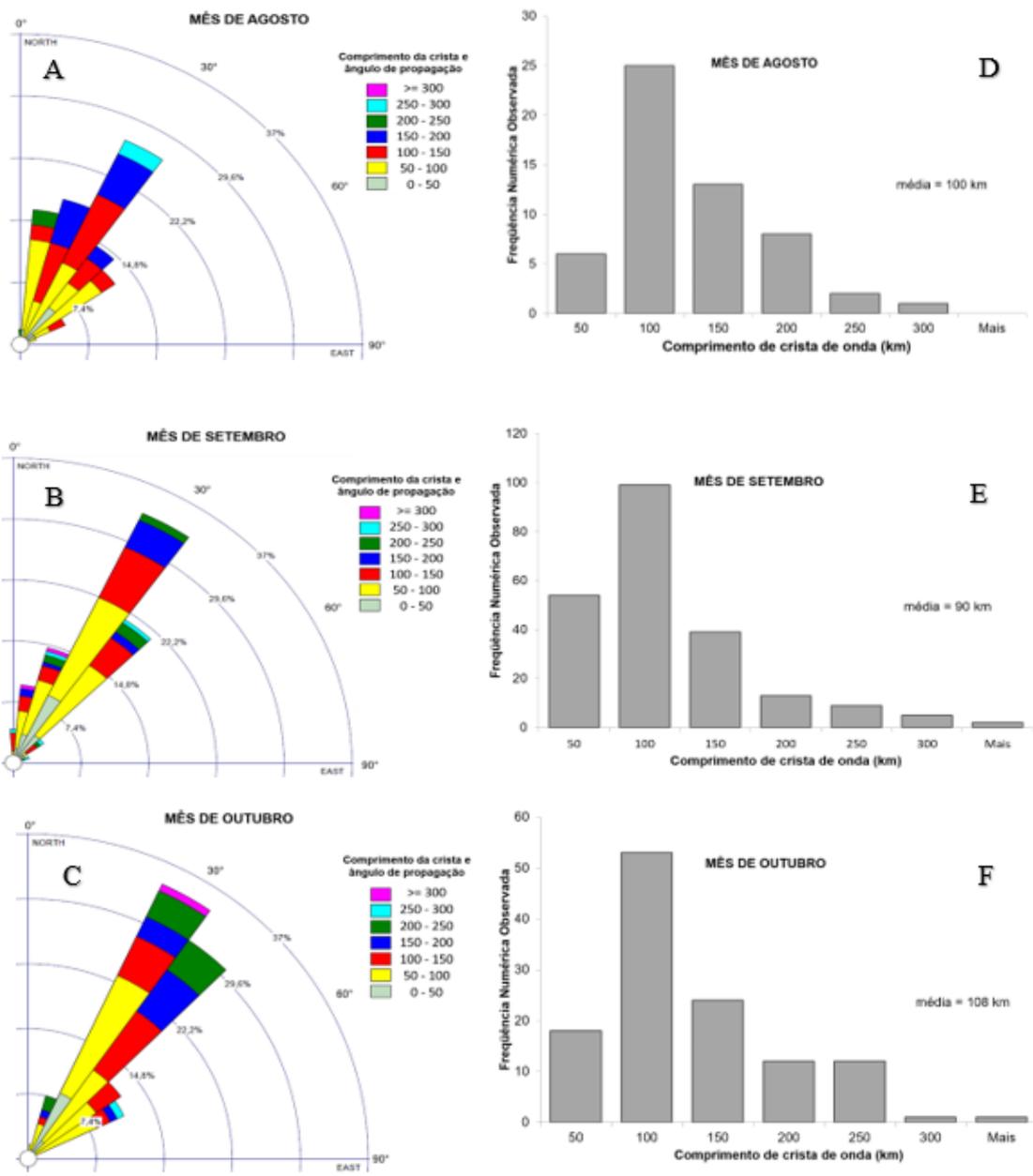


Figura 5: Ângulos de propagação da OIS e seus respectivos comprimentos de crista de onda (A, B e C) com base na série temporal de 12 anos (janeiro de 2008 a dezembro de 2019) de imagens diárias derivadas do sensor MODIS EOS-TERRA. Nota-se que à medida que os meses avançam, não só uma parte dessas ondas

passa a se propagar a 45° relativo ao Norte Verdadeiro, mas também aumenta o comprimento das cristas das ondas. Frequência de distribuição dos comprimentos das cristas de ondas, assim como o comprimento médio para cada mês: agosto, setembro, outubro, respectivamente (D, E e F).

A frequência de distribuição intrapacotes, ou seja, a distância entre ondas de um mesmo pacote, mostra uma distribuição unimodal deslocada para a esquerda em direção a distâncias inferiores à classe de 11 km, com um total de 140 OIS observadas (**Figura 6A**). A média para todo o período é igual a 8 km, ao passo que a média para classe mais frequente é de 5 km.

Por outro lado, a distância interpacotes, que é mensurada pela distância entre as OI principais de cada pacote, assemelha-se a uma distribuição gaussiana com a moda centrada em 130 km (**Figura 6B**). Juntas, as classes de 120 km e 130 km correspondem a um subtotal de 170 observações. É possível observar que a partir da classe de 110 km, existe um leve decaimento na frequência de distribuição da distância entre os diferentes pacotes na direção de valores menores; entretanto, o mesmo tipo de comportamento não é observado para distâncias interpacotes maiores do que 130 km. A distância média total para a série de 12 anos é igual a 117 km.

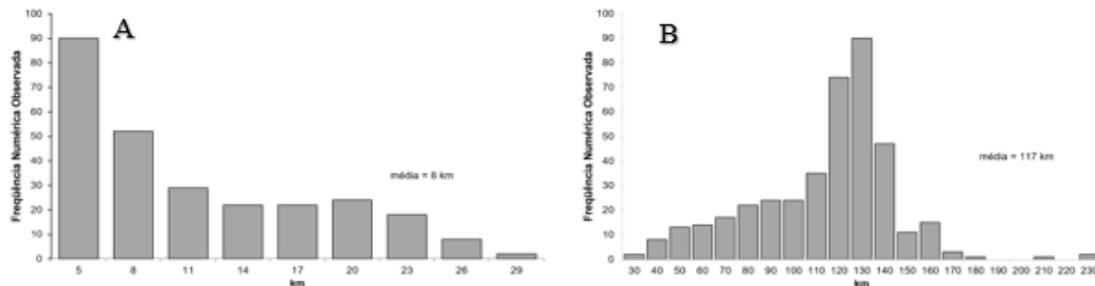


Figura 6: Frequência de distribuição das distâncias A) intrapacotes (i.e., entre ondas internas de um mesmo pacote) e B) interpacotes de OIS (i.e., mensurada pela distância entre as OI principais de cada pacote) com base no período investigado.

#### 4 DISCUSSÃO

As características médias das ondas internas solitárias (OIS) como comprimento de onda, direção e ângulo de propagação, quantidade de ondas/pacote, distâncias intra e interpacotes corroboram com os resultados publicados na literatura por Ivanov et al. (1993), Brandt et al. (2002), Jackson (2007) e Magalhães et al. (2016), exceto por algumas peculiaridades quanto aos sítios de geração e os meses de ocorrência. Por exemplo, nossos resultados indicam a ocorrência de mais dois sítios de geração de ondas internas solitárias, designados pelas letras C e D (vide Figura 4B). Além disso, devido ao problema de cobertura de nuvens na região e a dependência do fenômeno de *sun glint* para identificar

e caracterizar as OIS na região de interesse através do sensor MODIS EOS-TERRA, não foram observadas ondas internas nos primeiros semestres de cada ano como reportado por Ivanov et al. (1993) e Magalhães et al. (2016), nem em novembro de acordo com Brandt et al. (2002). Os resultados apresentaram OIS apenas para os meses de agosto, setembro e outubro.

Apesar da direção média de propagação ser da mesma ordem de magnitude, uma pequena diferença entre o ângulo médio formado com o Norte Verdadeiro é observada entre nossos resultados e os de Magalhães et al. (2016). Esses autores observaram uma sazonalidade na direção de propagação no sítio A mas não em B. No sítio A, a direção média de propagação passa de  $30^\circ$ , entre fevereiro-maio, para  $45^\circ$  entre julho-dezembro. Levando em consideração os 4 sítios observados neste trabalho, nossos resultados corroboram os de Magalhães et al. (2016), mostrando não só um aumento no ângulo médio de propagação de  $30^\circ$  para  $45^\circ$ , mas também um aumento no comprimento das cristas das OIS, atingindo valores de 50 a 300 km. Assim como reportado por Magalhães et al. (2016), este padrão sazonal parece estar associado ao regime sazonal da Contracorrente Norte Equatorial (NECC). Durante os meses do segundo semestre, as OIS refratam para leste devido à presença da NECC, que não apenas atua para alterar ângulo de propagação dessas ondas, mas também fornecendo uma componente de corrente adicional na direção de propagação desses sólitons. Além disso, Magalhães et al. (2016) salientam que a NECC não contribui apenas para aumentar suas velocidades de propagação, mas também auxiliando sua penetração estendida mais para o Nordeste indiretamente.

Contrariamente ao proposto por Magalhães et al. (2016), nossos resultados sugerem que a localização de geração parece ser ao longo da quebra da plataforma continental e não apenas nos sítios A e B. Além disso, outra característica observada em nossos resultados é que o sinal dessas ondas internas em superfície é observado em distâncias de aproximadamente 100 km plataforma continental, cenário típico reportado para outras regiões com mares marginais. Tanto os trabalhos de Brandt et al. (2002), Jackson (2007) e Magalhães et al. (2016) indicam que OIS aparecem muito longe da quebra da plataforma continental, sendo primeiramente observadas a  $\sim 500$  km em média.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram utilizados 12 anos (janeiro de 2008 a dezembro de 2019) de imagens diárias do MODIS EOS-TERRA para identificar e caracterizar as Ondas Internas

Solitárias (OIS) observadas ao largo da Foz do Rio Amazonas. Apesar de algumas limitações sazonais, principalmente por conta da cobertura de nuvens, que dificultou o uso de imagens no espectro do visível, os resultados deste trabalho mostram a capacidade de usar imagens MODIS EOS-TERRA em condição de *sun glint* para estudos de ondas internas solitárias na região do Rio Amazonas e adjacências. Devido ao tamanho da série temporal (12 anos) e mesmo apesar das limitações devido à presença de nuvens, estes dados, quando combinados com observações derivadas de radares de abertura sintética (SAR), mostraram-se complementares e indicaram outras duas regiões de formação de OIS que não haviam sido descritas anteriormente na literatura científica com base nas imagens SAR.

Existe ainda um outro sensor MODIS a bordo do satélite AQUA, também da série EOS lançado em 2002, que pode fornecer mais informações e solidificar ainda mais o uso de imagens na condição de *glint* no estudo de ondas internas e sólitons na região da Foz do Rio Amazonas e adjacências. A consolidação desses dois conjuntos de imagens – MODIS EOS-TERRA e EOS-AQUA – desde seu lançamento até dezembro de 2020 estão em fase final de análise e preparação para submissão pelos autores.

Portanto, apesar de nossos resultados não apresentarem observações de OIS para os meses de janeiro a julho, e novembro e dezembro, quando combinados com estudos pretéritos na região ao largo da Foz do Rio Amazonas e adjacências, indicam que praticamente toda a região de quebra da plataforma/talude, compreendida entre as longitudes de 50°W e 42°W, são fontes geradoras de ondas internas solitárias devido à ação da componente de maré barotrópica  $M_2$ , que atua durante o ano todo a cada 12,4h. Entretanto, para que esta suposição seja corroborada, o uso de modelos matemáticos para simulações de alta resolução espacial (i.e., ordem de centena de metros) e temporal (i.e., horas) levando em consideração tanto um oceano hidrostático como não-hidrostático é necessário. Estudos de caso deste porte, combinados com informações derivadas de satélites e dados *in situ*, permitirão que questões deste tipo sejam elucidadas. Desta forma, resultados dessa combinação podem fornecer estimativas precisas da velocidade média de propagação, direção predominante de ocorrência e regiões preferenciais de formação, cujos desdobramentos fornecerão informações necessárias e relevantes para estudos numéricos e *in situ* de processos biológicos, geofísicos e químicos em sub e mesoescalas, bem como para as indústrias de extração de óleo e gás *onshore* e *offshore*.

## REFERÊNCIAS

Almeida-Filho, R., Miranda, F. P., Lorenzetti, J. A., Pedroso, E. C., Beisl, C. H., Landau, L., Baptista, M. C., and Camargo, E. G. (2005), RADARSAT-mages in support of petroleum exploration: the offshore Amazon River mouth example. *Can. J. Remote sensing*, v. 31, n. 4, 289-303.

Beardsley, R. C.; Candela, J.; Limeburner, R.; Geyer, W. R.; Lentz, S. J.; Castro, B. M.; Cacchione, D.; Carneiro, N. (1995), The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 100, n. C2, p. 2283–2319.

Brandt, P., A. Rubino, and J. Fischer (2002), Large-amplitude internal solitary waves in the North Equatorial Countercurrent, *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 1567–1573.

Castro, B. de; Miranda, L. de. (1998), Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4N and 34S. *The Sea*, John Wiley & Sons: New Yor, v. 11, p. 209–251

Coe, M. T., Costa, M. H., Botta, A. & Birkett, C. M. (2002), Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon basin. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), doi:10.1029/2001JD000740.

Coe, M. T., Costa, M. H. & Howard, E. A. (2007), Simulating the surface waters of the Amazon River basin: impacts of new river geomorphic and parameterizations. *Hydrological processes*, 22(14), 2542-2553.

Dagg, M., Benner, R., Lohrenz, S. & Lawrence, D. (2004), Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. *Cont. Shelf Res.*, 24(7-8), 833-858.

Garrett, C., and L. St. Laurent. (2002), Aspects of deep ocean mixing, *J. Oceanogr.*, 58, 11–24, doi:10.1023/A:1015816515476.

Goff, M.; Jeans, G.; Harrington-Missin, L. and Baschenis, C. (2010), “Soliton Earl Warning System for Offshore Applications.” *Oceanology Intl.*, London, UK.9-11 March 2010.

Huthnance, J. (1989), Internal tides and waves near the continental shelf edge. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, Taylor & Francis, v. 48, n. 1-3, p. 81–106.

Ivanov, V. A., E. N. Pelinovsky, and T. G. Talipova (1993), The long-time prediction of intense internal wave heights in the tropical region of the Atlantic, *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 2136– 2142.

Jackson, C. (2007), Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), *J. Geophys. Res.*, 112, C11012, doi:10.1029/2007JC004220.

Jackson, C. R. (2004), *An Atlas of Internal Solitary-like Waves and Their Properties*, 2nd Edn., Global Ocean Associates, Alexandria, VA, available online at: <http://www.internalwaveatlas.com> (last access: 20 January 2015), 560 pp.

Lauton, G., C. B. Pattiaratchi, and C. A. D. Lentini (2021), Observations of Breaking Internal Tides on the Australian North West Shelf Edge, *Front. Mar. Sci.* 8:629372, doi: 10.3389/fmars.2021.629372

Lentini, C. A. D., M. A. Silva, D. R. A. Veleza, M. C. de Araújo, M. Cintra, H. L. V. González, C. E. P. Teixeira, L. V. B. da Costa, L. F. F. de Mendonça, J. M. de Araújo (2021), *Oceanografia Física do Atlântico Tropical: um enfoque nos processos hidrotermodinâmicos ao largo da costa brasileira (no prelo)*.

Lentini, C.A.D., J.M. Magalhães, J.C.B. da Silva, and J.A. Lorenzzetti (2016), Transcritical flow and generation of internal solitary waves off the Amazon River: Synthetic aperture radar observations and interpretation. *Oceanography* 29(4), doi:10.5670/oceanog.2016.88.

Lentz, S. J.; Limeburner, R. (1995), The Amazon River plume during AMASSEDS: Spatial characteristics and salinity variability. *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union, v. 100, n. C2, p. 2355–2375.

Magalhaes, J. M., J. C. B. da Silva, M. C. Buijsman, and C. A. E. Garcia (2016), Effect of the North Equatorial Counter Current on the generation and propagation of internal solitary waves off the Amazon shelf (SAR observations), *Ocean Sci.*, 12, 243–255, doi:10.5194/os-12-243-2016.

Nittrouer, C. A.; Demaster, D. J. (1996), The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental Shelf Research*, Elsevier, v. 16, n. 5, p. 553–573.

Osborne, A. R., Burch, T. L. & Scarlet, R. I. (1978), The influence of internal waves on deep water drilling, *Journal of Petroleum Technology*, 30, 1497-1504.

Rattray, M. (1960), On the coastal generation of internal tides. *Tellus*, v. 12, n. 1, p. 54–62.

Wunsch, C. (1975), Internal tides in the ocean. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, v.13, n.1, p. 167–182.