



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOQUÍMICA:
PETRÓLEO E MEIO AMBIENTE – POSPETRO**

LAIANNE DOS SANTOS PROTASIO

**PROPOSTA METODOLÓGICA UTILIZANDO SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL PARA AVALIAR DINÂMICA DE UM
DERRAMAMENTO DE ÓLEO E A DOSE NA BIOTA**

Salvador
2021

LAIANNE DOS SANTOS PROTASIO

**PROPOSTA METODOLÓGICA UTILIZANDO SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL PARA AVALIAR DINÂMICA DE UM
DERRAMAMENTO DE ÓLEO E A DOSE NA BIOTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente – Pospetro, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geoquímica do Petróleo e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Ferreira de Mendonça
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Domingos
Lentini

Salvador
2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de Ciências e
Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI - UFBA.

P967 Protasio, Lianne dos Santos

Proposta metodológica utilizando simulação computacional
para avaliar dinâmica de um derramamento de óleo e a dose na
biota/ Lianne dos Santos Protasio. – Salvador, 2021.

54 f.

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Ferreira de Mendonça

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Instituto de Geociências, 2021.

1. Derramamento de óleo. 2. Poluição marinha. 3.
Intemperismo do óleo. I. Mendonça, Luis Felipe Ferreira. II.
Universidade Federal da Bahia.

CDU 504.5

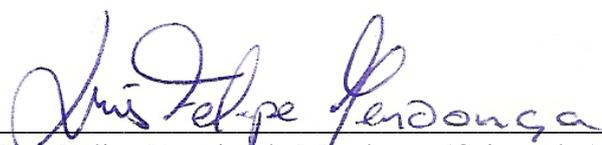
Laianne dos Santos Protásio

Proposta metodológica utilizando simulação computacional para avaliar dinâmica de um derramamento de óleo e a dose na biota.

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geoquímica do Petróleo e Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (Pospetro), do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Salvador, 29 de novembro de 2021

Banca Examinadora



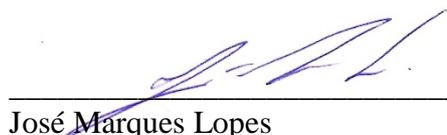
Luis Felipe Ferreira de Mendonça (Orientador)

Doutorado em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Brasil
Universidade Federal da Bahia (UFBA)



Carlos Alexandre Domingos Lentini (Coorientador)

Doutorado em Oceanografia Física e Meteorologia pela Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science da Universidade de Miami (RSMAS/UM)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)



José Marques Lopes

Doutorado em Engenharia Nuclear pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
Universidade Federal da Bahia (UFBA)



Rose Ane Pereira de Freitas

Doutorado em Meteorologia pela Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
Universidade Federal de Pelotas. (UFPel)

Aprendi a ser o máximo possível, de mim mesmo.

Nelson Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, porque sei que cheguei até aqui graças a Ele.

Aos meu pais, que sempre me apoiaram, acreditaram em mim e me incentivaram em toda minha vida a buscar o melhor. Esse trabalho e os futuros eu dedico a eles, Levy e Marilda.

À minha irmã, Larissa, que incrivelmente fala tudo que preciso ouvir. Obrigada por sempre estar comigo.

À minha família é o meu alicerce, então agradeço a todos eles. À minha avó Marize, por todas as orações e amor em toda minha vida.

Ao meu parceiro de vida, Atila, e a todos meus amigos, que sempre me acolhem e abraçam. Vocês são meu suporte.

Aos meus amigos que a POSPETRO me presenteou Jade e Guilherme, vocês tornaram tudo mais leve, sou muito grata.

Ao meu orientador Luís Felipe, que aceitou me orientar e pude conhecer o real significado disso, obrigada pela confiança em mim. Agradeço também em especial aos professores Gisele Hadlich, Carlos Lentini e José Marques pela escuta, esclarecimentos, e todo conhecimento compartilhado durante a construção desse trabalho.

Aos professores Douglas Lindemann, Rose Freitas e novamente José Marques, Gisele Hadlich e Carlos Lentini por se prontificarem e aceitarem o convite para a banca examinadora desta dissertação.

Aos colegas de Laboratório de Oceanografia por Satélites (LOS), e em especial a Laysla obrigada pelos nossos momentos do café. Nesse laboratório todos comemoram o sucesso do outro e realmente todos se ajudam. Agradeço também a turma de 2013, que ainda permanecemos nos apoiando. E a família LABESP, onde iniciei minha vida acadêmica e ganhei amigos para a vida toda.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela Bolsa de Mestrado (nº BL0585/2020).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço a todos que passaram pela minha caminhada e contribuíram para o meu crescimento hoje. Felicidades e saúde para todos!

RESUMO

Os derramamentos de óleo correspondem a uma das mais impactantes fontes de poluição marinha. A liberação de óleo na superfície do oceano pode gerar potenciais impactos ambientais. Devido a estes impactos causados pela indústria de exploração de petróleo, conhecer seu comportamento no ambiente marinho através de estudos de prevenção, controle e mitigação de derramamentos de óleo se fazem necessários. Muitos estudos já fazem utilização de modelos e códigos computacionais que têm se mostrado uma importante ferramenta, de baixo custo computacional, para o gerenciamento de riscos. O presente trabalho tem por objetivo analisar os dados de saída do modelo de dispersão de óleo no software MEDSLICK-II, através do estudo de caso de um derramamento de óleo na região da Baía de Cumuruxatiba. Este modelo calcula a partir de dados de um modelo regional oceânico o transporte e intemperismo do óleo, utilizando uma representação Lagrangiana da mancha. Além disto, propomos observar o impacto do óleo na biota através do código computacional Monte Carlo (MCNP), que estima o transporte de radiação ionizante do óleo para biota no meio oceânico. Nossos resultados mostraram que a CB, com sua aceleração associada aos meses de verão, pode funcionar como uma barreira física contra o transporte zonal de óleo, e outro ponto importante é que o transporte característico das correntes de contorno oeste, pode funcionar como um forte agente espalhador de elementos associados ao óleo ao longo da costa brasileira. Além disso, a série Th-232 se destacou por apresentar contribuição significativa para a dose. Porém, uma ação corretiva capaz de remover o Tl-208 diminuiria significativamente os efeitos da radiação nas populações expostas prontamente, uma vez que esse radionuclídeo se destaca como aquele que entrega mais percentual de dose. Esse estudo é uma primeira aproximação em termos de taxa de dose na biota devido a um derramamento de óleo. Assim, com base nestas informações geradas pelos modelos se almeja criar uma metodologia de aplicação para futuros estudos de derramamentos de óleo e seu impacto nas áreas costeiras do litoral brasileiro.

Palavras-chaves: Derramamento de óleo, Modelagem de Dispersão, Radiodeteção, Intemperismo do óleo, MCNP, MEDSLICK.

ABSTRACT

Oil spills are one of the most impactful sources of marine pollution. The release of oil on the ocean surface can have potential environmental impacts. Due to these impacts caused by the oil exploration industry, knowing its behavior in the marine environment through studies of prevention, control and mitigation of oil spills is necessary. Many studies already make use of computational models and codes that have proved to be an important tool, with low computational cost, for risk management. The present work aims to analyze the output data of the oil dispersion model in the MEDSLICK-II software, through the case study of an oil spill in the Cumuruxatiba Basin region. This model calculates the transport and weathering of oil from data from a regional oceanic model, using a Lagrangian representation of the slick. Furthermore, we propose to observe the impact of oil on biota through the Monte Carlo computational code (MCNP), which estimates the transport of ionizing radiation from oil to biota in the oceanic environment. Our results showed that BC, with its acceleration associated with the summer months, can act as a physical barrier against zonal oil transport, and another important point is that the characteristic transport of western boundary currents can act as a strong agent spreader of elements associated with oil along the Brazilian coast. Furthermore, the Th-232 series stood out for presenting a significant contribution to the dose. However, a corrective action capable of removing Tl-208 would significantly reduce the effects of radiation on readily exposed populations, since this radionuclide stands out as the one that delivers the highest percentage of dose. This study is a first approximation in terms of the dose rate in the biota due to an oil spill. Thus, based on this information generated by the models, the aim is to create an application methodology for future studies of oil spills and their impact on coastal areas of the Brazilian coast.

Keywords: Oil spill, Dispersion Modeling, Radiosensing, Oil weathering, MCNP, MEDSLICK.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GERAL	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA HIDRODINÂMICA ASSOCIADA A UM DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA BACIA DE CUMURUXATIBA (BA) COM BASE NO MODELO MEDSLIK-II	11
	RESUMO	11
	ABSTRACT	11
3.1	INTRODUÇÃO	12
3.1.1	Caracterização da área de estudo e objetivo da pesquisa	13
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.2.1	Simulações numéricas	17
3.2.2	Modelo Regional Oceânico	18
3.2.3	Modelo de dispersão de óleo	19
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.4	CONCLUSÃO	29
4	DOSE NA BIOTA DEVIDO AO INCIDENTE DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO DE 2019 NO LITORAL DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO DOS DANOS ÀS ESPÉCIES MARINHAS COSTEIRAS USANDO SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	30
	RESUMO	30
	ABSTRACT	30
4.1	INTRODUÇÃO	31
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	33
4.2.1	Condições de contorno do problema	33
4.2.2	Simulação computacional	34
4.2.3	Coeficientes conversão de dose	36
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.4	CONCLUSÃO	42
5	CONCLUSÃO GERAL	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Um dos recursos energéticos mais importantes para a economia global é o petróleo. O avanço da tecnologia que permite a exploração de reservas, como em locais profundos no mar, tem levado ao crescimento da indústria de produção de petróleo e gás natural nos últimos anos (NGENE, 2016), atendendo assim a uma demanda global para o uso de hidrocarbonetos como combustível (HALL, 2003). Esta indústria de exploração de petróleo é também responsável por grande parte da inserção de hidrocarbonetos em ambientes marinhos (BOLLMAN, 2010).

A liberação de óleo na superfície do oceano pode gerar potenciais impactos ambientais associados a destruição de habitats (PETERSON, 2001), contaminação da cadeia alimentar (LAW; HELLOU, 1999; GIN *et al.*, 2001; BOEHM *et al.*, 2005; INGOLE *et al.*, 2006; MARTIN-SKILTON *et al.*, 2008) e a morte da vida selvagem (MIGNUCCI-GIANNONI, 1999). O derramamento também pode afetar a economia das comunidades costeiras, diminuindo o turismo ou prejudicando áreas de pesca comercial (CHANG, 2014), como foi visto em uma das maiores tragédias ambientais no Brasil, onde em agosto de 2019 diversos estados do nordeste e sudeste começaram a registrar em suas praias o aparecimento de óleo bruto (LOURENÇO, 2020). Este óleo flutuava cerca de 1,5 metros da superfície, o que dificultava rastrear sua origem por imagens de satélite ou sobrevoos, pois o óleo só se tornava visível ao se aproximar da costa. Sua fonte, quando, e como o vazamento aconteceu é ainda desconhecido. Devido a estes impactos causados pela indústria do petróleo, estudos de prevenção, controle e mitigação de derramamentos de óleo no ambiente se fazem necessários. Atualmente, diversos estudos utilizam rotinas computacionais que têm se mostrado como uma importante ferramenta, para gerenciamento de riscos (KOROTENKO, 2018). Como visto em Stringari *et. al* (2013), onde utilizaram um modelo de derramamento de óleo para avaliar a influência de forçantes físicas do oceano em um derrame hipotético na Plataforma Sul do Brasil, afim de auxiliar na tomada de decisões emergenciais e a avaliação da magnitude dos riscos envolvidos.

O petróleo (óleo bruto) é considerável altamente tóxico, devido a sua estrutura química e radioativa associada aos radionuclídeos, em específico a presença de urânio e tório (GREGORY, 2014). Essa toxicidade, pode afetar radiologicamente o ambiente ao ser liberado no mar, o que justifica a necessidade de conhecer os impactos e propor futuros métodos de remediação. A avaliação deste impacto ambiental é realizada por meio da representação

matemática da transferência de radionuclídeo nos diferentes compartimentos ambientais, até que as radiações emitidas alcancem a biota (BALONOV, 2007).

Esta avaliação da dispersão e transferência de isótopos radioativos para o ambiente, assim como a quantificação do impacto pode ser realizada com a utilização de modelos matemáticos introduzidos em códigos computacionais. Em conjunto com o biomonitoramento, que é baseado nas respostas dos organismos em relação ao ambiente onde vivem, é possível obter uma estimativa do impacto ambiental nas cadeias tróficas. Isto ocorre devido à capacidade biológica dos animais de responder a uma série de distúrbios naturais ou antropogênicos do meio (BUSS, 2008).

A radioproteção ambiental anteriormente era realizada indiretamente com o ser humano como referência (ICRP, 1977). Recentemente essa abordagem começou a ser questionada e hoje já é admitido que o ambiente precisa ser protegido como um todo (ICRP, 2003, 2007, 2008). Por meio de representações matemáticas da transferência de radionuclídeos nos diferentes compartimentos ambientais até o alcance das radiações na biota (humana e não humana), é possível realizar uma avaliação do impacto ambiental (MAZZILLI, 2011).

As áreas de exploração e refino de óleo muitas vezes circundam regiões de alta importância ecológica, seja pela presença de espécies raras e/ou endêmicas, locais de reprodução ou atividade pesqueira. A bacia de Cumuruxatiba consiste em uma importante região de reservas petrolíferas e exploração do petróleo no estado da Bahia. Dentro desta região, o Banco de Abrolhos encontra-se localizado sobre um alargamento da plataforma continental. Abrolhos é caracterizada como a região de maior biodiversidade marinha no Atlântico Sul, abrigando o maior banco de corais e algumas das principais áreas-berçário das baleias Jubarte. Essa proximidade do Parque Nacional de Abrolhos com as áreas de exploração oferece grande risco a esse ambiente, seja por vazamentos de óleo na região ou por processos de exsudação.

Desta forma o presente projeto propõe utilizar uma simulação numérica de um evento hipotético de derramamento de óleo na Bacia de Cumuruxatiba, para avaliar o seu potencial impacto sobre a biota. A proximidade dos campos de exploração na bacia de Cumuruxatiba com o Parque Nacional dos Abrolhos, exalta a importância de um sistema rápido e eficaz de identificação e prevenção de possíveis catástrofes ambientais. Desta forma, os resultados deste trabalho deverão servir de base para que outros estudos possam ser desenvolvidos na região.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa teve por objetivo analisar os dados de saída do modelo MEDSLIK-II para um estudo de caso de derramamento de óleo na Bacia de Cumuruxatiba (BA), a fim de observar o padrão hidrodinâmico de dispersão do óleo sobre Bacia de Cumuruxatiba e o seu potencial impacto na biota através de simulações numéricas através do código computacional Monte Carlo (MCNP).

Essas simulações serão realizadas através de um modelo oceânico (ROMS), que alimentará o modelo de dispersão e intemperismo do óleo (MEDSLIK-II). De posse desses resultados, será utilizado o código MCNP, que permitirá simular a interação da radiação com os diferentes compartimentos ambientais até a biota.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as condições hidrodinâmicas na bacia de Cumuruxatiba durante o evento estudado através das saídas numéricas do modelo oceânico regional ROMS.
- Avaliar os padrões de deriva do óleo na região, a partir das características geoquímicas dos óleos exploradas e transportados na região com base nos dados de saída do modelo de dispersão de óleo MEDSLIK-II.
- Estimar um o potencial impacto do decaimento radioativo dos elementos do óleo sobre algumas espécies de animais nas praias da região de Cumuruxatiba através do modelo MNCP.

3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA HIDRODINÂMICA ASSOCIADA A UM DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA BACIA DE CUMURUXATIBA (BA) COM BASE NO MODELO MEDSLIK-II

RESUMO

Os derramamentos de óleo correspondem a uma das mais importantes fontes de poluição marinha. Devido aos danos causados pela indústria de exploração de petróleo, conhecer o comportamento do óleo no ambiente marinho através de estudos de prevenção, controle e mitigação de derramamentos de óleo, é necessário. Neste estudo realizou-se duas simulações climatológicas para a região da Baía de Cumuruxatiba, para os períodos de verão e de inverno através do modelo de dispersão de óleo MEDSLICK-II. A região foi selecionada devido à sua proximidade com o Parque Nacional do Abrolhos e ao alto risco ambiental associado à indústria do petróleo na região. O objetivo principal foi analisar o impacto da circulação oceânica em possíveis derramamentos de óleo próximo à Zona Econômica Exclusiva do Brasil. Para isso foram realizadas simulações a partir das saídas do modelo oceânico ROMS e dos dados atmosféricos da reanálise ERA5, utilizados para forçar o Modelo de dispersão de óleo MEDSLIK, através de uma representação Lagrangiana da mancha. Os resultados mostram que, durante os períodos de inverno, o deslocamento da ZCIT e a expansão meridional da ASAS causam na região uma intensificação dos ventos de leste, aumentando o transporte longitudinal de óleo evidenciando que, aliados às menores velocidades da Corrente do Brasil (CB) durante os meses de inverno, aumentam a probabilidade de derramamentos atingirem a costa Nordeste Brasileira. Para os meses de verão, as simulações mostraram que os ventos da direção nordeste e o maior transporte da CB atuam como uma barreira física impedindo o deslocamento do óleo para a costa. Com base nos resultados obtidos neste estudo, acredita-se que a metodologia usada possa ser de fundamental importância ao ser aplicada em futuros estudos de derramamentos de óleo nas áreas costeiras do litoral brasileiro.

Palavras-chave: Circulação Oceânica, Modelagem de Dispersão, Derramamento de óleo, Cumuruxatiba.

ABSTRACT

Oil spills are one of most important sources of marine pollution. The damage caused by the oil exploration industry requires knowing the behavior of oil in the marine environment, through studies of prevention, control and mitigation of oil spills. In this study, two climatological simulations were carried out for the Cumuruxatiba Basin, for summer and winter periods, using the MEDSLICK-II oil spill dispersion model. The region was chosen due to its closeness to the Abrolhos National Park and the high environmental risk associated with the oil industry in this region. The main objective was to analyze the impact of ocean circulation on possible oil spills near the Exclusive Economic Zone of Brazil. For this, simulations were performed using the outputs of the ROMS ocean model and atmospheric data from the ERA5 reanalysis, used to force the oil dispersion model MEDSLIK, through a Lagrangian representation of the slick. The results show that during the winter the ZCIT displacement occurs and the southern expansion of the ASAS causes, in the region, an intensification of the east winds. These results show that the increase in longitudinal oil transport is evidenced at the lower speeds of the Brazil Current (CB) in the winter months, increase the likelihood of spills reaching the northeastern Brazilian coast. For the summer months, the simulations showed that the northeasterly winds and the greater CB transport act as a physical barrier preventing the oil

from moving to the coast. Based on the results obtained, it is believed that the methodology used may be essential for future studies of oil spills in coastal areas of the Brazilian coast.

Keywords: Ocean Circulation, Dispersion Modeling, Oil Spill, Cumuruxatiba.

3.1 INTRODUÇÃO

Acidentes relacionados a indústria do petróleo e gás são responsáveis por grande parte da inserção de hidrocarbonetos em ambientes marinhos (PETERSON, 2003; BEYER, 2016; DE OLIVEIRA SOARES, 2020), onde estima-se que 48% da poluição por óleo nos oceanos são combustíveis e 29% são petróleo bruto (FINGAS, 2001). O petróleo é uma complexa mistura composta predominantemente por hidrocarbonetos que varia de acordo com a formação geológica onde é encontrado (BARKER, 1985; FINGAS, 2016). Nele é possível encontrar em sua composição os HPA's que são compostos químicos hidrófobos, o que limita sua solubilidade na água do mar, favorecendo a sua associação a partículas sólidas (CELINO; QUEIROZ, 2006) descritas já na literatura como agregados de Óleo-Material Particulado em Suspensão (OSAs) [MOREIRA, 2015]. Podendo assim causar significativos impactos ambientais, muitas vezes irreversíveis (MIGNUCCI-GIANNONI, 1999; PETERSON, 2001; ZHANG, 2020).

Os processos de exploração de óleo no estado da Bahia iniciaram a partir da década de 1950 e envolvem diversas atividades associadas à exploração, beneficiamento e transporte (MORAES, 2013). Atualmente existem nove bacias sedimentares de exploração no estado, sendo 4 continentais (Recôncavo, Tucano, São Francisco e Irecê) e 5 oceânicas (Jacuípe, Camamu/Almada, Jequitinhonha, Cumuruxatiba e Mucuri) [MOHRIAK, 2003]. Além da indústria de exploração, a presença de exsudações é responsável por boa parte das contaminações em águas costeiras (TIMMERMAN *et al.*, 2003). As áreas de exploração e refino de óleo muitas vezes circundam regiões de alta importância ecológica, seja pela presença de espécies raras e/ou endêmicas, locais de reprodução ou atividade pesqueira. Neste contexto, a bacia de Cumuruxatiba consiste em uma importante região de reservas petrolíferas e exploração do petróleo no estado da Bahia. Sua exploração de petróleo iniciou na década de 60, com a perfuração do poço estratigráfico 2-CXST-001-BA, no município de Prado. Segundo o Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional de Petróleo existem 52 poços exploratórios perfurados (05 terrestres e 47 no mar), sendo que 43 poços são pioneiros, 08 de extensão e 01 estratigráfico, segundo consta no (CASTILHO, 2005).

Dentro desta região, o Banco de Abrolhos encontra-se localizado sobre um alargamento da plataforma continental (TEIXEIRA, 2006). Abrolhos é caracterizada como a região de maior

biodiversidade marinha no Atlântico Sul, abrigando o maior banco de corais e algumas das principais áreas-berçário das baleias Jubarte (DUTRA *et al.*, 2011). Desta forma, a proximidade do Parque Nacional de Abrolhos com as áreas de exploração oferece grande risco a esse ambiente, seja por vazamentos de óleo na região ou por processos de exsudação (LEÃO, 1999).

3.1.1 Caracterização da área de estudo e objetivo da pesquisa

A camada superficial desta região é composta pela Corrente do Brasil (CB), que é formada a 16°S, a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE) [STRAMMA *et al.*, 1990; SILVEIRA *et al.*, 2000; WIENDERS *et al.*, 2000], ao longo do continente sul-americano até a região da Confluência Brasil-Malvinas em, aproximadamente, 38°S (OLSON *et al.*, 1988). A CB é caracterizada como uma corrente rasa, quente e salina, que transporta Água Tropical (AT) em níveis superficiais (STRAMMA; ENGLAND, 1999; SOUTELINO, 2008).

Em 20°S, a CB também recebe uma contribuição da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), tornando-se mais profunda e com um aumento no seu transporte em direção ao sul (SILVEIRA *et al.*, 2000). A massa de água logo abaixo da ACAS é a Água Intermediária Antártica (AIA), movendo-se na direção do equador ao norte de 25°S, fluindo para o sul abaixo de 28°S (MULLER *et al.*, 1998; STRAMMA; ENGLAND, 1999). E abaixo da AIA, a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) flui para sul. Desta forma, ao sul de 28°S então, a AT, ACAS, AIA e APAN fluem no mesmo sentido (STRAMMA; ENGLAND, 1999; SOUTELINO, 2008).

Entre os principais processos hidrodinâmicos que ocorrem na plataforma continental do Estado da Bahia destacam-se as ondas, correntes de maré, correntes geradas pelo vento e as correntes geostróficas (DOMINGUEZ *et al.*, 2012). Sendo as correntes geradas pelo vento um dos principais mecanismos de circulação na região, no qual, de forma rápida, essas correntes respondem às mudanças no campo de ventos e se orientam longitudinalmente à plataforma (LESSA; CIRANO, 2006; AMORIM *et al.*, 2011).

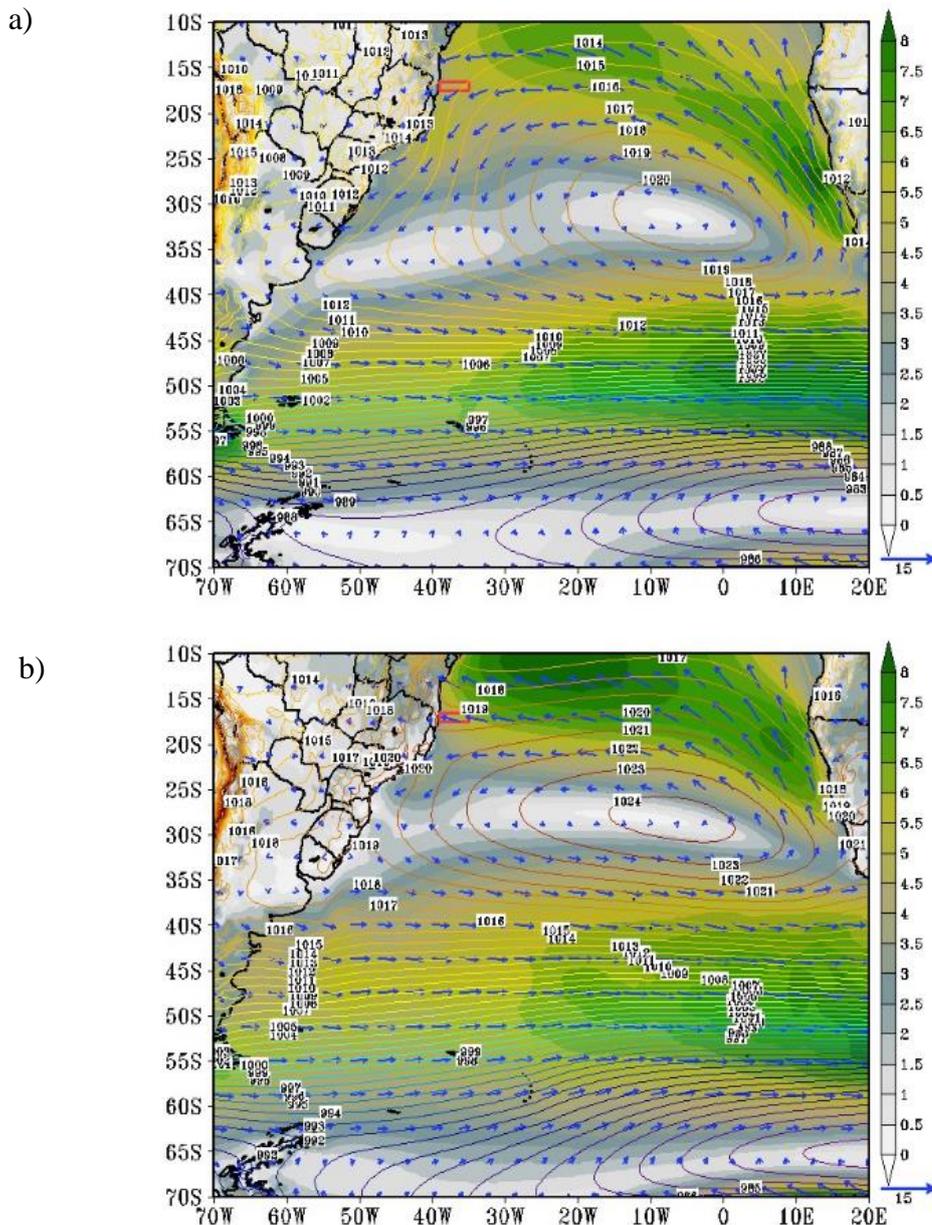
Os ventos predominantes no litoral baiano têm suas variações sazonais associadas a mecanismos sinóticos e de mesoescala. Ao sul da Bahia predominam os mecanismos de grande escala como a ASAS (Anticiclone subtropical do Atlântico Sul), e passagens de sistemas frontais, enquanto ao Norte da Bahia, prevalece a atuação em regime constante dos ventos Alísios. A convergência desses mecanismos resulta em ventos predominantes de nordeste (NE), sudeste (SE) e leste (L). Quanto aos mecanismos de mesoescala, prevalecem os regimes de brisa marítima e terrestre (UVO *et al.*, 1989; SANTOS *et al.*, 2013; CAVALCANTI, 2016).

Acompanhando espacialmente a variação na posição da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), a ASAS origina-se por extensas áreas de ar seco e quente subsidente, devido à intensa radiação solar tropical, altas temperaturas e elevada umidade específica sobre o oceano. No verão austral, o maior aquecimento do Hemisfério Sul, e conseqüentemente dos continentes sul-americano e africano, geram anomalias negativas de pressão sobre os continentes, devido às capacidades térmicas contrastantes com o Oceano Atlântico Sul (OAS), causando um enfraquecimento da ASAS, retraindo meridionalmente sua posição sobre o oceano. O oposto acontece no inverno, o resfriamento continental faz com que a ASAS se expanda meridionalmente aproximando-se da América do Sul, conforme mostrado na Figura 1 (MACHEL *et al.*, 1998; LEMOS, 2009).

Na Figura 1 são mostradas variações na posição da ASAS no verão e inverno. No verão (Figura 1a) a posição da ASAS gera ventos do quadrante NE ao longo de toda a costa leste brasileira, especialmente sobre a região de estudo. Por outro lado, nos meses de inverno (Figura 1b), o avanço da alta pressão em direção ao continente sul-americano gera ventos do quadrante leste e sudeste sobre a bacia de Cumuruxatiba e sobre todo o litoral baiano. Este período, caracteriza-se pela frequente passagem de sistemas frontais sobre a região sul/sudeste brasileira, intensificando os ventos de S e SE sobre o litoral da Bahia (LEMOS; CALBETE, 1995). No outono e inverno, os ventos de SE, S e SO são geralmente associados à baixas temperaturas, alta umidade e intensos regimes de chuva, ocorrendo em sua maior parte entre abril e julho (BITTENCOURT *et al.*, 2000; LESSA; CIRANO, 2006).

Devido a estes impactos causados pela indústria do petróleo, estudos de prevenção, controle e mitigação de derramamentos de óleo no ambiente se fazem necessários. Atualmente, diversos estudos utilizam rotinas computacionais que têm se mostrado como uma importante ferramenta, para gerenciamento de riscos (CHENG, 2011; FRENCH-MCCAY, 2004; KOROTENKO, 2018). Como visto em Stringari e colaboradores (2013), que utilizaram um modelo de derramamento de óleo para avaliar a influência de forçantes físicas do oceano em um derrame hipotético na Plataforma Sul do Brasil, a fim de auxiliar na tomada de decisões emergenciais e a avaliação da magnitude dos riscos envolvidos.

Figura 1 - Campos médios sazonais para o período de 1990-2020 das variáveis de Pressão ao nível médio do mar (PNMM) [hPa] e de vento a 10m [m/s], a partir de dados da reanálise ERA5, para os meses de (A) verão e (B) inverno. A caixa em vermelho mostra a localização da Baía de Cumuruxatiba



Sendo a baía de Cumuruxatiba (BA) uma importante região de reservas petrolíferas e exploração do petróleo no Estado da Bahia, caracterizada pela proximidade com o Parque Nacional dos Abrolhos, torna-se de extrema importância um sistema rápido e eficaz de identificação e prevenção de possíveis catástrofes ambientais para a região, motivando este estudo. Logo, realizou-se uma análise de caso de derramamento de óleo nos dias 1 de maio, 1 de agosto, 1 de novembro e 1 de fevereiro de 2019, na Baía de Cumuruxatiba, gerado a partir de simulações numéricas do modelo MEDSLIK II, a fim de definir possíveis padrões hidrodinâmicos de dispersão de óleo na região do Banco dos Abrolhos em meses de inverno e de verão.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

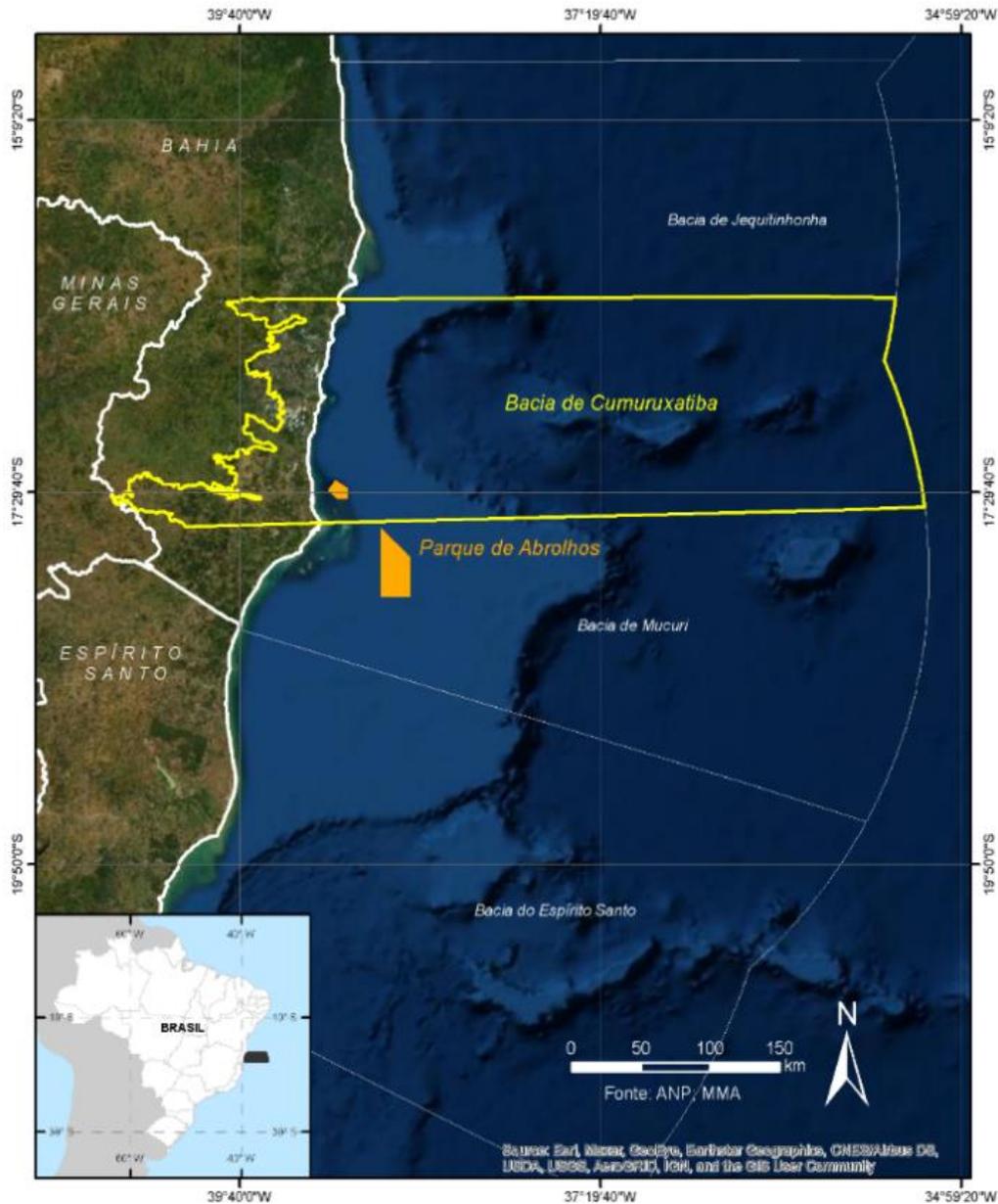
A importante área de estudo está centrada sobre a bacia de Cumuruxatiba, uma região de reservas petrolíferas e exploração do petróleo no Estado da Bahia. Localizada na margem leste da costa brasileira, entre 16.5 - 17.5°S / 35 - 39°O (Figura 2). Esta bacia é limitada a leste pela cota batimétrica de 2500 m e abrange parte da planície costeira entre as cidades de Porto Seguro a Alcobaça, com uma área total de 20.200 km². Sua parte submersa é circundada pelos bancos vulcânicos de Royal Charlotte ao Norte, Abrolhos ao Sul, e o Sulphur Minerva a Leste. Dentro da Cumuruxatiba encontra-se o Banco Nacional dos Abrolhos, localizado sobre um alargamento da plataforma continental e caracterizado como a região de maior biodiversidade marinha no Atlântico Sul. Este ecossistema é muito diverso e possui o registro de aproximadamente 1.300 espécies, sendo 45 delas consideradas ameaçadas, segundo a *International Union for Conservation of Nature* e o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente.

Os ambientes marinhos são muito dinâmicos e a ocorrência de desastres sobre a superfície oceânica podem ser praticamente incontroláveis, atingindo dimensões de centenas de quilômetros. Exemplos de acidentes como o vazamento da *British Petroleum Deepwater Horizon*, no Golfo do México, no qual tubulações de fundo foram rompidas e liberaram uma quantidade total estimada entre 3 e 4 milhões de barris. Quantidade muito abaixo do que foi simulado neste artigo, de forma que com valores menores que 0,1 tons/km², pudemos observar um significativo potencial impacto sobre toda a região do Parque Nacional do Abrolhos, especialmente durante os meses de inverno. No inverno austral do ano de 2019, pudemos vivenciar o aparecimento de manchas de petróleo bruto em diversas regiões costeiras do Nordeste brasileiro (LOURENÇO, 2020), inclusive na região de Abrolhos. Neste período, aproximadamente quatro meses após as primeiras aparições, quase 1.000 praias ao longo de mais de 3.000 km de extensão de linha de costa apresentavam registros dessas manchas de óleo.

Serão apresentadas as simulações estocásticas do comportamento de um derramamento hipotético de óleo exposto a condições climatológicas em os períodos de verão e inverno, na bacia de Cumuruxatiba, a uma distância de aproximadamente 200 milhas náuticas da costa. Por se tratar de uma simulação hipotética, será identificado, de acordo com as condições hidrodinâmicas locais, a possibilidade de um derramamento de óleo próximo a Zona Econômica Exclusiva, atingir a região do Parque Nacional dos Abrolhos.

A região escolhida para o derramamento encontra-se sobre a área de atuação da CB, que segundo Stramma e colaboradores (1990), possui em 16°6' uma profundidade de referência entre 490-580m, transporte de $5,6 \cdot 10^6$ m³/s e uma velocidade média anual de 2,7 m/s.

Figura 2 - Localização da Baía de Cumuruxatiba no litoral do Estado da Bahia



3.2.1 Simulações numéricas

No MEDSLIK-II foram realizadas as simulações de dois cenários, de verão e de inverno, considerando, para cada simulação, um vazamento de óleo a partir do ponto de exsudação e/ou derramamento hipotético, localizado a -16.5°S / -36.5°O , nos dias 1 de maio (00 h UTC), 1 agosto (00 h UTC), 1 novembro (00 h UTC) e 1 de fevereiro (00 h UTC). Para o estudo, cada vazamento representou uma liberação pontual de óleo única e contínua de 598h de duração (aproximadamente 25 dias). Inicialmente foi estimado um traçado de grade de 150 m, com um volume 2831 m^3 de óleo, o que resulta em uma massa de 1000 t.

As principais características das simulações realizadas no MEDSLIK-II encontram-se descritas no Quadro 1. O modelo foi executado com os parâmetros básicos, pré-definidos e descritos em De Dominicis e colaboradores (2013a).

Quadro 1 - Parâmetros de inicialização do modelo MEDSLIK-II

Parâmetros	Valores
Datas das simulações	1 de maio, 1 de agosto, 1 de novembro e 1 de fevereiro
Simulação	576 h
Latitude	-16,5°
Longitude	-36,5°
Volume	1000 toneladas/L
Área	150m
Óleo	208 - Tiajuana Light da Venezuela
Densidade do óleo (g/cm ³)	0,865
API do óleo	32,10
Temperatura na qual a viscosidade é determinada	38
Viscosidade do óleo (50°C)	10,4
Densidade residual do óleo	0,913
Porcentagem residual do óleo	60,05
Pressão de vapor do óleo (bar)	0,357

3.2.2 Modelo Regional Oceânico

A modelagem de dispersão de óleo é forçada com os dados hidrodinâmicos de saída do modelo oceânico Regional Ocean Modeling System - ROMS (HAIDVOGEL *et al.*, 2000, SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005, 2009) e parametrizado sobre o código do modelo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a, b). Esse acoplamento permite integrar os resultados da circulação do ROMS, compatíveis com a dinâmica de baixa latitude, com um modelo de óleo Lagrangeano como MEDSLIK-II, que considera os processos de transporte e intemperismo (evaporação, espalhamento, dispersão, emulsificação e adesão costeira) que atuam no derramamento (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a, b).

O ROMS consiste em um modelo oceânico regional tridimensional de superfície livre que usa coordenadas verticais sigma que acompanham a batimetria, conforme descrito em Shchepetkin e McWilliams (2005). A discretização horizontal do modelo utiliza uma grade alternada, do tipo C de Arakawa, descrita por Arakawa e Lamb (1977). O modelo resolve as equações de Navier-Stokes através da média de Reynolds, com aproximação de Boussinesq e balanceamento do momento vertical hidrostático. Neste estudo, o domínio espacial foi definido

entre 14°-19°S e 34°-40°W, com resolução horizontal de 1/21 representando 5 km e 32 níveis verticais sigma. As dimensões da grade permitem evitar instabilidades geradas por crescimento espúrio (não linear) de componentes de alta frequência do modelo, que poderiam ter sido introduzidos durante sua execução por aproximações e/ou erros de observação. Tchamabi *et al.* (2017) também forçaram o MEDSLIK através de saídas do ROMS com uma grande similar para o nordeste brasileiro.

As condições iniciais do modelo oceânico são do Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) (SLUTZ *et al.*, 1985), enquanto os dados de contorno e forçantes atmosféricas são do *Climate Forecast System Versão 2 (CFSv2)* do *National Center for Environmental Prediction (NCEP)* (SAHA *et al.*, 2014), fornecidos a cada 6 horas. O CFSv2 tem resolução horizontal de 0.5° para o oceano e 1/4° de resolução para os campos atmosféricos. A simulação foi rodada com limites abertos, exceto na borda oeste da grade, com um spin-up de 10 anos forçados com as condições do ano de 2019 (1 de janeiro a 31 de dezembro), com uma relaxação climatológica de Temperatura e Salinidade (CFSv2), até que a solução atingisse um estado de quase equilíbrio e fosse capaz de simular adequadamente os processos em águas profundas, conforme sugerido por Kantha e Clayson (2000). As condições finais do processo de spin-up foram utilizadas como condição inicial para que uma execução de modelo fosse feita durante as estações do ano por um período de 20 dias, a fim de descrever a variabilidade sazonal das propriedades dinâmicas das correntes que ocorrem em nosso domínio da grade, como as velocidades, transportes de massa e a energia cinética média (MKE) e energia cinética parasita (EKE). As saídas do modelo foram frequentemente calculadas e mapeadas mensalmente ou plotados como séries temporais. O MKE e o EKE foram calculados seguindo Oliveira e colaboradores (2009), considerando a média anual dos componentes zonal e meridional das velocidades atuais em cada ponto da grade do modelo e as médias sazonais desses mesmos componentes.

3.2.3 Modelo de dispersão de óleo

O MEDSLIK-II consiste em um modelo lagrangeano de derramamento de óleo, descrito por De Dominicis e colaboradores (2013; 2013a), que requer a introdução de dados de vento, temperaturas da superfície do mar e correntes de modelos externos. O modelo simula processos de advecção-difusão e intemperismo de óleo, de forma discreta, incluindo espalhamento, evaporação, dispersão natural e emulsificação. A utilização do MEDSLIK-II para estudo de um banco de corais como o de Abrolhos é considerada apropriada, pois este modelo é capaz de

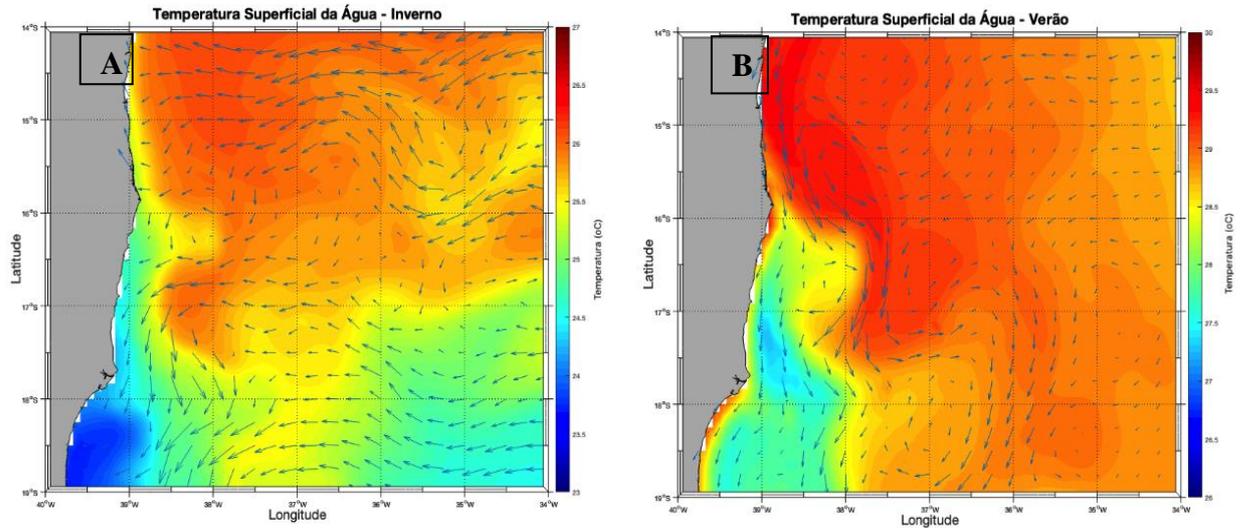
simular interações com a linha costeira e representar a absorção de parcelas de óleo no ambiente, incluindo a possibilidade de que o óleo que atingiu a linha de costa, possa ser levado de volta para a água (LIUBASTERVA *et al.*, 2020). O MEDSLIK-II produz distribuições de concentrações de óleo agregadas em caixas horizontais de 150m e balanço de massa de óleo em intervalos de 30 minutos. As simulações utilizam o espectro de onda Jonswap em função da velocidade do vento e fetch (HASSELMANN *et al.*, 1973).

O acoplamento das saídas do ROMS ao MEDSLIK-II é realizado através de sub-rotinas em linguagem Python. O processo de parametrização do MEDSLIK-II é realizado através de arquivos do código-fonte e alguns códigos secundários do MEDSLIK-II (`medslik_II.sh`, `Extract_II.for` e `medslik_II.for`). Estas novas rotinas são necessárias para reconhecer os arquivos de saída ROMS (no formato netCDF), como entrada das forçantes da temperatura da superfície do mar, correntes e ventos no MEDSLIK-II, conforme descrito por Queiroz (2019). Desta forma, pudemos forçar o modelo por 25 dias corridos, durante as estações de inverno e verão, que representam os principais padrões sazonais de vento e correntes na costa leste do nordeste brasileiro.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de velocidade superficial média durante os 24 dias de simulação para os períodos de inverno (A) e verão (B) são mostrados na Figura 3. É possível observar, além do gradiente térmico, o aumento na velocidade da CB no período de verão, acompanhando os ventos de nordeste e o deslocamento para sul da Bifurcação da Corrente Sul equatorial (SILVA *et al.*, 2009). Apesar da CB ser considerada uma corrente subtropical de contorno oeste fraca e rasa (CIRANO *et al.*, 2006), sua estrutura funciona como uma barreira física contra o transporte zonal do oceano para a costa. Cabe ressaltar que segundo Silveira e colaboradores (2000) a CB inicia seu processo de meandramentos e oscilação longitudinal somente a partir de 22°S, a CB devido a intensificação da mudança na orientação da linha de costa e o aumento da vorticidade potencial.

Figura 3- Valores sazonais climatológicos de temperatura superficial do mar (°C) e resultante da velocidade superficial para os períodos de inverno (A) e verão (B)

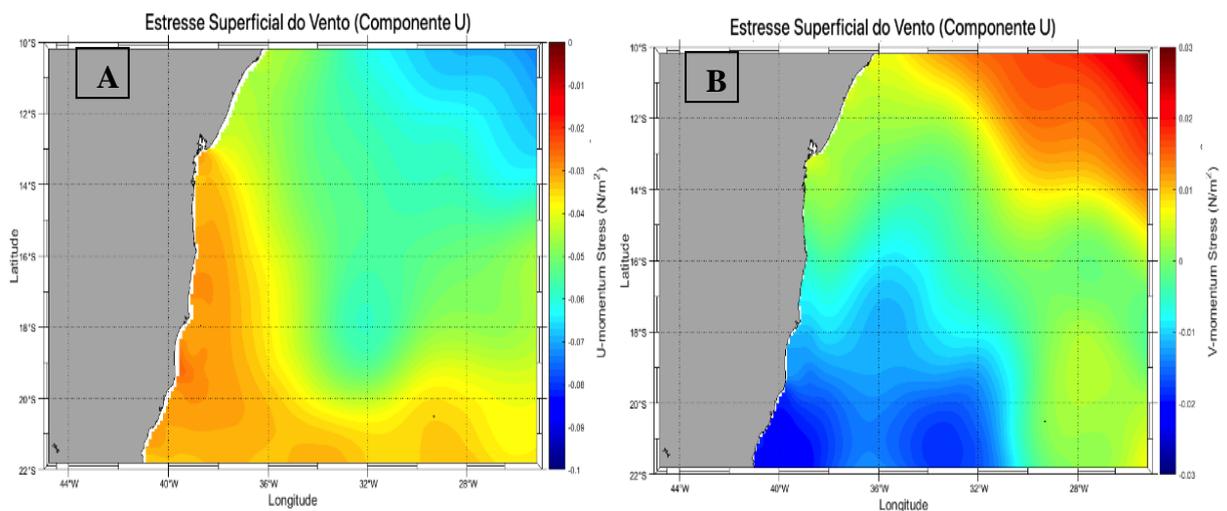


O estresse do vento na superfície oceânica é um importante mecanismo de transporte superficial exercendo influência na camada de mistura e auxiliando na solubilização do óleo. Logo, a análise dos dados de estresse do vento é mostrada na Figura 4. Os resultados demonstram que a componente zonal do vento (A) tem forte influência no transporte para oeste-sudoeste sobre a plataforma continental, enquanto a componente meridional do vento (B) acompanha o movimento da ASAS, com movimentos para norte sob influência dos ventos alísios e para sul influenciados pelos ventos de nordeste. Lessa; Cirano (2006) mostraram que, durante os meses de inverno, o litoral da Bahia recebe ventos de SE, S e SO (tempestades), geralmente após a passagem de sistemas frontais pelo sul e sudeste brasileiro. A bifurcação da CSE possui migrações latitudinais associadas a mudanças de intensidade nos valores de estresse do vento, resultando em variações sazonais no volume da CB e transportes de massa (RODRIGUES *et al.*, 2006). Para o norte (inverno austral), causa na área de estudo o enfraquecimento dos ventos de nordeste associados a ASAS (Figura 1) e a bifurcação CSE se move para o Sul. Assim, o transporte da CB na região do Banco dos Abrolhos é menor no inverno e intensificado durante o verão austral.

As temperaturas sobre o continente durante o inverno são menores; com isso, os centros de alta pressão se movem para o continente, e o oposto ocorre no verão (BASTOS *et al.*, 2000; BITTENCOURT *et al.*, 2000). Em Bastos e colaboradores (2000), a análise isobárica para o período de inverno, utilizando médias sazonais obtidas a partir de dados diários por 19 anos, foi observado que o campo de vento (linhas de corrente) mostra que prevalecem ventos de leste no Sul da Bahia. Assim, foi visto que o litoral do nordeste do Brasil se beneficia pelo transporte de umidade vindo do Atlântico Sul, o que causa um impacto no regime de chuvas da região NE.

A partir dos resultados de estresse do vento (Figuras 4A e 4B), observa-se também que, com a redução da profundidade, a batimetria se torna uma barreira física, aumentando o atrito de fundo e torna esse transporte mais lento. Esses resultados concordam com Bittencourt e colaboradores (2000) que mostram que a presença dos recifes de corais de Abrolhos e Ponta Corumbaú atuam como uma grande proteção contra a ação das ondas. Considerando um suposto caso de derramamento, os recifes de corais funcionariam como o primeiro depósito do óleo e dos seus derivados.

Figura 4 - Estresse que o vento na superfície oceânica para as componentes zonal U (A) e meridional V (B)



A primeira simulação realizada considerou um cenário hipotético para o período de inverno, no qual um único vazamento de óleo, com 1500 ton/L, foi iniciado dia 1 de agosto de 2019 (Hora Local 00:00) a partir do ponto fixo a 16.5°S/36.5°O. O modelo foi rodado com as parametrizações básicas descritas por De Dominicis e colaboradores (2013a) por um período de 576 h com atualização horária dos dados de vento, corrente e temperatura superficial do mar. Inicialmente, as distribuições de saída do modelo apresentaram uma consistência geral no movimento do óleo na direção sul, acompanhando o núcleo da CB.

O grande volume de óleo manteve-se concentrado durante os cinco primeiros dias da simulação (Figura 5B), porém com alto grau de solubilidade associado ao intemperismo nas bordas da mancha ($<0,3$ ton/km²), após 10 dias de simulação, o derramamento adentra a plataforma continental e já se encontra dentro do banco dos Abrolhos, com um alargamento

da pluma de óleo e um forte deslocamento zonal associado à ação dos ventos de quadrante leste que atua na região durante esta época do ano, conforme descrito por Degola (2013). A partir do 15º dia de derramamento, o óleo encontra-se próximo à costa e começa a sofrer influência das ondas de gravidade, aumentando a taxa de mistura, acelerando a emulsificação e o teor de água nas estruturas internas da mancha (PALADINO, 2000). Além disso, a Figura (5F) mostra o encalhe do óleo com valores inferiores a 0,1 (ton/km²), entre 16 e 20 dias de simulação, indicando uma alta degradação e uma redução no transporte zonal devido às condições médias de corrente e vento sobre a plataforma continental durante os meses de inverno.

Com base nos dados das componentes U e V da velocidade da corrente (Figura 6A, B) integradas verticalmente nos primeiros 200 m da coluna d'água, pode-se observar o impacto do arrasto superficial do vento e das principais correntes atuantes na área de estudo. Um dos princípios básicos da hidrodinâmica da plataforma continental está associado à decomposição do transporte de Ekman associados ao regime sazonal de ventos sobre cada região (RESGALLA *et al.*, 2001). No litoral sul da Bahia, durante os meses de inverno, os ventos do quadrante leste/nordeste atuam por meio da resultante no transporte de Ekman, que causa a retirada das águas de plataforma para *offshore* na direção sul/sudeste, desde o banco Royal Charlotte até o banco dos Abrolhos. Valores positivos de velocidade sobre o banco dos Abrolhos (Figura 6A), mesmo que pequenos (~0,04 m/s), apesar de frenarem o derramamento, não impediram a deposição do óleo na costa (Figuras 5E, F).

A Figura 7 mostra que derramamentos dentro da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), deverão sofrer uma forte deflexão para sul devido à CB, gerando um problema para derramamentos em latitudes menores 15°S, como ocorreu no ano de 2019. Observa-se também, que após a cruzar zonalmente pela CB, os derramamentos tendem a derivar sobre a plataforma sob influência direta do arrasto do vento. Quanto mais próximo da costa, maior será a influência das ondas de gravidade (DANIEL *et al.*, 2003). Velocidades contínuas de vento, na ordem de 5-6 m/s, durante o verão auxiliam no processo de turbulência da camada de mistura vertical e consequentemente aceleram o intemperismo do óleo. Na Figura 7 é possível observar que, a partir do quinto dia de derramamento, o óleo já sofre um intenso intemperismo, reduzindo as bordas da mancha a valores inferiores a 0,1 tons/km². Porém, pode-se observar que após 15 dias de derramamento, o óleo já atinge a região do Parque de Abrolhos com valores ainda expressivos, superiores a 0,05 tons/km², e área de abrangência superior a 100 km.

Figura 6 - Componente zonal U (a) e meridional V (b) da velocidade integrada da corrente para os primeiros 200m de profundidade, durante o período de inverno

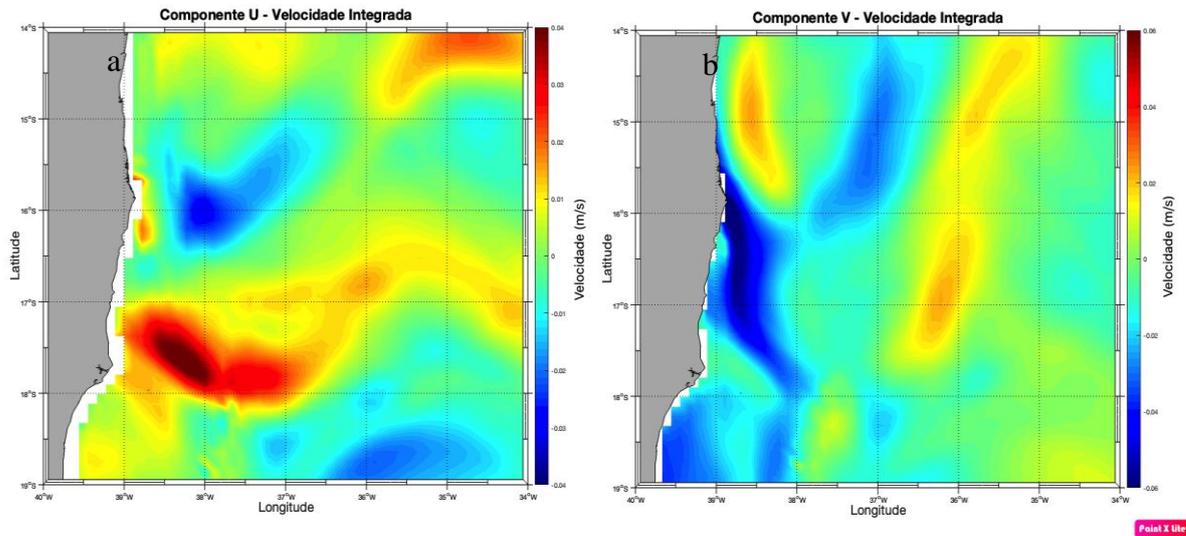
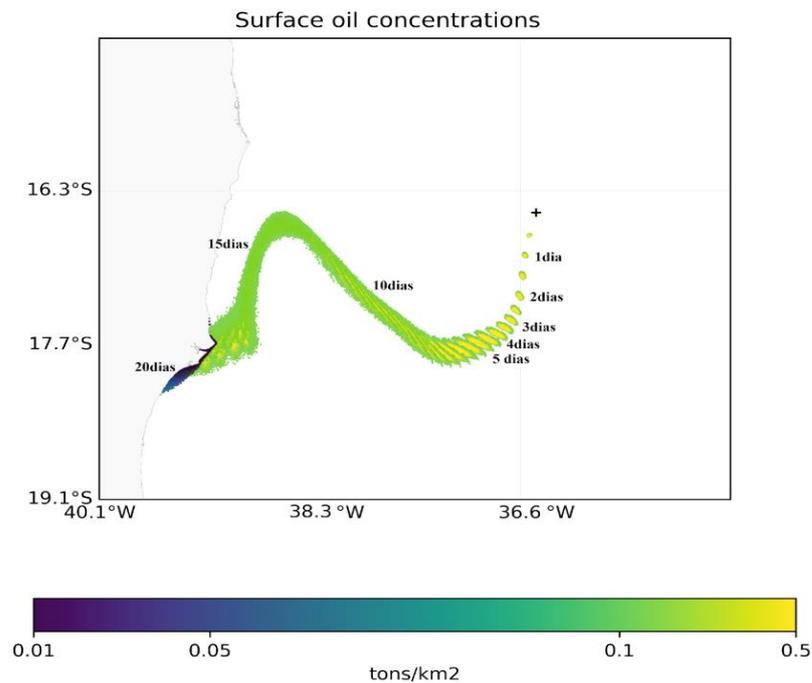


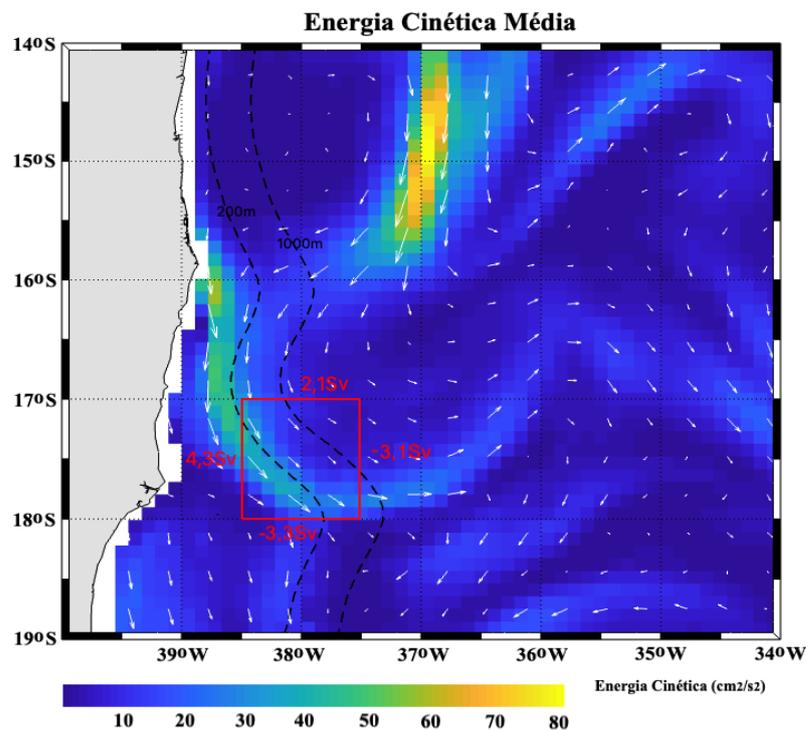
Figura 7 - Concatenação das figuras de saída do derramamento de óleo na Baía de Cumuruxatiba ($16,5^{\circ}\text{S}/36,5^{\circ}\text{O}$) simulado durante os 20 dias de inverno



Durante o verão a ZCIT se desloca mais para o sul, permanecendo predominantemente sobre o Hemisfério Sul. A convergência dos ventos alísios, influenciados pela ASAS, proporciona ventos do quadrante Nordeste na região de análise (DEGOLA, 2013). O que gera, sobre o litoral da Bahia, a predominância de ventos do quadrante nordeste (SANTOS *et al.*, 2013). Durante o verão austral, a origem da CB ocorre mais ao sul e tende a ganhar maior velocidade ao longo de sua trajetória pela costa brasileira (RODRIGUES *et al.*, 2006). Abaixo

do paralelo de 17,5°S, onde a plataforma continental cresce com o Banco de Abrolhos, a CB deixa a isobata de 500 m, em direção *offshore*, fluindo para sul até o limite de 36,5°O (SOUTELINO *et al.*, 2011). De acordo com Soutelino *et al.* (2011), em latitudes inferiores a 17°S, o fluxo da CB é ligeiramente mais intenso, com velocidades aproximadas de 0,25 m.s⁻¹. Na Figura 8 pode-se observar o deslocamento para *offshore* da CB abaixo de 17°S, com uma leve redução na velocidade <1.5 m.s⁻¹ e um transporte sobre o Banco do Abrolhos no sentido Sul fortemente influenciado pelo regime sazonal de ventos. A Figura 8 apresenta uma caixa volumétrica, ao norte do Banco do Abrolhos, de 1°x1° até profundidade de 200m. Esta região foi escolhida para calcular o transporte, pois concentra mais de 50% do fluxo principal da CB, segundo Silveira e colaboradores (2000). Nesta região pode-se observar que o transporte acompanha o meandramentos da CB pela plataforma, desde o Banco Royal Charlotte até a margem externa de Abrolhos, com valores próximos aos observados por Signore e colaboradores (1989).

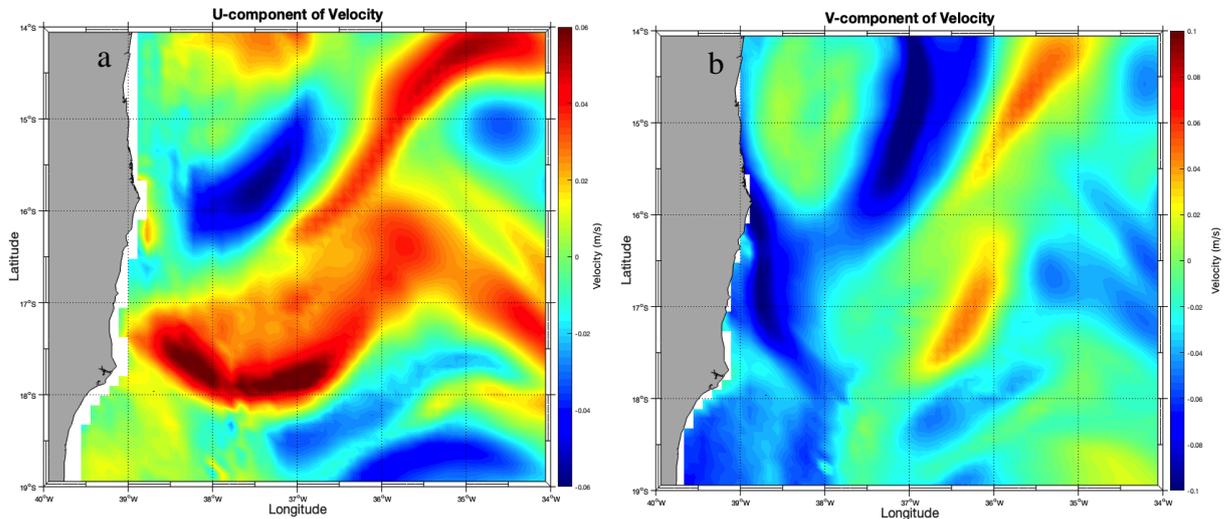
Figura 8 - Energia Cinética média estimada para os primeiros 200m da coluna d'água durante o período de verão. O quadrado em vermelho consiste na área controle para estimativa do transporte da CB, a norte do Banco dos Abrolhos



A análise das componentes U e V na Figura 9 (a, b) mostram que, durante o verão, a componente zonal oceânica apresenta valores de velocidade em direção à costa superiores a 0,04 m.s⁻¹. Ainda, que o transporte meridional da CB seja mais intenso, com velocidades de 1

ordem de grandeza acima. Os valores de energia cinética mostraram que a redução de profundidade e a vorticidade potencial atuam para que a CB migre em direção *offshore*, gerando valores de transporte, na direção sudoeste, superiores a 3 Sv (Sverdrup). Segundo Sobey e Barker (1997), para velocidades superiores a $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o transporte pode chegar a cerca de 600 m/h ou mais. Ou seja, a componente meridional da CB ao norte do Banco dos Abrolhos pode, durante o período de verão, transportar volumes significativos de óleo para sul. Desta forma, podemos concluir que, nesta época do ano, a CB atua como uma barreira física contra o transporte zonal de possíveis contaminantes liberados a leste da isóbata de 200 m.

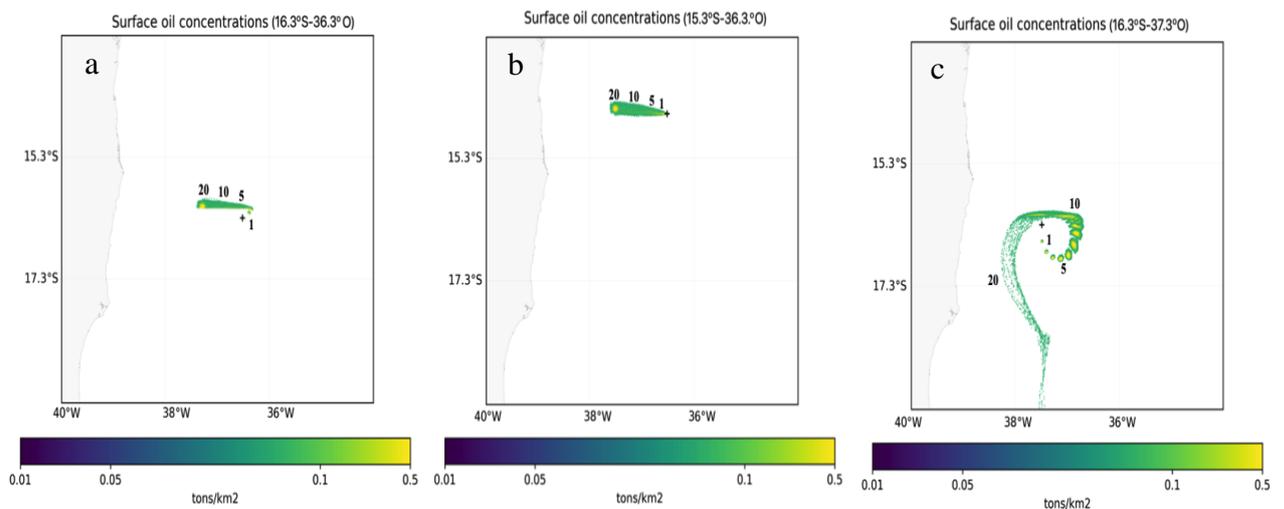
Figura 9 - Componente zonal U (a) e meridional V (b) da velocidade integrada para os primeiros 200m de profundidade, durante o período de verão



O processo de contenção do transporte zonal pela CB pode ser observado na Figura 10C, quando simulamos um derramamento na direção mais a oeste que os demais pontos ($16,5^{\circ}\text{S}$ - $37,5^{\circ}\text{O}$), próximo ao núcleo da CB. A Figura 10 mostra três cenários hipotéticos de derramamentos de óleo para o período de verão. A primeira simulação (Figura 10A) foi realizada na mesma posição da simulação de inverno ($16,5^{\circ}\text{S}/36,5^{\circ}\text{W}$) e podemos observar que ocorreu uma rápida taxa de degradação do óleo nos primeiros dias de derramamento. Porém, por estar fora da influência direta do núcleo da CB, o espalhamento do óleo acompanhou o transporte da componente zonal do oceano ($\sim 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e o arrasto do vento ($\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), criando assim um deslocamento longitudinal de aproximadamente 1° durante os vinte dias simulados. O mesmo foi observado para a segunda simulação (Figura 10B) que criou um ponto inicial de derramamento a $14,5^{\circ}\text{S}/36,5^{\circ}\text{W}$ e apresentou um deslocamento puramente zonal, também sob influência do transporte oceânico e arrasto de vento.

Por fim, com objetivo de uma análise mais detalhada do impacto da CB sobre a dispersão longitudinal do óleo durante o período de verão, executou-se uma nova simulação com a mesma latitude inicial 16,5°S, porém com 37,5°W, a oeste da longitude das outras simulações. Esta região é mais propícia à influência do núcleo da CB. A simulação mostrou um processo rotacional do derramamento de óleo durante os 10 primeiros dias, até que sua entrada no fluxo central da CB gerasse um rápido transporte do derramamento de óleo para sul, ao longo da quebra da plataforma.

Figura 10 - Simulação de um derramamento hipotético de óleo na Bacia de Cumuruxatiba durante o período de Verão. As figuras representam as posições A (16,5°S/36,5°O), B (14,5°S/36,5°O) e C (16,5°S/37,5°O) testadas para estimar possíveis situações de chegada do óleo a costa



Este processo altamente energético e turbulento ocasionou uma rápida emulsificação na estrutura do óleo, acelerando sua degradação ($<0.1 \text{ ton/km}^2$), com um alto espalhamento superficial (Figura 10C). Segundo Ribotti *et al.* (2019), as rotas do óleo computadas por modelos tendem a acumular erros em distâncias e tempos mais longos devido a simplificações dos modelos matemáticos. Porém, estas simulações servem de estimativa para tomada de decisões em caso de acidentes na costa nordeste do Brasil como aconteceu no ano de 2019 (CÂMARA *et al.*, 2020). Neste caso a presença de óleo na região de Abrolhos ocorreu pouco mais de um mês após os primeiros casos no litoral do estado de Sergipe (MAGRIS; GIARRIZZO, 2020).

Um eventual acidente nessa região poderia gerar impactos ambientais associados à contaminação de diversos elementos químicos, que vão desde contaminação por compostos orgânicos (KE *et al.*, 2002; CELINO *et al.*, 2012) até alterações nas características químicas dos habitats (ZHANG *et al.*, 2020; AL-SALEH; AL-HARSHAN, 2008; ABO-ELMAGD *et al.*,

2010). Além disso, um acidente com espalhamento de óleo pode afetar a biota de maneira severa, uma vez que as concentrações de atividade do óleo são naturalmente altas (AL-SALEH; AL-HARSHAN, 2008; ATTALLAH *et al.*, 2012; ABO-ELMAGD *et al.*, 2010). Segundo Lianne *et al.* (2021) a taxa de dose devido a exposição à radiação de biotas marinhas de referência como linguado, caranguejo e algas marinhas podem chegar a 0.5, 0.7 e 0.3 $\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente. Na prática isso significa que a ausência de atitudes imediatas pode expor a biota a situações que vão desde a redução da fertilidade até a mortalidade de espécies adultas (ICRP, 2007; 2018), dependendo do tempo de espera para uma tomada de ação.

3.4 CONCLUSÃO

Os resultados mostram que, sobre a área de estudo, existem dois pontos análogos importantes: o primeiro deles é que a CB, com sua aceleração associada aos meses de verão, pode funcionar como uma barreira física contra o transporte zonal de óleo; e o segundo ponto importante é que o transporte característico das correntes de contorno oeste pode funcionar como um forte agente espalhador de elementos associados ao óleo ao longo da costa brasileira, uma vez que as propriedades termohalinas destas águas tropicais tendem a ser conservativas e podem funcionar como um duto de transporte do óleo ao longo da costa.

Acredita-se que o presente estudo é estratégico para elaborar planos de tomadas de ação em um eventual acidente com derramamento de óleo na região. Acrescenta-se que os resultados obtidos deste trabalho poderão servir de base para que outros estudos possam ser desenvolvidos na região e que a gestão controlada das regiões ambientais vulneráveis passa pela implantação de sistemas com observações precisas do oceano capazes de visualizar os derramamentos e as trajetórias de óleo na costa brasileira.

4 DOSE NA BIOTA DEVIDO AO INCIDENTE DE DERRAMA-MENTO DE ÓLEO DE 2019 NO LITORAL DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO DOS DANOS ÀS ESPÉCIES MARINHAS COSTEIRAS USANDO SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

RESUMO

O petróleo bruto que atingiu a costa brasileira no final de 2019 foi considerado pelo Ministério Público Federal como o mais significativo desastre ambiental já registrado em águas brasileiras, com graves consequências ambientais ainda não totalmente dimensionadas e compreendidas. Uma das consequências desse derramamento de óleo é a dose entregue aos organismos marinhos. A exposição da biota à radiação, principalmente aquela pertencente às séries U-238 e Th-232, pode trazer consequências que vão desde a diminuição da fertilidade até a morte de um percentual da população exposta. Portanto, este estudo usou os animais de referência do ICRP (peixes chatos, caranguejos e algas marrons, típicos da maioria das áreas afetadas) para avaliar a dose administrada a essas populações e estimar as consequências dessa exposição. O cenário de derramamento de óleo, e os animais de referência, foram simulados no Monte Carlo N-Particle (MCNP). O transporte da radiação foi realizado até que a energia ficasse abaixo de 1 keV para fótons e 10 keV para elétrons. A série Th-232 se destacou por apresentar contribuição significativa para a dose. Porém, uma ação corretiva capaz de remover o Tl-208 diminuiria significativamente os efeitos da radiação nas populações expostas, uma vez que esse radionuclídeo se destaca como aquele que entrega mais percentual de dose, acima de 70% para pequenas profundidades. Observou-se que a característica espacial é um fator importante para avaliar os efeitos deletérios. Algas marrons foram radiologicamente mais expostas do que peixes chatos e caranguejos. Considerando que esses organismos estão no mesmo nível de exposição e profundidade, acreditamos que a estrutura fisiológica das algas marinhas contribui para a absorção desses elementos, aumentando sua toxicidade. Portanto, em um evento de derramamento de óleo como o incidente de 2019, o tempo máximo de exposição da alga marrom deve ser considerado como uma estratégia para remoção e mitigação emergencial de óleo.

Palavras-chave: Caranguejo, ICRP, MCNP, Alga marrom, Animais de referência.

ABSTRACT

The crude oil that reached the Brazilian coast at the end of 2019 was considered by the Federal Prosecutor's Office as the most significant environmental disaster ever recorded in Brazilian waters, with severe environmental consequences not yet fully dimensioned and understood. One of the consequences of that oil spill is the dose delivered to marine organisms. The exposure of the biota to radiation, especially that belonging to the U-238 and Th-232 series, can introduce consequences that range from fertility decrease to the death of a percentage of the exposed population. Therefore, this study used the ICRP reference animals (flat-fish, crab and brown seaweed, typical from most of the affected areas) to assess the dose delivered to these populations and to estimate the consequences of this exposure. The oil spill scenario, as well as the reference animals, were simulated in the Monte Carlo N-Particle (MCNP). The radiation transport was carried out until the energy was below 1 keV for photons and 10 keV for electrons. The Th-232 series stood out for presenting a significant contribution to the dose. However, a remedial action capable of removing Tl-208 would significantly decrease the effects of radiation on the exposed populations promptly, since this radionuclide stands out as the one that delivers more percentage of dose, above 70% for small depths. It was observed that

the spatial characteristic is an important factor to evaluate the harmful effects. Brown seaweed were radiologically more exposed than flat-fish and crab. Considering that these organisms are at the same level of exposure and depth, we believe that seaweed's physiological structure contributes to the absorption of these elements, increasing its toxicity. Therefore, in an oil spill event like the 2019 incident, the brown seaweed's maximum exposure time should be considered as a strategy for emergency oil removal and mitigation.

Keywords: Crab, ICRP, MNCP, Brown seaweed, Reference animals.

4.1 INTRODUÇÃO

Um dos recursos energéticos mais importantes para a economia global é o petróleo. Com o desenvolvimento da indústria de produção e exploração de petróleo e gás natural nos últimos anos, se tornou possível a exploração de reservas em locais de difícil acesso como no oceano profundo (HALL *et al.*, 2003; RADEMAEKERS *et al.*, 2015), atendendo assim a uma demanda global para o uso de hidrocarbonetos como combustível (NGENE *et al.*, 2016). Esta indústria de exploração de petróleo é também responsável por grande parte da inserção de hidrocarbonetos em ambientes marinhos (BOLLMAN *et al.*, 2010).

A liberação de óleo na superfície do oceano pode gerar potenciais impactos ambientais associados à contaminação por metais pesados (OSUJI; ONOJAKE, 2004; ZHANG *et al.*, 2020), contaminação por compostos orgânicos (KE *et al.*, 2002; CELINO *et al.*, 2012), contaminação da cadeia alimentar (LAW; HELLOU, 1999; GIN *et al.*, 2001; BOEHM *et al.*, 2005; INGOLE *et al.*, 2006; MARTIN-SKILTON *et al.*, 2008), a destruição de habitats (PETERSON, 2001), e a morte da vida selvagem (MIGNUCCI-GIANNONI, 1999). O derramamento também pode afetar a economia das comunidades costeiras, diminuindo o turismo ou prejudicando áreas de pesca comercial (CHANG *et al.*, 2014), como foi visto em uma das maiores tragédias ambientais no Brasil, onde em agosto de 2019 diversos estados do nordeste e sudeste começaram a registrar em suas praias o aparecimento de óleo bruto (LOURENÇO *et al.*, 2020). Este óleo se encontrava a cerca de 1,5 metros da superfície, o que dificultava rastrear sua origem por imagens de satélite ou sobrevoos, pois o óleo só se tornava visível ao se aproximar da costa. Sua fonte, quando, e como o vazamento aconteceu é ainda desconhecido.

O petróleo é uma mistura complexa formada por diversos compostos, que a depender da região da sua formação geológica varia em sua composição. Os seus principais elementos são os hidrocarbonetos (compostos de hidrogênio e carbono), mas também contém nitrogênio, oxigênio, enxofre, e pode conter alguns metais como níquel, vanádio e cromo (FINGAS, 2016;

PHILP, 2020). O petróleo, assim, é considerado tóxico, em razão da sua estrutura química na qual são encontrados compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), sulfeto de hidrogênio e metais pesados (PENA *et al.*, 2020; PHILP, 2020). Associado em sua estrutura química e radioativa, também são encontrados os radionuclídeos, como o urânio e tório (GREGORY *et al.*, 2014).

Os radionuclídeos de ocorrência natural (NORM, *Naturally Occurring Radioactive Material*) são aqueles encontrados naturalmente no meio ambiente, como na crosta terrestre, dentre eles estão as séries do ^{238}U , ^{232}Th e o elemento ^{40}K (ATTALLAH *et al.*, 2012). Com as atividades humanas as concentrações podem se tornar elevadas, através do processamento industrial, sendo classificadas como TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*) (MAZZILLI *et al.*, 2011). A exposição à radiação ionizante através da liberação de óleo no ambiente têm sido uma preocupação e já é relatado na literatura (KEUM *et al.*, 2013; LANDSBERGER *et al.*, 2017; OVUOMARIE-KEVIN *et al.*, 2018).

A radioproteção ambiental anteriormente era realizada de forma indireta com o ser humano como referência (ICRP, 1977). Recentemente essa abordagem começou a ser questionada e hoje já é admitido que o ambiente precisa ser protegido como um todo (ICRP, 2003; 2007; 2008).

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) avaliou os efeitos da exposição à radiação ionizante em animais e plantas (ICRP, 2008), e os mais significativos são aqueles que podem levar a modificação no tamanho ou estrutura na população, como a mortalidade precoce (levando a mudanças na distribuição de idade, taxa de mortalidade e densidade), morbidade (que podem reduzir a 'aptidão' dos indivíduos, tornando mais difícil para eles sobreviver em um ambiente selvagem), capacidade reprodutiva (afetando a taxa de natalidade, distribuição de idade, número e densidade), e a indução de dano cromossômico (ICRP, 2008).

Assim, com esta atenção para a biota não humana, Batlle e colaboradores (2011) compararam abordagens para o cálculo da taxa de dose (*TD*) absorvida para 74 radionuclídeos em cinco Animais e Plantas de Referência da ICRP. Foi observado a identificação de problemas entre as diferentes abordagens e proporcionou maior segurança sobre as abordagens do coeficiente de conversão de dose fundamental usado nos modelos disponíveis para avaliar os efeitos radiológicos para biota. Brown e colaboradores (2004) abordaram a exigência de uma metodologia para a avaliação das taxas de dose decorrentes de radionuclídeos de origem natural. Sendo visto que as doses calculadas são um pouco maiores para água doce em comparação com organismos marinhos. Mostrando assim, uma variabilidade maior das concentrações de

radionuclídeos na água doce em comparação com a água do mar e também a variabilidade ou incerteza nos valores do fator de concentração.

Ulanovsky e Pröhl (2006) descreveram uma metodologia que permite a derivação de Coeficientes de Conversão de Dose (DCCs) para organismos com uma certa densidade e com uma ampla faixa de formas elipsoidais, podendo proporcionar a possibilidade de derivar DCCs para qualquer radionuclídeo presente na base de dados da ICRP. Desta forma também, o presente trabalho propõe estimar um potencial impacto do decaimento radioativo dos elementos do óleo sobre algumas espécies de animais através do modelo MCNP.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Condições de contorno do problema

O comportamento e a composição química do petróleo derramado no mar dependem de diversos fatores. Processos como evaporação, emulsificação, dissolução, biodegradação, foto-oxidação e das interações entre óleo, sedimentos e água são suficientes para alterar as características iniciais do óleo bruto. A combinação destes processos é conhecida como intemperismo, o qual reduz a concentração de diferentes grupos de compostos, modificando as características químicas e físicas do petróleo (OUDOT *et al.*, 1998; SOUZA; TRIGUIS, 2006). Portanto, é razoável imaginar que as cadeias radioativas percam o equilíbrio radiativo após o processo de intemperismo. Além do intemperismo, é sabido que o escape do radônio em amostras ambientais é um fator importante, ao ponto de ser fundamental selar as amostras antes de realizar espectrometria gama com a finalidade dos elementos da cadeia atingirem o equilíbrio secular (LOPES *et al.*, 2018; GARCEZ *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020).

Portanto, não existe uma condição única capaz de representar fielmente a quebra das series radioativas em um evento de derramamento de óleo no mar. Portanto, no estudo atual foi considerado um modelo conservativo em que as séries do urânio e tório estão em equilíbrio secular, e, portanto, todos os elementos das series tem a mesma concentração de atividade (CA). Esse procedimento é considerado razoável, visto que os radionuclídeos que geralmente são usados para representar a série são o Ra-226 e o Ra-228 e no processo de intemperismo não há enriquecimento de elementos, apenas a depleção deles. Por isso, considerar o equilíbrio secular é superestimar valores de CA e consequentemente a *TD*.

4.2.2 Simulação computacional

O MCNPX (PELOWITZ, 2005) é um código de transporte de radiação que tem sido amplamente utilizado na área da física médica (THALHOFER *et al.*, 2018; GUIMARÃES *et al.*, 2018), para simular detectores de radiação ionizante (SALGADO *et al.*, 2012; LOPES *et al.*, 2018) e na área de ciências ambientais (ULANOVSKY; PROHL, 2006; PARK *et al.*, 2018). Nos *inputs* define-se superfícies e células a serem irradiados, bem como suas composições químicas. Características da fonte (como decaimento, posição, tamanho), número de eventos ou histórias (seguir determinada partícula desde sua origem até sua extinção) também são descritos nos *inputs*. Ou seja, a geometria do cenário de irradiação, as fontes radioativas e as grandezas que se deseja calcular, são definidas nos arquivos de entrada. A precisão dos resultados, expressa nas incertezas estatísticas, está diretamente ligada ao número de histórias.

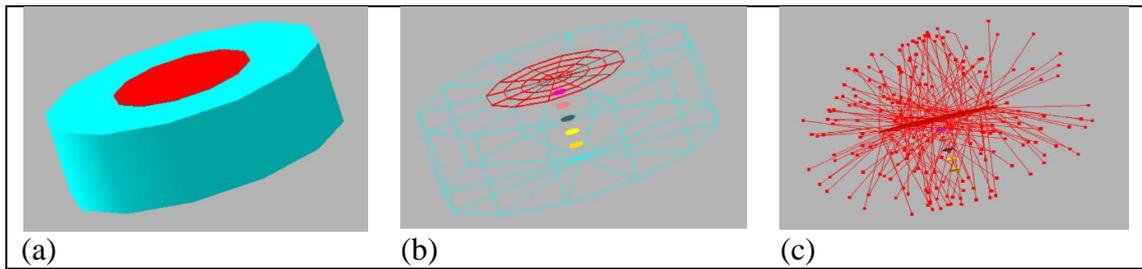
Para o presente estudo um cenário de derramamento de óleo foi simulado. As composições químicas dos materiais utilizados na simulação foram obtidas no *Compêndio de Composição de Materiais para Modelagem de Transporte de Radiação* (MCCONN *et al.*, 2011). Para simular o óleo espalhado na superfície da água foi considerado um cilindro com 1 cm de altura e um raio de 5 m. A altura foi arbitrariamente escolhida. No entanto, o raio foi ajustado de tal forma que a confiabilidade da simulação fosse maior que 95% e, ao mesmo tempo, que a borda do óleo simulado tivesse influencia desprezível. Isto é, que a radiação gama emitida pela extremidade (borda) do óleo não influenciasse significativamente da dose entregue ao organismo.

É impossível avaliar a *TD* de radiação de todos os indivíduos de vários organismos em um ecossistema. Portanto, categorizar a vida selvagem em vários grupos representativos de acordo com o nível taxonômico da família é uma abordagem pragmática para uma avaliação da dose de biota não humana (ULANOVSKY; PROHL, 2006; ICRP, 2008). Para o presente estudo foram escolhidos animais de referência de ambientes marinho e existentes na costa brasileira. A geometria do organismo foi aproximada por superfície quádrlica e modelado de acordo com o conceito de animais de referência da ICRP Publicação 108 (ICRP, 2008). As dimensões de cada animal de referência encontram-se na Tabela 1. O organismo foi posicionado no eixo central do cilindro de óleo simulado, a 100 cm de profundidade. A Figura 11 mostra detalhes da geometria utilizada para simulação computacional.

Tabela 1 - Dimensões dos animais de referência da ICRP (2008)

Organismo	Eixo principal (cm)	1° eixo menor (cm)	2° eixo menor (cm)	Massa corporal (kg)
Flatfish	40	25	2.5	1.31
Crab	20	12	6	0.754
Brown seaweed	50	50	0.5	0.654*

* massa obtida no output do MCNP

Figura 1 - Cenário de derramamento de óleo foi simulado

As energias simuladas estão disponíveis na Tabela 2. A escolha das energias foi baseada em dois critérios: maior que 150 keV e probabilidade de emissão maior que 3%. Energias menores que 150 keV são facilmente atenuadas pela água. As incertezas ficam acima dos 5% para profundidades de 100 cm, perdendo assim confiabilidade. Já as energias com baixa probabilidade de emissão não contribuem significativamente para a energia entregue ao organismo.

Tabela 2 - Energias utilizadas na simulação computacional

Séries	Radionuclídeo	Energia (keV)	Prob. de Emissão (%)
Urânio	Ra-226	186	3.6
	Pb-214	295	18.4
		352	35.6
		609	45.5
	Bi-214	1120	14.9
		1765	15.3
		2204	4.9
Tório	Pb-212	239	43.6
	Bi-212	727	6.7
	Ac-228	338	11.3
		911	25.8
		969	15.8
	Tl-208	511	22.6
		583	85.0
		2615	99.7

O transporte de radiação foi feito até que a energia estivesse abaixo de 1 keV para fótons e 10 keV para elétrons (ULANOVSKY; PROHL, 2006). A água foi utilizada como tecido material do organismo e $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ foi utilizado como densidade (ULANOVSKY; PROHL, 2006; ICRP, 2008). O comando (*tally*) *f8 foi utilizado para obter o valor da energia entregue ao organismo.

4.2.3 Coeficientes conversão de dose

O comando *f8 utilizado na simulação computacional calcula a energia depositada em um volume infinitesimal dV por meio da subtração da energia incidente pela energia emergente no volume. Por fim, para obter o valor da dose absorvida divide-se o resultado do comando *f8 pela massa do volume dV conforme a Equação 1:

$$D \text{ (Gy)} = \frac{*f8(\text{MeV})}{m(\text{kg})} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \quad (1)$$

onde: D é a dose

*f8 é a resultado no arquivo de saída do MCNP

m é a massa do organismo (ICRP, 2008)

$1,602 \cdot 10^{-13}$ é o fator de conversão de MeV para Joule

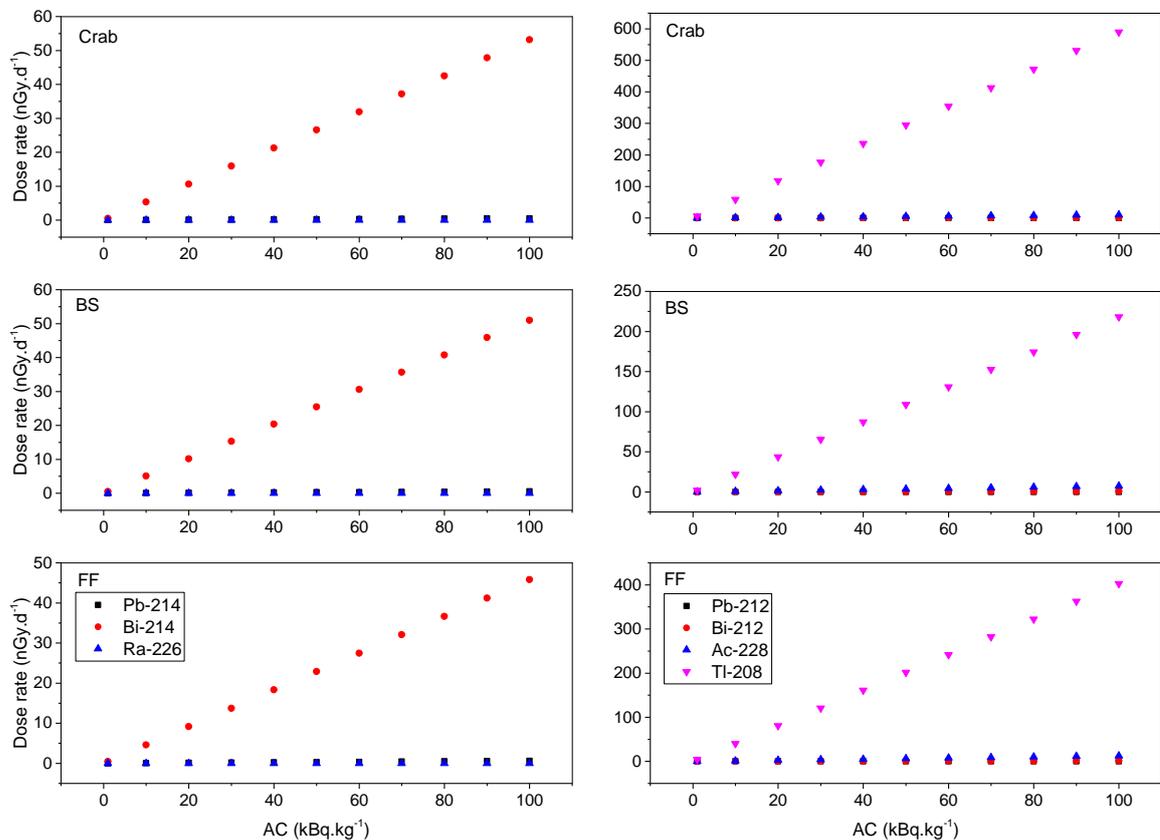
No arquivo de saída do MCNP os valores de energia depositado no organismo são normalizados. Isso significa dizer que os valores de energia entregue aos organismos são “por fóton emitido pela fonte”. Fonte que nesse caso é o óleo derramado. O total de fótons emitidos pela fonte radioativa será proporcional a $CA \text{ (Bqkg}^{-1}\text{)}$ do óleo. O tempo de exposição do organismo foi definido como sendo 1 dia (86400 s). Essa estratégia uniformiza a estimativa da $TD \text{ (Gy d}^{-1}\text{)}$ com trabalhos já disponíveis na literatura (ULANOVSKY; PROHL, 2006; ICRP, 2008; 2017).

As simulações só foram encerradas quando as incertezas ficaram baixas o suficiente, <5%. Todos os procedimentos foram feitos no Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As contribuições nas *TD* devido aos radionuclídeos das cadeias do urânio e do tório são mostradas na Figura 12. As contribuições são apresentadas em função da AC para cada radionuclídeo. Uma vez que a exposição é diretamente proporcional a dose entregue ao organismo a relação linear é esperada. Deve-se destacar as diferenças nas escalas para cada série radioativa. A diferença é de uma ordem de grandeza para o Crab e o Flatfish. Em geral, pode-se afirmar que a dose administrada devido aos elementos da série do tório é quatro vezes maior.

Figura 2 - *TD* devido cada radionuclídeo para os organismos



As emissões características de cada radionuclídeo contribui para a característica das curvas mostradas nas Figura 12. Para a série do urânio, tanto o Pb-214 como o Ra-226 variam muito discretamente suas contribuições em função da AC na *TD* comparado com a contribuição do Bi-214. Enquanto na série do tório destaca-se o Tl-208, em comparação com Ac-228, Pb-212 e Bi-212. Essa diferença na contribuição da *TD* está relacionada com as energias da radiação gama emitida por cada radionuclídeo, além das probabilidades para cada decaimento.

Como a água atua como uma blindagem natural, espera-se que quanto maior a energia, maior a probabilidade de interação da radiação com o organismo simulado.

A Tabela 3 mostra essa diferença na *TD*. Na Série do urânio, o Bi-214 contribui com uma *TD* de até 97 vezes em comparação com a contribuição do Pb-214. Para a série do tório as diferenças são mais discretas, mas são grandes o suficiente para tornar imperceptível as diferenças nas *TD*'s para cada radionuclídeo (Figura 12).

Tabela 3 - Comparação entre as *TD* entregues a cada organismo

Series	Radionuclídeos	FF	BS	Crab
U-238	Bi-214 > Pb-214	72x	85x	97x
	Pb-214 > Ra-226	125x	126x	93x
Th-232	Tl-208 > Ac-228	31x	29x	58x
	Ac-228 > Bi-212	12x	12x	14x
	Bi-212 > Pb-212	7x	25x	5x

O radionuclídeo que contribui discretamente na série do urânio para *TD* externa é o Ra-226. Este elemento é caracterizado por ser um emissor alfa de meia vida razoavelmente longa, 1600 anos. Em caso de ingestão ou inalação contribui muito na dose interna pois tem afinidade química com o elemento Ca (ROWLAND *et al.*, 1978; SILVA *et al.*, 2006). No entanto, seu gama principal tem energia discreta (186 keV) e baixa probabilidade de emissão (3.6 %).

O radionuclídeo que menos contribui para a *TD* na série do tório é o Pb-212. O elemento chumbo tem uma toxicidade conhecida. Várias consequências intestinais, hepáticas ou carcinogênicas podem ser esperadas caso seja inalado ou ingerido em excesso (MOREIRA; MOREIRA, 2004). No entanto, a *TD* devido a exposição externa é pequena em comparação com outros elementos da série. Suas energias gama de destaque são 238.6 e 300.1 keV com probabilidade de emissão de 43.6 e 3.3 %, respectivamente.

A *TD* por radionuclídeo para cada organismo simulado pode ser visto na Figura 13 e na Figura 14 para as series do uranio e tório, respectivamente. Mais uma vez, sabendo que a *TD* depende da AC, a relação linear era esperada. Nota-se uma diferença de até 4 ordens de grandeza nas escalas dos gráficos que mostram a *TD* para série do uranio. No entanto, a contribuição dos radionuclídeos em diferentes organismos está bem ajustada. A maior diferença obtida foi de 16% nas *TD*'s devido ao Ra-226 entre o Crab e o Flatfish.

Uma diferença de 3 ordens de grandeza é observada nas *TD*'s devido aos elementos da série do tório. Além disso, pode-se afirmar que as *TD*'s não têm comportamento similar as *TD*'s dos elementos da série do uranio. Destaca-se a pequena diferença (2%) na *TD* devido ao Pb-212 para o Crab e o Flatfish.

Figura 3 - Contribuição da *TD* devido cadeia do U-238 por organismo

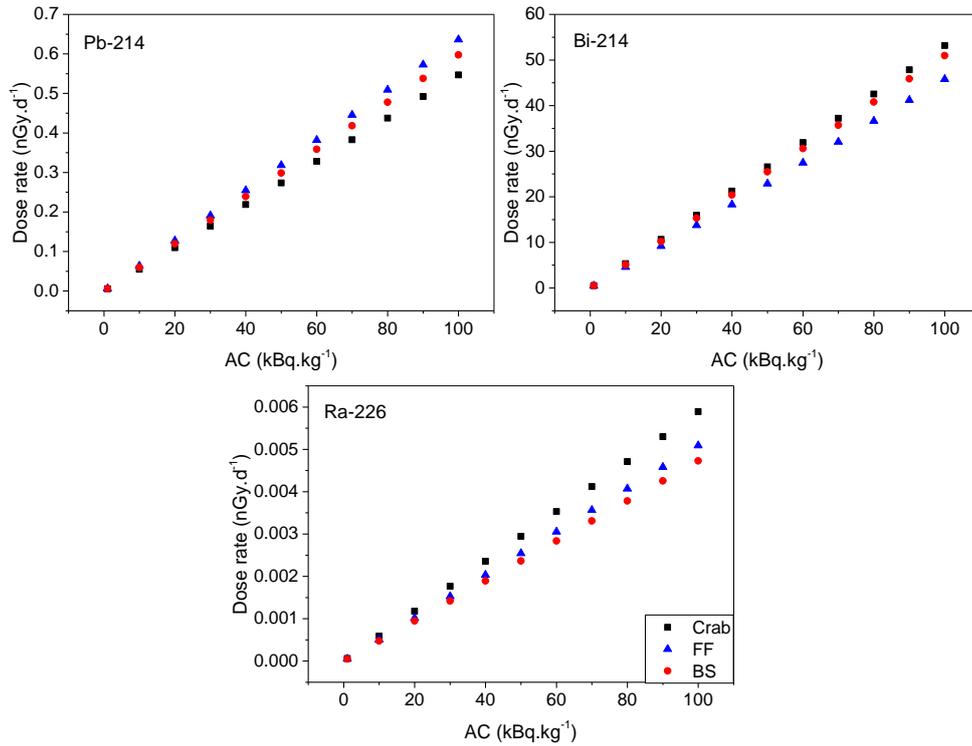
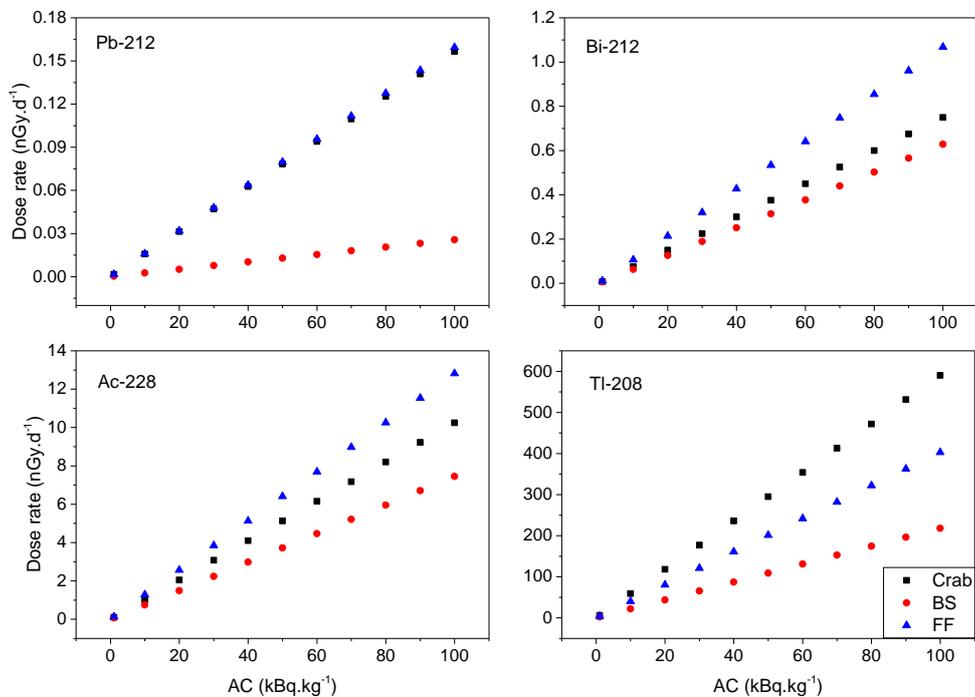


Figura 14 – Contribuição da *TD* devido cadeia do Th-232 por organismo



Finalmente, a Figura 15 mostra a *TD* total para cada organismo. A *TD* devido aos elementos da série do tório é maior que a *TD* devido aos elementos da série do urânio, para uma mesma AC. Em uma amostra que os elementos das series radioativas apresentassem a mesma

AC, a total *TD* para a série do tório seria 12 vezes maior para o Crab, 10 vezes maior para o Flatfish e 5 vezes maior para Brown Seaweed. A Tabela 4 mostra o percentual da total *TD* para cada emissor gama. Como esperado, o Tl-208 e o Bi-214 são os maiores contribuintes para total *TD* com mais de 96 %.

Figura 15 – *TD* total devido series U-238 e Th-232 para cada organismo

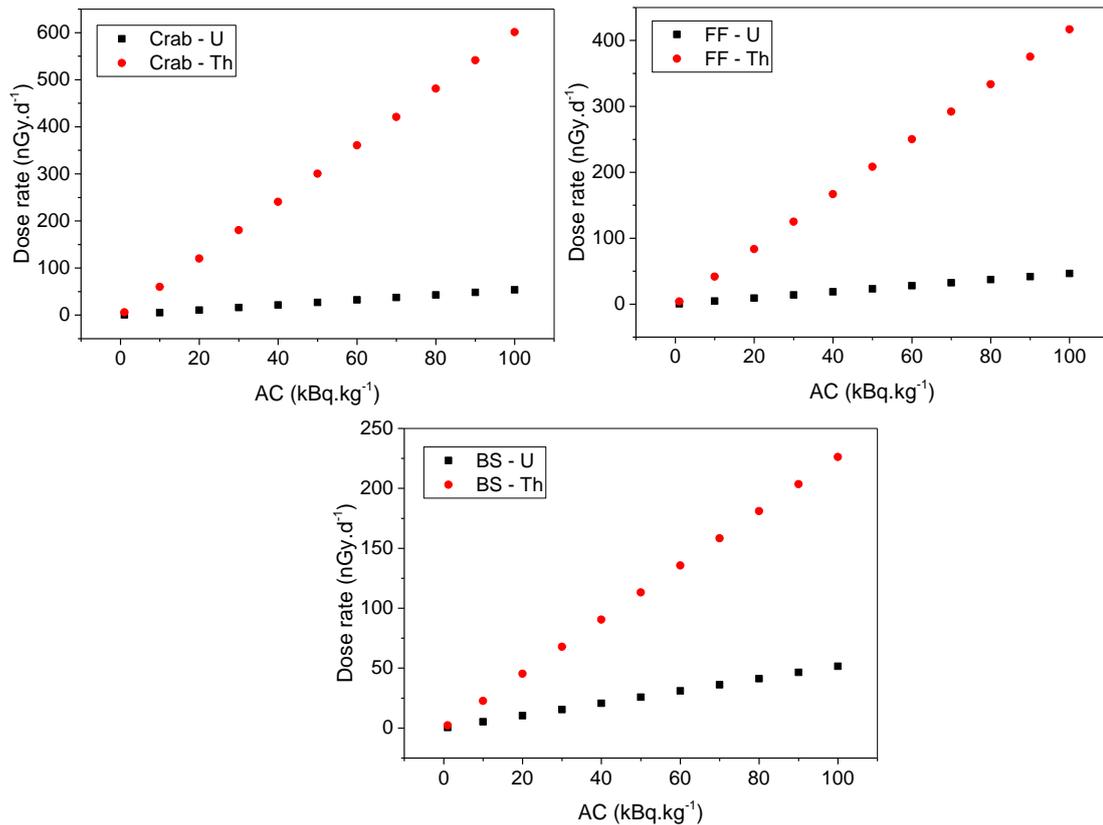


Tabela 4 - Percentual de dose para cada emissor gama

Series	Radionuclídeos	BS	FF	Crab
Urânio	Ra-226	0,01%	0,01%	0,01%
	Pb-214	1,16%	1,37%	1,02%
	Bi-214	98,83%	98,62%	98,97%
Tório	Pb-212	0,01%	0,04%	0,03%
	Bi-212	0,28%	0,26%	0,13%
	Ac-228	3,29%	3,07%	1,71%
	Tl-208	96,42%	96,63%	98,14%

A dose entregue aos organismos marinhos está diretamente relacionada com a condição espacial de cada biota. Quanto maior o volume do animal de referência, maior será a dose. Principalmente para uma geometria proposta pela ICRP (2007), onde a densidade do organismo é praticamente a mesma do meio aquático, diferenciado apenas pela salinidade do mar. Nessas

condições um organismo pequeno tem exposição menor. No entanto, uma observação deve ser feita. É possível que a estrutura planar das Brown Seaweed tenha contribuído para essa não uniformidade das análises (Figura 14).

Contudo, os valores de *TD* obtidos no presente estudo mantêm um padrão linear e inalterável para cada valor de AC (Figura 13 e Figura 14), indicando consistência nos resultados. Há de se destacar que esses valores são aproximações razoáveis, uma vez que nos casos de exposição da biota a ordem de grandeza é o fator importante (BERESFORD *et al.*, 2008; BATLLE *et al.*, 2011).

Quadro 2 - Valores estimados de *TD* obtido na literatura para diversas situações ambientais

Condições	Organismo	Dose (nGy.d ⁻¹)	Radionuclídeos	Referências
Taxa de dose interna em peixes que vivem em uma barragem construída para armazenar água para a Unidade de Tratamento de Minério	<i>Hoplias</i> spp (peixe)	4·10 ¹	U-238, Th-232 e Ra-226	Pereira et al., 2020
	<i>Astyanax</i> spp (peixe)	6.2·10 ²		
Taxa de dose total na lagoa de resfriamento da usina nuclear de Chernobyl (NPP) dez anos após o acidente	Peixes pelágicos	4·10 ⁴	Vários radionuclídeos artificiais	Kryshev e Sazykina, 2012
	Peixes bentônicos	2·10 ⁵		
Taxa de dose total perto da central nuclear de Fukushima na fase inicial do acidente	Peixe Bentônico	~ 1.7·10 ⁹	Vários radionuclídeos artificiais	Aliyu et al., 2015
	Macroalgas	~ 3.1·10 ⁹		
Taxa de dose total na República da Coreia 1 ano após o acidente da central nuclear de Fukushima	Peixe e sapo	~ 2.0·10 ¹	I-131, Cs-134 e Cs-137	Keum et al., 2013
Dose total devido à descarga de efluentes líquidos de uma instalação de medicina nuclear	Peixe	2.7·10 ²	I-131	Carmo, 2019
	Crustáceos	2.8·10 ³		

A Tabela 5 mostra alguns valores de *TD* obtidos na literatura. Observe que, se considerarmos um cenário de derramamento de óleo com AC de 100 kBq.Kg⁻¹, o *TD* obtido com as simulações feitas no presente trabalho não excederia 10³ nGy.d⁻¹ (Figura 15). Esse valor estimado é maior que os valores de *TD* em situações de controle ambiental (PEREIRA *et al.*, 2020) e bem menor que os valores de *TD* em situações severas de acidentes nucleares (ALIYU *et al.*, 2015).

Tabela 5 - Coeficiente de conversão de dose para exposição externa devido à radiação gama, em (nGy.d-1)/(kBq kg⁻¹)

Serie	Crab	Flatfish	Brown seaweed
Urânio	0.54	0.46	0.52
Tório	6.01	4.17	2.26

Com as relações lineares obtidas na Figura 15, foi possível obter coeficientes de conversão de dose para cada um dos organismos em função da AC do óleo derramado (Tabela VI). Os valores obtidos no presente estudo ajudam a estimar a exposição da biota em um evento de derramamento de óleo. Os resultados aqui apresentados devem corroborar com as técnicas já estabelecidas na literatura (ROBLES *et al.*, 2007; BROWN *et al.*, 2008). Os valores de total *TD* ainda poderão ser utilizados para averiguar o nível de comprometimento da biota detalhadamente, uma vez que modelos mais realísticos dos animais de referência estão sendo implementados (HIGLEY *et al.*, 2015). A obtenção desses dados é de extrema importância, uma vez que a dose, em condições extremas, pode causar efeitos deletérios na biota, que pode ir desde fertilidade reduzida até a mortalidade (ICRP, 2008). Portanto, em um acidente com espalhamento de óleo deve ser considerado a exposição da biota como critério de emergência para descontaminação local. Finalmente, os resultados obtidos mostram que, em um acidente onde a retirada do óleo não é possível e havendo possibilidades de desenvolver técnicas de remediação imediata, deve-se optar por desenvolver tecnologias que diminuam os efeitos radioativos dos elementos que mais contribuem com a dose, Tl-208 e Bi-214.

4.4 CONCLUSÃO

Os valores obtidos no presente estudo ajudam a estimar a exposição da biota em um evento de derramamento de óleo. A obtenção desses dados é de extrema importância, uma vez que a dose, em condições extremas, pode causar efeitos deletérios na biota, que pode ir desde fertilidade reduzida até a mortalidade (ICRP, 2008).

Finalmente, os resultados obtidos mostram que, em um acidente onde a retirada do óleo não é possível e havendo possibilidades de desenvolver técnicas de remediação imediata, deve-se optar por desenvolver tecnologias que diminuam os efeitos radioativos dos elementos que mais contribuem com a dose, Tl-208 e Bi-214.

5 CONCLUSÃO GERAL

O presente trabalho teve como um dos objetivos a criação de parâmetros básicos e conservadores a partir de metodologias simplificadas para avaliar a dose externa na biota marinha devido a um derramamento de óleo utilizando simulação computacional e os animais de referência da ICRP. Um estudo detalhado das contribuições da dose em cada organismo foi feito. Além disso, foram obtidos coeficientes de conversão de dose para Crab, Flatfish e Brown seaweed, tanto para série do urânio quanto para série do tório para organismos localizados a 1 m de profundidade. Os dados obtidos no presente estudo não são restritos ao acidente ocorrido na costa brasileira, mas podem ser utilizados para avaliar acidentes com derramamento de óleo ocorrido em tempos passados ou possíveis acidentes que venham ocorrer no futuro cujas condições geométricas possam ser razoavelmente aproximadas para geometria utilizada aqui.

A pesquisa atende as diretrizes da ICRP para radioproteção ambiental, uma vez que os resultados obtidos são úteis para prevenir ou reduzir os efeitos nocivos da radiação no meio ambiente a um nível de impacto insignificante na manutenção da diversidade biológica, na conservação das espécies ou na saúde e no estado de habitats naturais, comunidades e ecossistemas (ICRP, 2008). Além disso, é possível usar os coeficientes obtidos no presente trabalho para avaliar o tempo máximo em que a biota pode ficar exposta à radiação do óleo sem que sofra danos (ICRP, 2008), sendo útil nos protocolos para estabelecer limites para remoção de óleo da superfície da água. Esse estudo é uma primeira aproximação em termos de taxa de dose na biota devido a um derramamento de óleo. Em uma próxima investida poderá ser possível estudar a contribuição de cada radionuclídeo em termos da profundidade, além de implementar modelos matemáticos (VAN CLEEF, 1994; LI et al., 2015; WILSON et al., 2019) para refinar valores e aumentar a precisão dessa primeira aproximação.

A aplicação de uma metodologia com modelagem numérica associada ao conhecimento dos padrões sazonais climatológicos apresenta o que há de mais moderno no processo de análise espacial ambiental. Nossos resultados mostram também que sobre a área de estudo existem dois pontos análogos importantes: o primeiro deles é que a CB, com sua aceleração associada aos meses de verão, pode funcionar como uma barreira física contra o transporte zonal de óleo; e o segundo ponto importante é que o transporte característico das correntes de contorno oeste, pode funcionar como um forte agente espalhador de elementos associados ao óleo ao longo da costa brasileira, uma vez que as propriedades termohalinas destas águas tropicais tendem a ser conservativas e podem funcionar como um duto de transporte do óleo ao longo da costa.

Nossos resultados mostram que durante os meses de inverno os valores de transporte meridional da CB são menores, possibilitando que os derramamentos ocorridos a oeste da ZEE, sejam transportados pelo vento e pela componente zonal do oceano com velocidades superiores a $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. De acordo com Queiroz *et al.* (2019), o intemperismo do óleo no oceano tende a reduzir o risco na região tropical, porém a alta velocidade do transporte de óleo reduz a janela de tempo para possíveis ações de mitigação.

Acreditamos que o presente estudo é estratégico para elaborar planos de tomadas de ação em um eventual acidente com derramamento de óleo na região. O parque Nacional de Abrolhos é de grande importância no ecossistema brasileiro, uma vez que abriga uma grande biodiversidade marinha no Oceano Atlântico Sul. Os cenários simulados com o MEDSLIK-II evidenciam a necessidade de uma reavaliação dos riscos para a região. Acrescentamos que os resultados obtidos deste trabalho poderão servir de base para que outros estudos possam ser desenvolvidos na região e que a gestão controlada das regiões ambientais vulneráveis passa pela implantação de sistemas com observações precisas do oceano capazes de visualizar os derramamentos e as trajetórias de óleo na costa brasileira.

REFERÊNCIAS

- ABO-ELMAGD, M. *et al.* Radiological hazards of TENORM in the wasted petroleum pipes. **Journal of environmental radioactivity**, v. 101, n. 1, p. 51-54, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.08.016>
- AL-SALEH, F.S.; AL-HARSHAN, G.A. Measurements of radiation level in petroleum products and wastes in Riyadh City Refinery. **Journal of environmental radioactivity**, v. 99, n. 7, p. 1026-1031, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.002>
- ALIYU, A. S. *et al.* S. Fukushima nuclear accident: Preliminary assessment of the risks to non-human biota. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 163, n. 2, p. 238-250, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu158>
- AMORIM, F. N. D. *et al.* Coastal and shelf circulation in the vicinity of Camamu Bay (14 S), Eastern Brazilian Shelf. **Continental Shelf Research**, v. 31, n. 2, p. 108-119, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.11.011>
- ARAKAWA, A.; LAMB. V. Computational design of the basic dynamical process of the ucla general circulation model. **Methods in Computational Physics**, v.17, p. 173–265, 1977.
- ATTALLAH, M. F.; AWWAD, N. S.; ALY, H. f. Environmental radioactivity of TE-NORM waste produced from petroleum industry in Egypt: review on characterization and treatment. In: GUPTA S. (Ed.). **Natural Gas: Extraction to End Use**. Rijeka: InTech, Rijeka, HR, p. 548-603, 2012.
- BARKER, COLIN. Origin, composition and properties of petroleum. In: **Developments in Petroleum Science**. Elsevier, v.17, p. 11-45, 1985.
- BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. **Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. *Anais [...]*. 2000. p. 612-619.
- I BATLLE, J. V. *et al.* The estimation of absorbed dose rates for non-human biota: an extended intercomparison. **Radiation and environmental biophysics**, v. 50, n. 2, p. 231-251, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0346-5>
- BEYER, J. *et al.* Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. **Marine pollution bulletin**, v. 110, n. 1, p. 28-51, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
- BERESFORD, N. A. *et al.* An international comparison of models and approaches for the estimation of the radiological exposure of non-human biota. **Applied radiation and Isotopes**, v. 66, n. 11, p. 1745-1749, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.04.009>
- BITTENCOURT, A. C. D. S. P. *et al.* R. Patterns of sediment dispersion coastwise the State of Bahia-Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 72, p. 271-287, 2000.

BOEHM, P. D. *et al.* Comparison of mussels and semi-permeable membrane devices as intertidal monitors of polycyclic aromatic hydrocarbons at oil spill sites. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, n. 7, p. 740-750, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.02.002>

BOLLMAN, MORITZ *et al.* World Ocean Review: Living with Oceans. **UNEP Scientific and Technical Advisory Panel, Marine Debris as a Global Environmental Problem**. Hamburg: Maribus/Future Ocean: Kiel Marine Sciences/International Ocean Institute, p. 6, 2010.

BROWN, J. E. *et al.* Radiation doses to aquatic organisms from natural radionuclides. **Journal of Radiological Protection**, v. 24, n. 4A, p. A63, 2004.

BROWN, J. E. *et al.* The ERICA tool. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, n. 9, p. 1371-1383, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.01.008>

CÂMARA, S. F. *et al.* Socioeconomic vulnerability of communities on the Brazilian coast to the largest oil spill (2019–2020) in tropical oceans. **Ocean & Coastal Management**, v. 202, p. 105506, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105506>

CARMO, A. S. **Descarga de efluentes líquidos contendo radionuclídeos em uma instalação de medicina nuclear e seus impactos no meio ambiente**. 2019. p. 124-142. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CASTILHO, J. D. **Integração de dados e métodos potencias e de sensoriamento remoto como subsidio à exploração petrolífera offshore nas bacias de cumuruxatiba e jequitinhonha**. 2005. 176 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CASTRO, B. M. *et al.* Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4° N and 34° S: coastal segment (4° W). **The Sea**, v. 11, p. 209-251, 1998.

CELINO, J. J.; QUEIROZ, A. F. D. S. Fonte e grau da contaminação por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) de baixa massa molecular em sedimentos da baía de Todos os Santos, Bahia. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, p. 265-270, 2006.

CELINO, J. J. *et al.* Persistent toxic substances in surface water of Todos Os Santos Bay, Brazil. **Resources and Environment**, v. 2, n. 4, p. 141-149, 2012. DOI: [10.5923/j.re.20120204.03](https://doi.org/10.5923/j.re.20120204.03)

CHANG, S. E. *et al.* Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. **Ecology and Society**, v. 19, n. 2, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06406-190226>

CHENG, Y. *et al.* SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 2, p. 350-363, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.10.005>

CIRANO, M. *et al.* A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global OCCAM. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 209-230, 2006.

DANIEL, P. *et al.* Improvement of drift calculation in Mothy operational oil spill prediction system. **International Oil Spill Conference**. American Petroleum Institute, v. 2003, n. 1, p. 1067-1072. 2003. DOI: <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2003-1-1067>

DEGOLA, T. S. D. **Impactos e variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros**. 2013. p. 91. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DE DOMINICIS, M. *et al.* MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 1: Theory. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1851-1869, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1851-2013>

DE DOMINICIS, M. *et al.* MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 2: Numerical simulations and validations. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1871-1888, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1871-2013>

DE OLIVEIRA SOARES, M. *et al.* Oil spill in South Atlantic (Brazil): environmental and governmental disaster. **Marine Policy**, v. 115, p. 103879, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103879>

DOMINGUEZ, J. M. L. *et al.* Plataforma Continental. In: BARBOSA, J. S. F. *et al.* **Geologia da Bahia**: pesquisa e atualização. Salvador: CBPM. 2, 2012. p. 427-496

DUTRA, G. F. *et al.* Abrolhos: desafios para a conservação e o desenvolvimento sustentável na área com a maior biodiversidade marinha do Atlântico Sul. **Field Actions Science Reports. The journal of field actions**, n. Special Issue 3, 2011.

FERREIRA, A. G.; DA SILVA MELLO, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>

FINGAS, M. **The basics of oil spill cleanup**. Ed. CRC Press LLC, 2ª edição, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420032598>

FINGAS, M. **Oil spill science and technology**. Gulf professional publishing, 2016.

FRENCH MCCAY, D. P. Oil spill impact modeling: development and validation. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 23, n. 10, p. 2441-2456, 2004.

GARCÊZ, R. W. D. *et al.* Study of K-40, Ra-226, Ra-228 and Ra-224 activity concentrations in some seasoning and nuts obtained in Rio de Janeiro city, Brazil. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 120-126, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.27717>

GIN, K. Y. H. *et al.* An oil spill–food chain interaction model for coastal waters. **Marine Pollution Bulletin**, v. 42, n. 7, p. 590-597, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00205-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00205-8)

GREGORY, O. A.; FELIX, U. N.; OGHENEVOVWERO, E. E. Assessment of Background Ionization Radiation of Oil Spillage Site at Obodo Creek in Gokana LGA of River State, Nigeria. **British Journal of Applied Science & Technology**, v. 4, n. 36, p. 5072, 2014. DOI: 10.9734/BJAST/2014/12502

GUIMARÃES, N.A. *et al.* Monte Carlo simulation for the treatment of male breast cancer. **Journal of physics, CONFERENCE SERIES (PRINT)**, v. 1044, p. 012049, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1044/1/012049

HAIIDVOGEL, D. B. *et al.* Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics of atmospheres and oceans**, v. 32, n. 3-4, p. 239-281, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(00\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(00)00049-X)

HALL, C. *et al.* Hydrocarbons and the evolution of human culture. **Nature**, v. 426, n. 6964, p. 318, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02130>

HASSELMANN, K. F. *et al.* Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). **Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A**, n. 12, 1973.

HIGLEY, K. *et al.* Creation and application of voxelised dosimetric models, and a comparison with the current methodology as used for the International Commission on Radiological Protection's Reference Animals and Plants. **Annals of the ICRP**, v. 44, n. 1_suppl, p. 313-330, 2015.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **Annals of the ICRP**, ICRP Publication 103, v. 37, p. 2-4, 2007.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants. **Annals of the ICRP**, ICRP 1548 Publication 108, v. 38, p. 4-6, 2008.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. **Annals of the ICRP**, ICRP Publication 136. v. 46, n. 2, 2017.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the international commission on radiological protection. **Annals of the ICRP**, ICRP Publication 26, p. 1383-1385, 1977.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values: ICRP Publication 89. **Annals of the ICRP**, v. 32, n. 3-4, p. 1-277, 2002.

INGOLE, B. *et al.* Ecotoxicological effect of grounded MV River Princess on the intertidal benthic organisms off Goa. **Environment International**, v. 32, n. 2, p. 284-291, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.08.025>

KANTHA, L. H.; CLAYSON, C. **Numerical models of oceans and oceanic processes**. Elsevier, 2000.

KE, L. *et al.* Fate of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contamination in a mangrove swamp in Hong Kong following an oil spill. **Marine pollution bulletin**, v. 45, n. 1-12, p. 339-347, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00117-0](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00117-0)

KEUM, D. K. *et al.* Radiation dose to human and non-human biota in the Republic of Korea resulting from the Fukushima nuclear accident. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.03.2011.063>

KOROTENKO, K. A. Effects of mesoscale eddies on behavior of an oil spill resulting from an accidental deepwater blowout in the Black Sea: an assessment of the environmental impacts. **PeerJ**, v. 6, p. e5448, 2018. DOI: [10.7717/peerj.5448](https://doi.org/10.7717/peerj.5448)

KRYSHEV, A. I., SAZYKINA, T. G. Comparative analysis of doses to aquatic biota in water bodies impacted by radioactive contamination. **Journal of environmental radioactivity**, v. 108, p. 9-14, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.07.013>

LANDSBERGER, S. *et al.* Disequilibrium in the uranium and actinium series in oil scale samples. **Journal of environmental radioactivity**, v. 166, p. 126-129, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.03.026>

LAW, R. J.; HELLOU, J. Contamination of fish and shellfish following oil spill incidents. **Environmental Geosciences**, v. 6, n. 2, p. 90-98, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1526-0984.1999.08039.x>

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil (período 1987-1995). **Boletim Climanálise, Edição comemorativa**, v. 10, p. 131-135, 1996.

LEMOS, A. T. *et al.* Oil spill modeling off the Brazilian eastern coast: the effect of tidal currents on oil fate. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 625-639, 2009.

LESSA, G. C.; CIRANO, M. On the Circulation of a Coastal Channel within the Abrolhos Coral-Reef System-Southern Bahia (17° 40'S). **Brazilian Journal Coast Research**, v. 2004, p. 450-453, 2006.

LI, Q. *et al.* Determination of ²²⁶Ra activity using gamma spectrometry with ²²⁶Ra–²²²Rn disequilibrium. **Health physics**, v. 109, n. 2, p. 113-116, 2015. DOI: [10.1097/HP.0000000000000302](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000302)

LOPES, J. M., *et al.* Committed effective dose due to the intake of ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra and ²²⁸Th contained in foods included in the diet of the Rio de Janeiro city population, Brazil. **Radiation protection dosimetry**, v.181, n. 2, p. 149-155, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nx310>

- LOPES, J. M. *et al.* Comparison of simulated and experimental values of self-absorption correction factors for a fast and credible adjust in efficiency curve of gamma spectroscopy. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 141, p. 241-245, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.05.005>
- LOURENÇO, R. A. *et al.* Mysterious oil spill along Brazil's northeast and southeast seaboard (2019–2020): Trying to find answers and filling data gaps. **Marine Pollution Bulletin**, v. 156, p. 111219, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111219>
- LIUBARTSEVA, S., *et al.* Model-based reconstruction of the Ulysse-Virginia oil spill, October–November 2018. **Marine Pollution Bulletin**, v. 154, p. 111002, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111002>
- MAGRIS, R. A.; GIARRIZZO, T. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 153, p. 110961, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110961>
- MARTIN-SKILTON, R.; SABORIDO-REY, F.; PORTE, C. Endocrine alteration and other biochemical responses in juvenile turbot exposed to the Prestige fuel oil. **Science of the Total Environment**, v. 404, n. 1, p. 68-76, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.006>
- MAZZILLI, B. P.; MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M. P. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), p. 92, 2011.
- MIGNUCCI-GIANNONI, A. Assessment And Rehabilitation of Wildlife Affected by An Oil Spill In Puerto Rico. **Environmental Pollution**, v. 104, n. 2, p. 323–333, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00097-9)
- MOHRIAK, W. U. Bacias sedimentares da margem continental Brasileira. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**, v. 3, p. 87e165, 2003.
- MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: IPEA/Petrobras, 2013.
- MOREIRA, F. R., MOREIRA, J. C. Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 15, p. 119-129, 2004.
- MOREIRA, I. T. *et al.* Chemometrics applied in laboratory study on formation of oil–spm aggregates (OSAs)—a contribution to ecological evaluation. **Microchemical Journal**, v. 118, p. 198-202, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2014.09.007>
- MÜLLER, P. J. *et al.* Calibration of the alkenone paleotemperature index U37K' based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60° N-60° S). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 62, n. 10, p. 1757-1772, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00097-0)

NGENE, S. *et al.* Environmental and economic impacts of crude oil and natural gas production in developing countries. **International Journal of Economy, Energy and Environment**, v. 1, n. 3, p. 64-73, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20160103.13>

OLIVEIRA, L. R. *et al.* Brazil Current surface circulation and energetics observed from drifting buoys. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 114, n. C10006, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JC004900>

OLSON, D. B. *et al.* Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas Currents. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 35, n. 12, p. 1971–1990, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90120-3](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90120-3)

OSUJI, L. C.; ONOJAKE, C. M. Trace heavy metals associated with crude oil: A case study of Ebocha 8 Oil spill polluted site in Niger Delta, Nigeria. **Chemistry & biodiversity**, v. 1, n. 11, p. 1708-1715, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/cbdv.200490129>

OUDOT, J.; MERLIN, F. X.; PINVIDIC, P. Weathering rates of oil components in a bioremediation experiment in estuarine sediments. **Marine Environmental Research**, v. 45, n. 2, p. 113-125, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(97\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(97)00024-X)

OVUOMARIE-KEVIN, S. I.; ONONUGBO, C. P.; AVWIRI, G. O. Assessment of radiological health risks from gamma radiation levels in selected oil spill communities of Bayelsa State, Nigeria. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, n.3, p. 1-12, 2018. DOI: [10.9734/CJAST/2018/42601](https://doi.org/10.9734/CJAST/2018/42601)

PALADINO, E. E. **Modelagem Matemática e Simulação Numérica de trajetórias de Derrames de Petróleo no Mar**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

PARK, I. *et al.* Calculation of dose conversion coefficients for radioactive cesium in contaminated soil by depth and density. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 316, n. 3, p. 1213-1219, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5831-3>

PELOWITZ, D.B. **MCNPXTM User's Manual**. Los Alamos National Laboratory report LA-CP-05-0369, 2005.

PENA, P. G. L. *et al.* Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, p. e00231019, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00231019>

PEREIRA, W. D. S., *et al.* Dose in biota due to alpha radionuclide emitters in a dan associated with a uranium mining. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 8, n. 1B, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15392/bjrs.v8i1B.1079>

PETERSON, C. H. The “Exxon Valdez” oil spill in Alaska: acute, indirect and chronic effects on the ecosystem. **Advances in Marine Biology**, v. 39, p. 1-103, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(01\)39008-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(01)39008-9)

PETERSON, C. H. *et al.* Sampling design begets conclusions: the statistical basis for detection of injury to and recovery of shoreline communities after the Exxon Valdez¹ oil spill. **Marine Ecology Progress Series**, v. 210, p. 255-283, 2001. DOI: doi:10.3354/meps210255

PETERSON, C. H. *et al.* Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. **Science**, v. 302, n. 5653, p. 2082-2086, 2003. DOI: 10.1126/science.1084282

PHILP, R. P. Composition and Properties of Petroleum. **Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate**, Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, Cham. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3_13 p. 269-310

QUEIROZ, S. *et al.* Simulation of oil spills near a tropical island in the equatorial southwest atlantic. **Tropical Oceanography**, Recife, v. 47, n. 1, p. 17-37, 2019.

RADEMAEKERS, K. *et al.* **Deep-seabed exploitation: Tackling economic, environmental and societal challenges**. Brussels (BE), 2015.

RESGALLA JR, C.; DE LA ROCHA, C.; MONTÚ, M. The influence of Ekman transport on zooplankton biomass variability off southern Brazil. **Journal of plankton research**, v. 23, n. 6, p. 641-650, 2001.

RIBOTTI, A. *et al.* An operational marine oil spill forecasting tool for the management of emergencies in the italian seas. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1, 2019.

ROBLES, B. *et al.* **Modelos implementados en el código CROM**. CIEMAT, Madrid, 2007.

ROWLAND, R. E. *et al.* Current status of the study of 226Ra and 228Ra in humans at the Center for Human Radiobiology. **Health physics**, v. 35, n. 1, p. 159-166, 1978.

RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, n.1, p. 16–30, 2006.

SAHA, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2. **Journal of Climate**, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014.

SALGADO, C.M. *et al.* Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with MCNP-X code. **Progress in Nuclear Energy (New Series)**, v. 59, p. 19-25, 2012.

SANTOS, A. Á. B. *et al.* **Atlas eólico Bahia**. Salvador: SECTI - SEINFRA – CIMATEC – SENAI, 2013. 96p.

SCHMIDT, A. C. K. *et al.* Modelo paramétrico analítico para a estrutura de velocidade do sistema corrente do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n.1, p. 75-91, 2007.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model.

Ocean modelling, v. 9, n. 4, p. 347-404, 2005. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. Correction and commentary for “Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system” by Haidvogel et al., *Journal of Computational Physics* 227, p. 3595–3624. **Journal of Computational Physics**, v. 228, n. 24, p. 8985-9000, 2009. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.09.002>

SLUTZ, R. J. *et al.* Comprehensive ocean-atmosphere data set: release 1. **NOAA Environmental Research Laboratories, Climate Research Program**, Boulder, CO, 268 pp. 1985.

SILVA, C. M. *et al.* 226 Ra in milk of the dairy cattle from the rural region of Pernambuco, Brazil. **Journal of radioanalytical and nuclear chemistry**, v. 270, n. 1, p. 237-241, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0376-2>

SILVA, R. C. *et al.* Radiological evaluation of Ra-226, Ra-228 and K-40 in tea samples: A comparative study of effective dose and cancer risk. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 165, p. 109326, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109326>

SILVA, M. *et al.* High resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 30, n. 4, p. 256–269, 2009. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.07.002>

SILVEIRA, I. C. A. *et al.* A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira, Brazil. **Journal of Oceanography**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000.

SOUZA, E. S.; TRIGUIS, J. A. **Degradação do petróleo em derrames no mar—intemperismo e biorremediação**. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gas, 2006, Salvador. *Anais [...]*. 2006.

SOBEY, R. J.; BARKER, C. H. Wave-driven transport of surface oil. **Journal of Coastal Research**, v. 13, n.2, p. 490-496, 1997.

SOUTELINO, R. G. **A origem da Corrente do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de Oceanografia Física) Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo IO/USP, São Paulo, 2008.

SOUTELINO, R. G. *et al.* Is the Brazil Current eddy-dominated to the north of 20°S? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 3, p. L03607, 2011. DOI:
<https://doi.org/10.1029/2010GL046276>

STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R. G. Geostrophic Transport in the Brazil Current Region North of 20°S. **Deep-Sea Research**, v. 37, n.12, p. 1875–1886, 1990. DOI:
[https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90083-8)

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1029/1999JC900139>

STRINGARI, C. E. *et al.* Modeling an oil spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. 2, p. 397-407, 2013. DOI: 10.4236/ijg.2013.42038.

TCHAMABI, C. C. *et al.* A study of the Brazilian Fernando de Noronha island and Rocas atoll wakes in the tropical Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 111, p. 9-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.12.009>

THALHOFER, J. L. *et al.* Equivalent dose calculation in simulation of lung cancer treatment and analysis of dose distribution profile. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 142, p. 227-233, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.07.012>

TIMMERMAN, M. D.; FULLER, L. G.; BURTON, D. L. The effects of a crude oil spill on microbiological indices of soil biological quality. **Canadian journal of soil science**, v. 83, n. 2, p. 173-181, 2003. DOI: <https://doi.org/10.4141/S01-039>

TEIXEIRA, C. E. P. **Caracterização e variabilidade da Hidrodinâmica da zona costeira adjacente ao banco de Abrolhos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006

ULANOVSKY, A.; PRÖHL, G. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 45, n. 3, p. 203-214, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-006-0061-4>

VAN CLEEF, D. J. Determination of ²²⁶Ra in soil using ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi immediately after sampling. **Health physics**, v. 67, n. 3, p. 288-289, 1994. DOI: 10.1097/00004032-199409000-00012

WILSON, C. A. *et al.* Determination of Uranium Series Activity Before Secular Equilibrium Is Established. **Health physics**, v. 117, n. 4, p. 449-456, 2019. DOI: 10.1097/HP.0000000000001073

WOODHEAD, D. S. The assessment of the radiation dose to developing fish embryos due to accumulation of radioactivity by the egg. **Radiation research**, v. 43, n.3, p. 582–597, 1970. DOI: <https://doi.org/10.2307/3573231>

ZHANG, S. *et al.* Are oil spills an important source of heavy metal contamination in the Bohai Sea, China? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 3, p. 3449-3461, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06913-1>

ZHANG, J. *et al.* Oil spill detection in quad-polarimetric SAR Images using an advanced convolutional neural network based on SuperPixel model. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 944, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12060944>

WIENDERS, N.; ARHAN, M.; MERCIER, H. Circulation at the western boundary of the South and Equatorial Atlantic: Exchanges with the ocean interior. **Journal of Marine Research**, v. 58, n. 6, p. 1007-1039, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1357/002224000763485782>