



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**VICTOR PEIXOTO NUNES CORDEIRO**

**CONECTIVIDADE ECOLÓGICA ENTRE A MARGEM EQUATORIAL  
BRASILEIRA E O CARIBE.**

**FORTALEZA**

**2018**

VICTOR PEIXOTO NUNES CORDEIRO

CONECTIVIDADE ECOLÓGICA ENTRE A MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA E O  
CARIBE.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Marinhas Tropicais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Oceanografia. Área de Concentração: Multidisciplinar

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Raúl Cruz Isquierdo

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C821c Cordeiro, Victor Peixoto Nunes Cordeiro.  
Conectividade ecológica entre a margem equatorial brasileira e o Caribe. / Victor Peixoto  
Nunes Cordeiro Cordeiro. – 2018.  
48 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar,  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Coorientação: Prof. Dr. Raul Cruz Isquierdo.

1. Oceanografia Física. 2. Conectividade Ecológica. 3. Amazonas. 4. Modelagem  
Numérica. 5. Lagosta Espinhosa. I. Título.

CDD 551.46

---

VICTOR PEIXOTO NUNES CORDEIRO

CONECTIVIDADE ECOLÓGICA ENTRE A MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA E O  
CARIBE.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Marinhas Tropicais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Oceanografia. Área de Concentração: Multidisciplinar

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres teixeira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raúl Cruz Isquierdo (Coorientador)  
Universidade Coorientador (SIGLA)

---

Prof. Dr. Luis Ernesto Arruda Bezerra  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Não há maneira de produzir uma lista de agradecimentos sucinta que faça jus a todas as pessoas que contribuíram para a confecção deste trabalho. Assim, apesar de não ser possível mencionar todas os colaboradores diretos e indiretos, farei breves agradecimentos às pessoas que me vieram a mente no momento em que escrevo estes agradecimentos.

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, professor Carlos Teixeira. Professor, parabéns. És um grande exemplo de professor, cientista e orientador. Suas lições vão além do âmbito acadêmico.

Ao meu coorientador, professor Dr. Raúl Cruz, sem o qual seria impossível a produção desta dissertação.

Aos meus companheiros de laboratório que me acompanharam ao longo deste mestrado. Bárbara, Rafael, Vitória, Susana, Matheus, Edie, Samuel, Gustavo, Aírton, Gabriela, e outros, pelas risadas e momentos alegres compartilhados durante um "bom" café. Vocês tornam o Laboratório de Oceanografia Física (LOF) um lugar acolhedor e agradável para se trabalhar. Aos professores que dividiram o espaço do LOF neste período: professora Dra. Ana Paula, professor Dr. Geraldo, professor Dra. Kamila.

Ao meu grande amigo Pedro Silveira Calixto. Sua ajuda com Python fez diferença.

Ao LABOMAR e todos os seus funcionários (técnicos, porteiros, funcionários da limpeza e do administrativo). Ótimos nove anos passei aqui!

À minha família. Especialmente à minha mãe, meus irmãos e minha esposa. Estes contribuíram não apenas com a realização deste mestrado mas com todas as vitórias em minha vida.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

## RESUMO

Compreender os processos envolvidos na dispersão larval é fundamental para estabelecer a conectividade entre os mais variados ecossistemas marinhos. As lagostas espinhosas são organismos meroplancctônicos amplamente distribuídos e que ocupam lugar de destaque na economia pesqueira do Atlântico Tropical, no entanto as características da sua dispersão larval referente a longas distâncias é ainda pouco conhecida. A Duração Pelágica larval desses organismos é tipicamente longa (próxima de um ano) o que permite a estes organismos migrarem longas distâncias através das correntes oceânicas. Neste trabalho foi testada a conectividade física entre a Plataforma Continental Norte Nordeste do Brasil e o Caribe e a atuação das baixas salinidades desenvolvidas pela pluma do Amazonas como barreiras para o transporte dessas larvas entre essas duas regiões. Mediante a análise de boias de deriva e utilizando modelagem numérica foram gerados três cenários (S32, S33 e S34) que se diferenciavam pela introdução de uma salinidade letal as larvas de 32, 33 e 34, respectivamente. A simulações foram feitas para os anos de 2009 e 2016. Os resultados indicam a existência de conectividade física entre as regiões dentro do período referente a duração pelágica larval da lagosta *Panulirus Argus*. A conexão ocorre preferencialmente entre 90 e 120 dias, porém larvas chegaram a região do Caribe com apenas 56 dias de deriva. Foram detectadas boias de deriva com até 61 dias de duração da trajetória entre as regiões. A salinidade foi capaz de reduzir a conectividade mas não bloqueá-la por completo. As simulações com maiores salinidades letais promoveram maior redução da conexão. Houve pouca diferença interanual tanto para a conectividade quanto para a atuação da pluma do Amazonas como barreira. As profundidades se mostraram determinantes na mortalidade das larvas devido a salinidade. Nas simulações com as larvas fixas em determinadas profundidades as profundidades maiores resultaram em menores taxas de mortalidade.

**Palavras-chave:** Conectividade. Amazonas. Modelagem numérica. Lagosta espinhosa.

## ABSTRACT

Understanding the processes involved in larval dispersal is critical to establishing connectivity among the most varied marine ecosystems. Spiny lobsters are widely distributed meroplanktonic organisms that occupy a prominent place in the tropical Atlantic fishery economy, but the characteristics of their larval dispersion regarding long distances is still unknown. Larval Pelagic Duration of these organisms is typically long (close to one year) which allows these organisms to migrate long distances through ocean currents. In this work the physical connectivity between the Equatorial Continental Shelf of Brazil and the Caribbean was tested and the action of low salinities developed by discharges of the Amazon as barriers for the transport of these larvae between these two regions were tested. Three scenarios (S32, S33 and S34) were generated by the introduction of a lethal salinity to the larvae of 32, 33 and 34, respectively. The simulations were performed for the years 2009 and 2016. The results indicate the existence of physical connectivity between the regions within the period referring to the larval pelagic duration of the *Panulirus argus* lobster. The connection occurs preferably between 90 and 120 days, but larvae arrived in the Caribbean region with only 56 days of drift. Drift buoys were detected with up to 61 days of trajectory duration between regions. The salinity was able to reduce connectivity but not block it although. The simulations with higher lethal salinities promoted greater reduction of the connection. There was little interannual difference for both connectivity and performance of the Amazon discharge as a barrier. The depths were determinant in larval mortality due to salinity. In simulations with fixed larvae at certain depths, the greater depths resulted in lower mortality rates.

**Keywords:** Conectivity. Amazon. Numerical modelling. Spiny lobster.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa da área de estudo. O polígono laranja demarca a região considerada como destino das larvas no Caribe. Os pontos verde demarcam os pontos de liberação das larvas virtuais. . . . . 20
- Figura 2 – Principais correntes superficiais e subsuperficiais do Atlântico Tropical durante períodos de outono (quadro a esquerda) e primavera (quadro a direita) no hemisfério sul. . . . . 21
- Figura 3 – Série temporal de salinidade do Modelo Global Mercator (GLORYS) e de dados observacionais (Assimilação do Modelo) para a área de estudo. A série compreendeu o período entre 2006 e 2017. Em linha em roxo representa as médias anuais da salinidade na margem adjacente a foz do Amazonas, obtidas do Mercator . . . . . 24
- Figura 4 – Distribuição espacial da salinidade de dados do modelo Mercator (superior) e do satélite SMOS (inferior) do mês de maio para o ano de 2016. A barra de cores, as abcissas e as ordenadas representam a salinidade, longitudes e latitudes, respectivamente, em todas imagens. A linhas de contorno indicam as isoalinas . . . . . 25
- Figura 5 – Distribuição espacial da salinidade de dados do modelo Mercator (superior) e do satélite SMOS (inferior) do mês de novembro para o ano de 2016. A barra de cores, as abcissas e as ordenadas representam a salinidade, longitudes e latitudes, respectivamente, em todas imagens. A linhas de contorno indicam as isoalinas . . . . . 26
- Figura 6 – Boia de deriva lançada na PCNNB que apresentou trajetória mais rápida entre a PCNNB e o Caribe. O período necessário para esta boia ultrapassar a latitude de 10°N foi de 61 dias. A barra de cores indica o período do ano durante a trajetória da boia. O círculo marca o final da trajetória e o X marca o início . . . . . 30
- Figura 7 – Trajetórias das boias de deriva. A de cima para baixo estão as trajetórias do tipo 1 e 2, respectivamente. A barra de cores indicada o período do ano ao longo da trajetória da boia. . . . . 32
- Figura 8 – Trajetória de uma boia de deriva do tipo 3. . . . . 33

Figura 9 – Mapas apresentando a trajetória das larvas que chegaram até o Caribe para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2009. Os pontos verdes os pontos de liberação das larvas, as linhas pretas sua trajetória e os quadrados vermelhos a posição da larva ao final da simulação. . . . .	34
Figura 10 – Mapas apresentando a trajetória das larvas que chegaram até o Caribe para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2016. Os pontos verdes os pontos de liberação das larvas, as linhas pretas sua trajetória e os quadrados vermelhos a posição da larva ao final da simulação. . . . .	35
Figura 11 – Histograma do tempo de chegada das larvas, dividido em classes, para os experimentos SSL. As classes foram divididas de 30 em 30 dias. . . . .	36
Figura 12 – Distribuição do período mensal de lançamento das larvas que apresentaram conectividade para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde). A figura superior apresenta as médias mensais para 2009 e a inferior para 2016	37
Figura 13 – Distribuição mensal do período de chegada das larvas ao Caribe (em porcentagem) para os experimento SSL (sem salinidade letal) . . . . .	38
Figura 14 – Distribuição mensal do período de chegada das larvas ao Caribe (em porcentagem) para os experimento com salinidade letal . . . . .	39
Figura 15 – Mapas apresentando a trajetória das larvas (linhas pretas) e posição (quadrados) de letalidade devido a salinidade para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2009. A barra de cor denota a profundidade onde ocorreu a morte da larva referente aos quadrados. . . . .	41
Figura 16 – Mapas apresentando a trajetória das larvas (linhas pretas) e posição (quadrados) de letalidade devido a salinidade para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2016. A barra de cor denota a profundidade onde ocorreu a morte da larva referente aos quadrados. . . . .	42
Figura 17 – Distribuição dos períodos de desova mensal das larvas que morrem devido a salinidade para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde). A figura superior apresenta as médias mensais para 2009 e a inferior para 2016	43
Figura 18 – Distribuição dos períodos de morte das larvas para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde) em relação ao total de larvas mortas. A figura superior apresenta as médias mensais para 2009 e a inferior para 2016	44

Figura 19 – Percentual de larvas mortas em cada profundidade do experimento com larvas fixas (sem deslocamento) ara os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde) para o ano de 2016 . . . . .	46
Figura 20 – Climatologia do campo de correntes da margem equatorial do AT no período entre Abril e Junho . . . . .	49
Figura 21 – Climatologia do campo de correntes da margem equatorial do AT no período entre Julho e setembro . . . . .	50
Figura 22 – Climatologia sazonal dos ventos na margem oeste do AT, da descarga do Amazonas e do transporte da CNB . . . . .	52
Figura 23 – Médias diárias das velocidades meridionais das trajetórias das larvas entre as latitudes de 5° e 10° N. Em laranja e verde estão as velocidades da componente v da velocidade para os anos de 2009 e 2016, respectivamente. A linha azul corresponde as médias diárias da velocidade meridional das larvas de 2016 menos as médias diárias de velocidade meridional das larvas em 2009. Valores positivos (negativos) indicam fluxos em direção ao hemisfério norte (sul) . . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número total e relativo das larvas que chegaram no Caribe por simulação para ambos os de 2009 e 2016. Em cada simulação foram liberadas um total de 8000 larvas. . . . .	33
Tabela 2 – Mortes totais devido à salinidade para cada simulação com deslocamento vertical habilitado. S32, S33 e S34 refere-se as simulações com salinidades letais 32, 33 e 34, respectivamente . . . . .	40
Tabela 3 – Profundidade média (m) das mortes por salinidade para as simulações com deslocamento vertical habilitado. A profundidade é zero em superfície e assume valores negativos em direção ao fundo. . . . .	40



## LISTA DE SÍMBOLOS

PCNNB	Plataforma Continental norte nordeste do Brasil
DLP	Duração Pelágica Larval
AT	Atlântico Tropical
MDBI	Modelo de Dispersão Baseado no Indivíduo
CSE	Corrente Sul Equatorial (CSE)
CNE	Corrente Norte Equatorial (CNE),
CCNE	Contra Corrente Norte Equatorial
I	Sub Corrente Equatorial
sCSE	ramo sul da Corrente Sul Equatorial
cCSE	ramo central da Corrente Sul Equatorial
nCSE	ramo norte da Corrente Sul Equatorial
CB	Corrente do Brasil
SCNB	Sub Corrente Norte do Brasil
CNB	Corrente Norte do Brasil
CCNE	Contra Corrente Norte Equatorial
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean
SMOS	Soil Moisture Ocean Salinity
S32	Experimento com salinidade letal menor ou igual a 32 psu
S33	Experimento com salinidade letal menor ou igual a 33 psu
S34	Experimento com salinidade letal menor ou igual a 34 psu
SSL	Experimento sem salinidade letal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	16
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> . . . . .	19
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	20
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b> . . . . .	20
<b>3.2</b>	<b>Circulação geral do Atlântico Tropical</b> . . . . .	21
<b>3.3</b>	<b>Retroflexão da CNB</b> . . . . .	22
<b>3.4</b>	<b>Forçantes hidrodinâmicas</b> . . . . .	22
<b>3.5</b>	<b>Global Model Analysis from Mercator Ocean</b> . . . . .	23
<b>3.6</b>	<b>OpenDrift v1.0.3</b> . . . . .	24
<b>3.7</b>	<b>Simulações</b> . . . . .	25
<b>3.8</b>	<b>Análise dos dados de saída do modelo</b> . . . . .	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	30
<b>4.1</b>	<b>Conectividade entre a PCNNB e o Caribe</b> . . . . .	30
<b>4.1.1</b>	<b>Boias de Deriva</b> . . . . .	30
<b>4.1.2</b>	<b>Modelo</b> . . . . .	31
<b>4.2</b>	<b>Sazonalidade da conectividade</b> . . . . .	33
<b>4.3</b>	<b>Mortalidade das larvas</b> . . . . .	38
<b>4.4</b>	<b>Sazonalidade das mortes devido à salinidade</b> . . . . .	40
<b>4.5</b>	<b>Simulações com deslocamento vertical desabilitado</b> . . . . .	45
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> . . . . .	47
<b>5.1</b>	<b>Conectividade Física</b> . . . . .	47
<b>5.2</b>	<b>Sazonalidade da conectividade</b> . . . . .	48
<b>5.3</b>	<b>Variabilidade interanual</b> . . . . .	51
<b>5.4</b>	<b>Influência da Profundidade na mortalidade das larvas</b> . . . . .	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	57

## 1 INTRODUÇÃO

O esforço humano voltado para descoberta, compreensão e exploração dos recursos marinhos têm aumentado muito nas últimas décadas. Atividades como a extração de recursos não renováveis e a pesca, além de economicamente importantes são causas de impactos ambientais. Felizmente, as preocupações quanto a forma de exploração desses recursos também cresceu nas últimas décadas. Soma-se a isso o fato dos oceanos serem ambientes ainda pouco compreendidos cuja resiliência ainda é desconhecida em vários aspectos (FORD et al., 2018 – [1]).

No que diz respeito a correta exploração de recursos vivos, estudos envolvendo o transporte larval marinho e a conectividade entre ambientes são fundamentais para compreender e prever a distribuição das espécies (COWEN; LWIZA, ; KOUGH et al., 2013). Dados sobre a capacidade de organismos meroplanctônicos de ultrapassarem barreiras ecológicas durante sua Duração Pelágica Larval (DLP) são escassos, o que acarreta uma lacuna no entendimento da dinâmica e colonização de ecossistemas marinhos (LUIZ et al., 2011).

O transporte e distribuição larval de organismos marinhos não depende apenas das características biológicas de cada espécie e a compreensão da dinâmica de correntes oceânicas sobre esse transporte é fundamental para a gestão dos estoques pesqueiros. Devido a longa duração pelágica larval de muitos organismos, estudos de processos físicos de pequena escala fornecem pouca informação acerca dos possíveis destinos dessas larvas, conectividade e áreas com potencial de colonização. Assim, é necessário o desenvolvimento de estudos que integrem a dinâmica oceânica de meso e larga escala com o transporte larval. Além disso, gradientes físicos e químicos da água do mar podem atuar como barreira para dispersão de organismos marinhos (LUIZ et al., 2011).

Um dos exemplos da importância da circulação e destes gradientes para dispersão de organismos se dá na porção oeste do Oceano Atlântico Tropical (AT). Esta região, além da complexa circulação com a presença de velocidades intensas associadas a Corrente Norte do Brasil, células de retroflexão e vórtices, recebe o maior volume de descarga fluvial do mundo proveniente dos rios Orinoco e Amazonas. Esta descarga gera uma pluma de alta turbidez e baixa salinidade que levanta um questionamento sobre a conexão entre populações de organismos marinhos que colonizam as áreas costeiras a sul e a norte da respectiva pluma. Diversos trabalhos (LUIZ et al., 2011; TOURINHO et al., 2012; GIRALDES; SMYTH, 2016) sugerem que esta banda de baixa salinidade reduz ou mesmo bloqueia a conectividade da maioria dos organismos costeiros marinhos na borda oeste do AT, porém esta hipótese ainda não foi

comprovada.

Um das espécies cuja a dispersão larval permanece envolta em questionamentos no AT são as lagostas espinhosas. As lagostas espinhosas são organismos meroplanctônicos pertencentes a família *Panulidae* e são amplamente distribuídas ao redor do mundo. Há registro desses animais na América Latina, América do Norte, Austrália, Nova Zelândia, Oceano Índico, África e Mar Mediterrâneo (RUDORFF, 2006). A DLP desses animais é tipicamente longa (próxima a um ano) (PROBIC *et al.*, 2012; RUDORFF *et al.*, 2009a). Cruz *et al.* (2015) estima a DPL em 7 meses, o que permite a advecção destes por longas distâncias através de correntes oceânicas. As larvas também podem deslocar-se verticalmente na coluna d'água realizando uma migração nictemeral, podendo ultrapassar os 100 metros de profundidade (RIBEIRO, 2017b).

Dúvidas relativas a capacidade de dispersão larval destas espécies de lagostas datam dos anos 50 (MCCONAUGHA, 1992) e, a despeito do esforço e incremento científico nessa área, muitas destas dúvidas ainda permanecem. Estas lacunas se devem principalmente devido à complexidade e o elevado custo de amostragem e a dificuldade de se obter amostras representativas da variabilidade e espacial e temporal da distribuição das larvas de lagostas. No Brasil, apesar de grande importância econômica das lagostas espinhosas para atividade pesqueira devido ao seu alto valor agregado, pouco se sabe sobre a distribuição larval destes animais e não existem trabalhos científicos publicados sobre o tema.

Dentro deste contexto, Modelos de Dispersão Baseados no Indivíduo (MDBI) acoplados a saídas de um modelo hidrodinâmico para obter o campo de circulação de uma região têm sido amplamente empregados como uma ferramenta útil e de baixo custo no estudo da dispersão de organismos com parte do ciclo de vida planctônico (RIBEIRO, 2017b; MEDEL *et al.*, 2018; VASILE *et al.*, 2018; RUDORFF *et al.*, 2009b). Estes modelos de dispersão também têm sido usados com sucesso para estudos de conectividade de ecossistemas marinhos (ABESAMIS *et al.*, 2016; RIBEIRO, 2017b; PROBIC *et al.*, 2012; RUDORFF *et al.*, 2009b; LETT *et al.*, 2008).

Partindo-se do conhecimento sobre o local de desova e recrutamento de espécies os MBIs nos fornecem um indicativo da trajetória de dispersão das larvas. Além disso, a vantagem de usar os MBI comparado a simples modelos de dispersão de partículas, está a capacidade dos MBIs de modelar características biológicas dos indivíduos, por exemplo taxas de natação, migração vertical, taxas de mortalidade, valores ambientais letais, etc. Estes modelos podem realizar tanto simulações com avanço no tempo (forward) para saber o destino dos organismos, como simulações reversas no tempo (backward) para saber a sua origem.

Neste trabalho o MDBI OpenDrift (DAGESTAD *et al.*, 2018), um modelo de código livre e não comercial, é utilizado para simular a dispersão de larvas de lagosta espinhosa na região do oceano Atlântico Tropical.

A *Panulirus meripurpuratus* (GIRALDES; SMYTH, 2016) foi a espécie de lagosta espinhosa escolhida para testar a conectividade ecológica no Atlântico Tropical. A escolha da espécie se deve a discussões sobre a sua região e padrões de ocorrência. Além disso, Cruz *et al.* (2015) indicam que, dependendo das condições de desova, a DLP de *P. meripurpuratus* pode chegar a 7 meses o que as tornam propícias para longas migrações larvais na fase planctônica. A espécie também apresenta desova contínua na quebra de plataforma ao longo do ano (CRUZ; BERTELSEN, 2009) o que permite o uso de um modelo hidrodinâmico oceânico, como o proposto neste trabalho, não específico para regiões de plataforma. Medel *et al.* (2018) reporta sobre a importância de processos físicos de meso escala no estudo de lagostas espinhosas

Só recentemente a *Panulirus meripurpuratus* foi diferenciada de *Panulirus argus* com base em características taxonômicas e sua ocorrência foi delimitada pelos autores para a plataforma continental brasileira. A espécie já havia sido diferenciada por Sarver *et al.* (1998) ao analisarem geneticamente 259 indivíduos coletados no Caribe e sugeriram a existência de duas sub-espécies: *Panulirus argus westonii* para indivíduos que vivem em águas brasileira e *Panulirus argus argus* para indivíduos que habitam as regiões do Caribe e América do Norte. Porém esta diferenciação não foi aceita pela *International Code of Zoological Nomenclature*, por falta de evidências taxonômicas e atualmente a definição aceita é *Panulirus meripurpuratus* em águas brasileira e *Panullirus argus* no Caribe e América do Norte.

A distribuição de *Panulirus meripurpuratus* descrita em Giraldes e Smyth (2016) foi baseada nos trabalhos de Sarver *et al.* (1998) e Tourinho *et al.* (2012). A descarga dos rios Amazonas e Orinoco foi o fator ambiental sugerido pelos autores como barreira geográfica para a espécie. Porém, Sarver *et al.* (2000) descreveram geneticamente que três indivíduos encontrados na Florida e na Venezuela pertenciam a subespécie *Panulirus argus westonii* (atualmente *Panulirus meripurpuratus*) e atribuiu a ocorrência destes indivíduos, geralmente encontrados em águas brasileiras, a migração de longo duração ou fatores antropogênicos. Os motivos para a ocorrência de *Panulirus meripurpuratus* no Caribe e a comprovação de que a descarga Amazônica age como barreira para a sua distribuição nunca foram estudados.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é determinar a existência de conectividade entre a margem equatorial brasileira e a região do mar do Caribe. Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Determinar a existência e as escalas de tempo de conectividade entre a margem equatorial brasileira e a região do mar do Caribe;
- Determinar se o campo de salinidade adjacente a margem oeste do AT é uma barreira para a conectividade;
- Determinar se há um padrão sazonal de conectividade larval;
- Determinar a existência de diferenças interanuais na conectividade;
- Determinar a influência da profundidade em relação a salinidade na trajetória das larvas

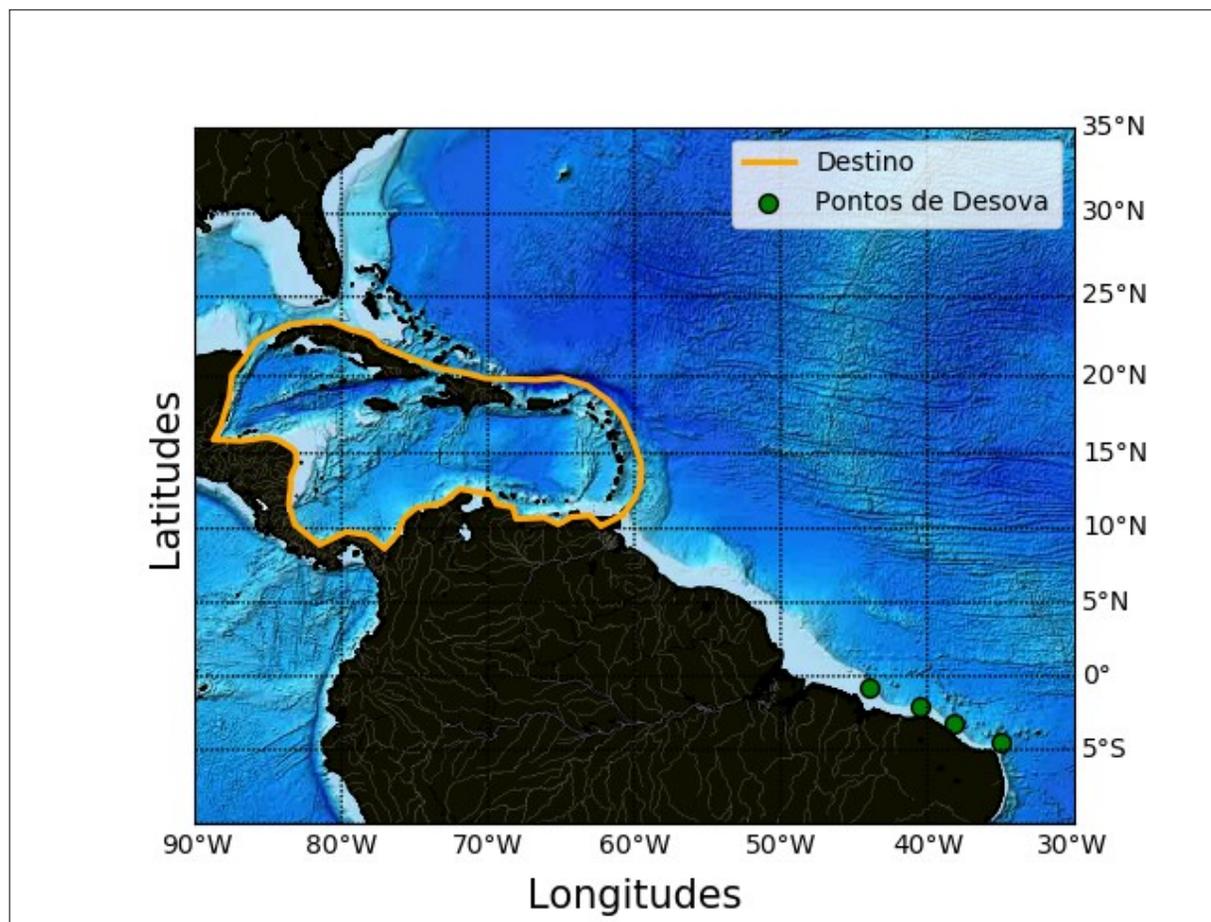
### 3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste na utilização das saídas de um modelo hidrodinâmico global que fornecem os campos de circulação da região de estudo e de um modelo MDBI que simulam a dispersão e ciclo de vida larval. Abaixo apresentamos detalhes da área de estudo, destes dois modelos e das simulações realizadas.

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho (Figura 1) abriga a região do AT com particular interesse na sua margem oeste. A seguir, faço uma breve caracterização da circulação de superfície que é crucial para compreensão dos resultados discutidos nas seções a frente.

Figura 1 – Mapa da área de estudo. O polígono laranja demarca a região considerada como destino das larvas no Caribe. Os pontos verde demarcam os pontos de liberação das larvas virtuais.



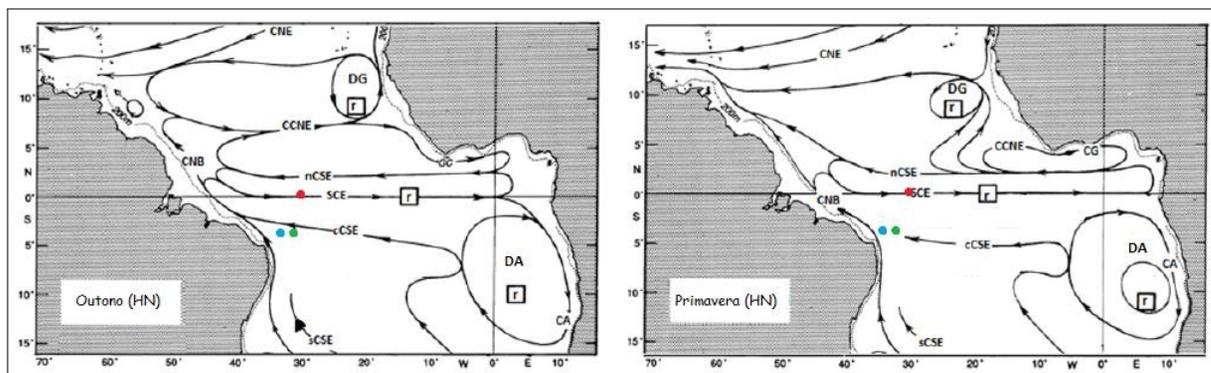
Fonte: o autor.

### 3.2 Circulação geral do Atlântico Tropical

Como dito anteriormente a advecção de larvas depende da circulação oceânica, nesta seção é feita uma pequena introdução sobre a circulação oceânica no oceano Atlântico Tropical.

Na camada superior do AT existe uma importante rede de correntes de transporte meridional e zonal localizada entre os giros subtropicais do Hemisfério Norte e do Hemisfério Sul (CASTELLANOS, 2015; LUMPKIN; GARZOLI, 2005) (Figura 2). O transporte zonal é regido por correntes superficiais e subsuperficiais com sentidos alternados latitudinalmente. Fluindo em direção a borda oeste do oceano AT temos a Corrente Sul Equatorial (CSE) e Corrente Norte Equatorial (CNE), que são os limites sul e norte deste sistema de correntes e que são formadas na borda leste deste oceano. Por outro lado, o transporte na direção ao continente africano fica a cargo da Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE) e da Subcorrente Corrente Equatorial (SCE).

Figura 2 – Principais correntes superficiais e subsuperficiais do Atlântico Tropical durante períodos de outono (quadro a esquerda) e primavera (quadro a direita) no hemisfério sul.



Fonte: Ribeiro (2017); Adaptado de Stramma e Schott (1999).

A CSE é dividida em três ramos: ramo sul (sCSE), ramo central (cCSE) e ramo norte (nCSE) (STRAMMA; SCHOTT, 1999). O nCSE e cCSE são separados pela SCE. Os ramos sul da corrente sul equatorial (sCSE) encontram a Margem Continental brasileira próximo de 15°S de latitude. Nessa região, o núcleo dessa corrente se divide em dois: um mais superficial, que se desloca para sul e dará origem a Corrente do Brasil (CB), e outro em subsuperfície que se dirige para norte e passa a ser denominado de Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) (STRAMMA; SCHOTT, 1999; URBANO et al., 2008).

No seu caminho para norte a SCNB passa a ser alimentada também pelo cCSE (STRAMMA; SCHOTT, 1999) e esse encontro gera dois núcleos de velocidade na direção noroeste um de superfície e outro de subsuperfície. À medida que ambos os núcleos rumam para

noroeste acompanhando a margem equatorial brasileira eles se aproximam e em seguida unem-se formando a CNB (SCHOTT *et al.*, 1998) que possui velocidades que variam entre 0,5-1,0 m s<sup>-1</sup>.

A CNB apresenta padrões sazonais em seu transporte e na manutenção da sua direção de fluxo (HOGG; JOHN, 1995; JOHNS *et al.*, 1990; FLAGG *et al.*, 1986; FIELD, 2005). Seu pico de transporte ocorre em meados de agosto e seu fluxo pode ser contínuo para noroeste (fevereiro - junho) ou sofrer uma retroflexão para leste entre 4°N e 10°N (julho - janeiro). Em seu fluxo a CNB transporta Água Tropical e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), além da água proveniente da pluma do Amazonas (MORAES, 2011).

### 3.3 Retroflexão da CNB

Na borda oeste do AT, entre 4°N e 10°N, encontra-se a área de retroflexão da CNB. O fluxo da CNB é alternado entre a sua continuidade em direção ao Caribe e a mudança de direção para leste, rumo ao continente africano. Após cruzar o equador, existe uma variação sazonal na intensidade da retroflexão da CNB. Essa sazonalidade apresenta diferenças entre as porções mais superficiais e de sub-superfície desta corrente.

A camada superficial da CNB retroflete mais ao norte, próximo de 7°N podendo chegar à 10°N, alimentando a CCNE (FLAGG *et al.*, 1986; SILVEIRA *et al.*, 2000). A camada de subsuperfície retroflete mais ao sul, por volta de 4°N, alimentando a SCNE (SILVEIRA *et al.*, 2000). Durante a maior parte do ano (julho - janeiro) a retroflexão da CNB é dominante sobre fluxo para noroeste. Entre fevereiro e junho o fluxo sobre o talude é mais intenso havendo uma maior continuidade da CNB na direção noroeste e a retroflexão encontra-se enfraquecida (JOHNS *et al.*, 1990). Já no período entre junho e janeiro a o fluxo contínuo da CNB perde força e ela retroflete para leste (FIELD, 2005).

### 3.4 Forçantes hidrodinâmicas

Foram testados dois modelos como base hidrodinâmica para o modelo de dispersão: o modelo HYCOM e o Mercator. Ambos são forçados por vazões climatológicas do Rio Amazonas, porém ambos assimilam dados de salinidade do oceano o que confere variabilidade inter-anual ao campo de salinidade da região oceânica adjacente a desembocadura do rio Amazonas.

Nas nossas comparações (não mostrado) o modelo Mercator representou melhor o campo de salinidade da região (Figuras 4 e 5), o que está em acordo com os resultados de Ribeiro

(2017a) que comparou a salinidade obtida de diferentes produtos de modelos globais amplamente utilizados com dados de satélite. O autor também concluiu que o modelo Mercator representou melhor as bandas de baixa salinidade associadas a pluma do Amazonas e sua variabilidade sazonal e interanual. Abaixo são apresentados maiores detalhes do modelo Mercator.

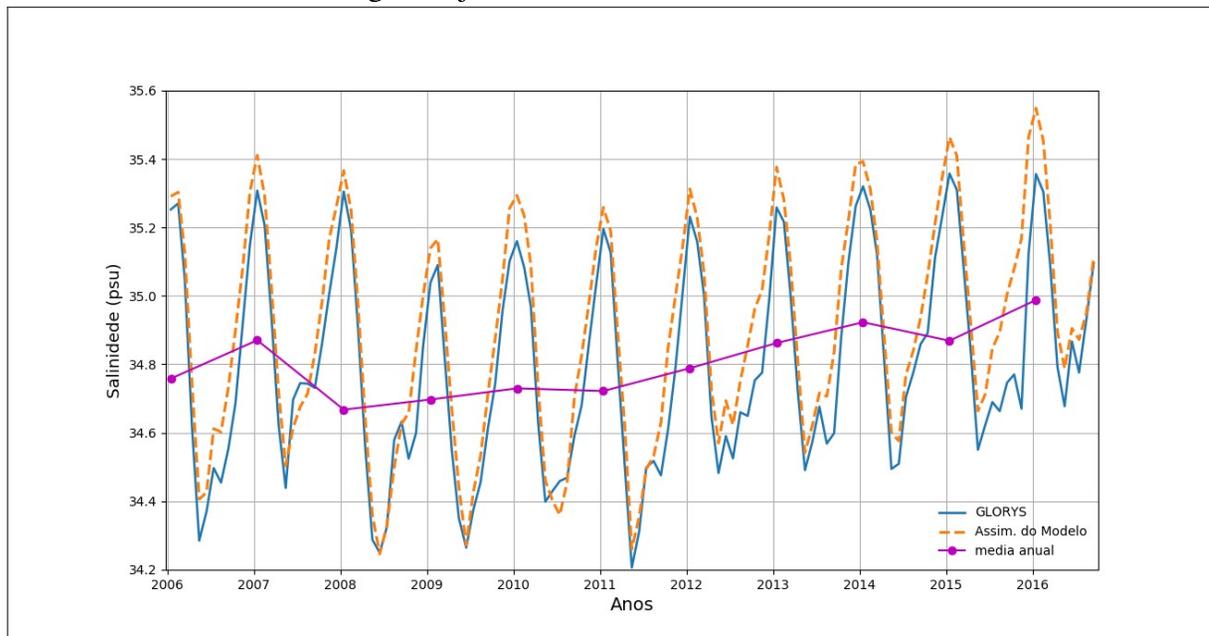
### 3.5 Global Model Analysis from Mercator Ocean

Os dados de entrada utilizados como forçantes nas simulações foram provenientes da saída referente a análise global “GLOBAL\_OCEAN\_ANALYSIS\_AND\_FORECAST\_PHY\_001\_024” (PSY4V3R1). O PSY4V3R1 é um produto de previsão global que utiliza o modelo hidrodinâmico NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) v3.1 em suas simulações. As simulações usam uma grade regular com resolução espacial de  $1/12^\circ$  e 50 níveis verticais. Esta resolução horizontal representa sobre o equador, em médias latitudes e regiões polares aproximadamente 9, 7 e 2 km, respectivamente (LELLOUCHE *et al.*, ). A batimetria utilizada é uma combinação da base de dados do ETOPO1 (AMANTE and EAKINS, 2009) e GEBCO8 (BECKER *et al.*, 2009). O produto tem saídas de 1 hora e atualização diária com alcance de 10 dias de previsão. As simulações contam com assimilação diária de TSM, altura do nível do mar, altura de onda, espessura /concentração de gelo e perfis de temperatura e salinidade (LELLOUCHE *et al.*, ). A assimilação é feita com base em dados coletados por boias de deriva, boias argos e imagens de satélite.

Para forçar o MBI Open Drift (DAGESTAD *et al.*, 2018) foram utilizados médias diárias de salinidade e das componentes meridional e zonal da velocidade referentes aos primeiros 21 níveis verticais. Os dados foram obtidos livremente em (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>) para os anos de 2009, 2010, 2016 e 2017 para a área do Atlântico Tropical limitada a norte em  $30^\circ\text{N}$  e a sul em  $10^\circ\text{S}$ .

A comparação entre a salinidade superficial do modelo Mercator com dados coletados pelo satélite Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) nos permite concluir que o modelo representa bem a distribuição de salinidade na margem Equatorial do AT e sua variabilidade inter-anual (Mapas das salinidades).

Figura 3 – Série temporal de salinidade do Modelo Global Mercator (GLORYS) e de dados observacionais (Assimilação do Modelo) para a área de estudo. A série compreendeu o período entre 2006 e 2017. Em linha em roxo representa as médias anuais da salinidade na margem adjacente a foz do Amazonas, obtidas do Mercator



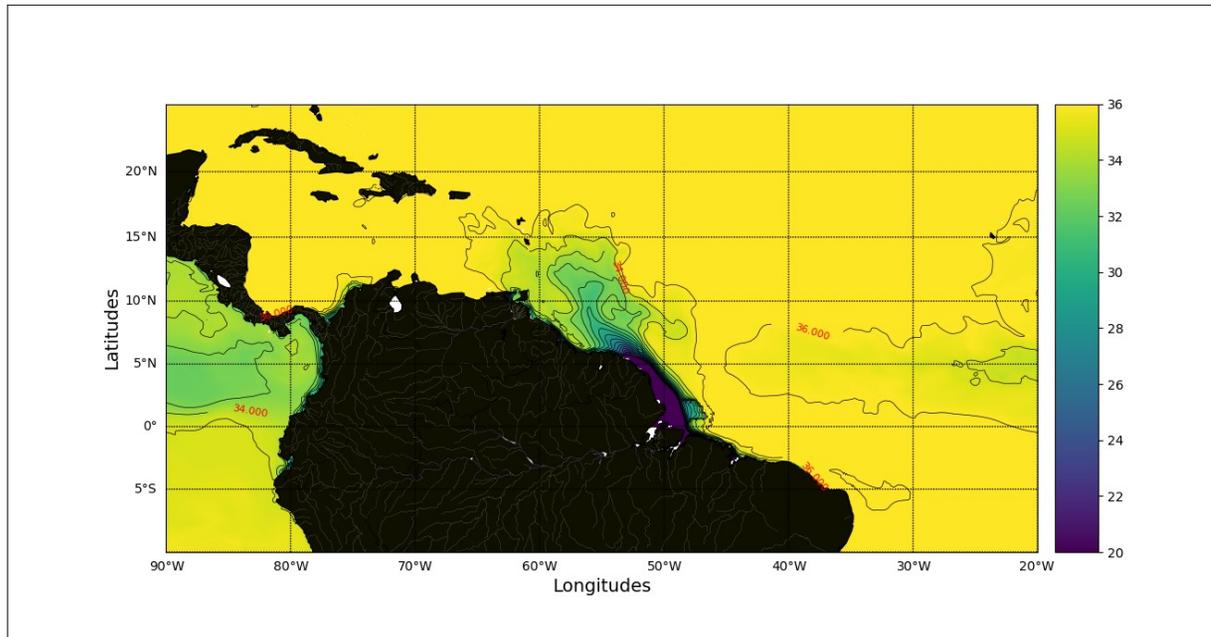
Fonte: o autor.

### 3.6 OpenDrift v1.0.3

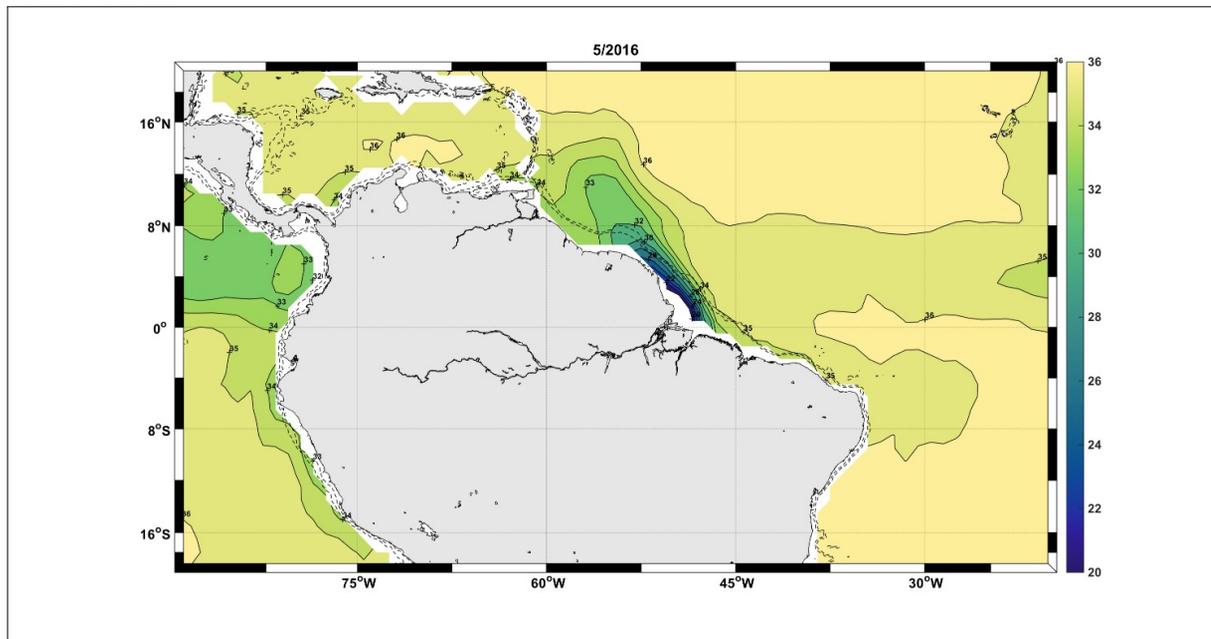
As simulações do comportamento larval foram feitas utilizando o modelo numérico de dispersão baseado no indivíduo (MBI) OpenDrift (DAGESTAD *et al.*, 2018) versão 1.0.3, com um passo de tempo de 3h. OpenDrift (DAGESTAD *et al.*, 2018) é um modelo de dispersão de código aberto, escrito em linguagem Python, e desenvolvido pelo Instituto Norueguês de Meteorologia. Foi projetado para a simulação do transporte de partículas de natureza lagrangiana, na atmosfera, no oceano e em ambientes aquáticos confinados (DAGESTAD *et al.*, 2018).

O OpenDrift (DAGESTAD *et al.*, 2018) apresenta um conjunto de módulos desenvolvidos afim de atender à diferentes especificidades quanto a natureza das partículas (óleo, ictioplâncton, sedimento, naufrago) que se deseja estudar. Neste trabalho o módulo implementado nas simulações foi uma variação do módulo PelaficcEgg original do próprio modelo, em sua versão 3D. O mecanismo de transporte vertical implementado foi baseado apenas no deslocamento vertical promovido pelo fluxo turbulento, semelhante ao utilizado por Röhrs J e Broström (2014). O modelo de advecção utilizado foi Runge-Kutta. Devido à natureza das partículas e por tratar-se da dispersão em oceano profundo a advecção promovida pelo arraste do

Figura 4 – Distribuição espacial da salinidade de dados do modelo Mercator (superior) e do satélite SMOS (inferior) do mês de maio para o ano de 2016. A barra de cores, as abscissas e as ordenadas representam a salinidade, longitudes e latitudes, respectivamente, em todas imagens. A linhas de contorno indicam as isoalinas



Fonte: o autor.



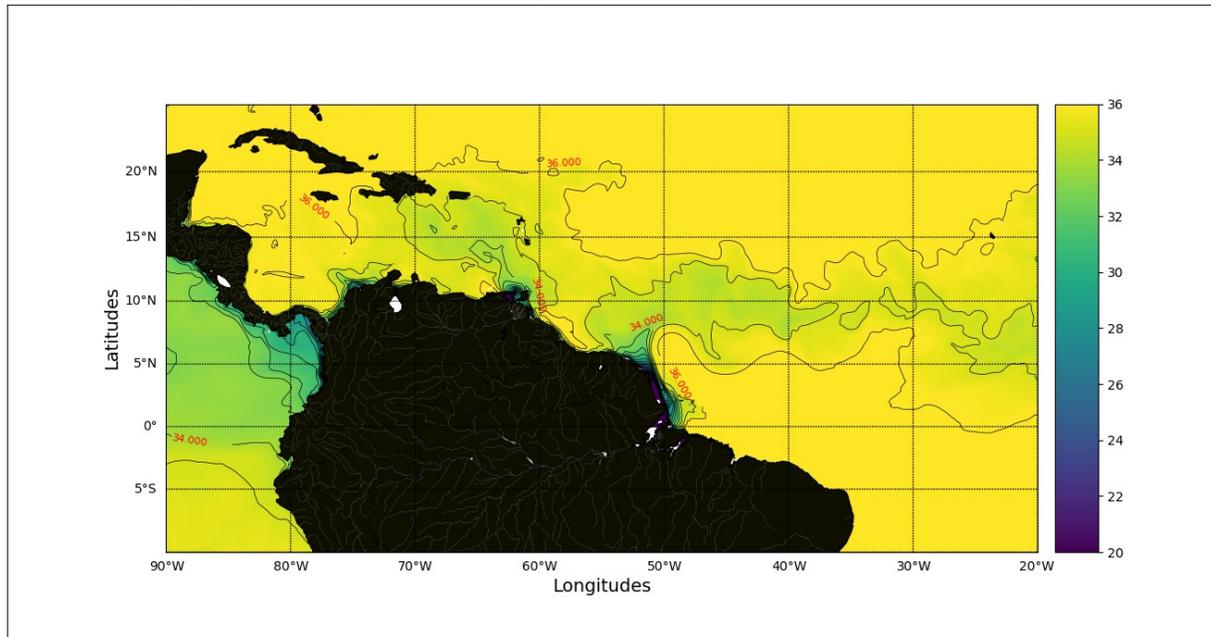
Fonte: Carlos Teixeira.

vento e por ondas não foram habilitadas.

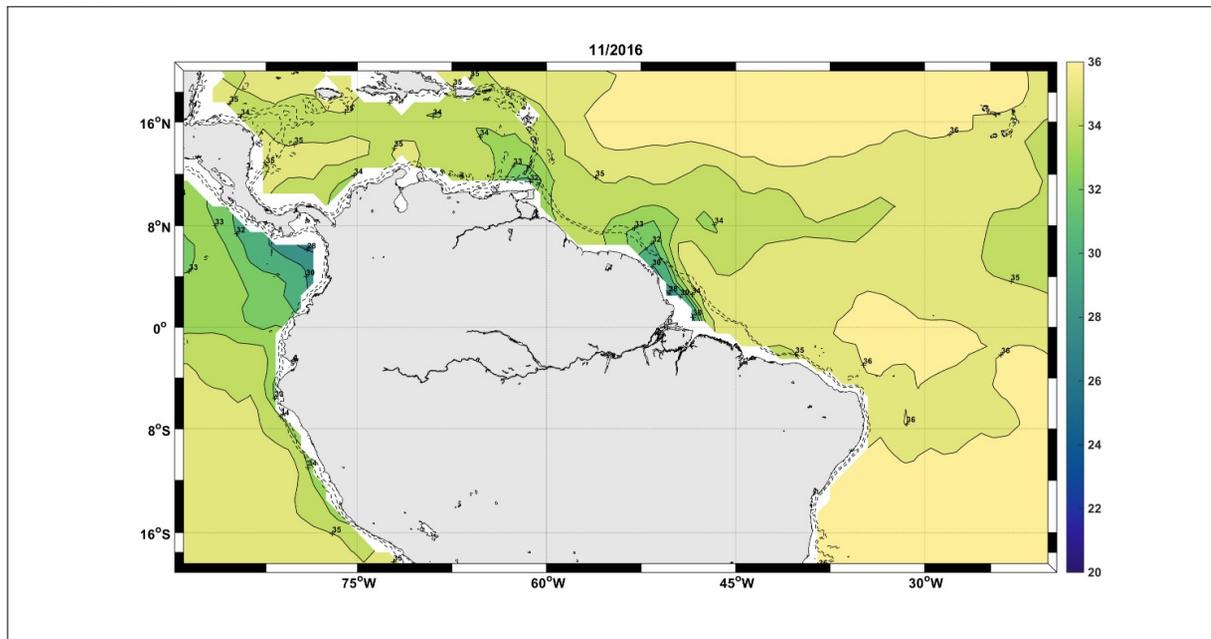
### 3.7 Simulações

Para representar a dispersão das larvas no AT foram introduzidas partículas em quatro pontos centrados sobre a quebra da Plataforma Continental Norte-nordeste do Brasil

Figura 5 – Distribuição espacial da salinidade de dados do modelo Mercator (superior) e do satélite SMOS (inferior) do mês de novembro para o ano de 2016. A barra de cores, as abcissas e as ordenadas representam a salinidade, longitudes e latitudes, respectivamente, em todas imagens. A linhas de contorno indicam as isoalinas



Fonte: o autor.



Fonte: Carlos Teixeira.

(figura 1) a uma profundidade de 20 metros. Cada ponto de lançamento corresponde a uma circunferência, com raio de 4.0 km, no interior da qual as partículas (larvas) são inseridas e distribuídas espacialmente de maneira aleatória.

As simulações foram realizadas para os anos 2009 e 2016 e em cada ano foram lançadas 2 mil partículas por ponto, distribuídas linearmente ao longo do tempo, totalizando 8

mil partículas por ano de lançamento. A trajetória de cada partícula foi então acompanhada por 575 dias de simulação.

A escolha dos anos 2009 e 2016 deve-se por estes representarem extremos quanto as médias anuais de salinidade do últimos dez anos na margem oeste do AT sob influência da foz do Amazonas (figura 3) Os dados utilizados para análise dessa série foram extraídos do produto de Reanálise do Mercator Ocean (GLORYS\_V4). A série em questão compreendeu os anos de 2007 a 2017. Os anos de 2009 e 2008 apresentaram as menores médias anuais de salinidade para a área de atuação da pluma do Amazonas tanto para as saídas da Reanálise quanto para a assimilação. O ano de 2009 foi escolhido em detrimento de 2008 devido à disponibilidade dos dados. O ano de 2016 obteve a maior média anual de salinidade também para ambos os parâmetros.

Apesar dos lançamentos das partículas terem sido restritos aos anos de 2009 e 2016 as simulações englobaram parte dos anos de 2010 e 2017. Isso decorre do fato das simulações terem sido programadas para durar tanto quanto houvesse partículas ativas. Devido a distribuição linear das partículas em relação ao tempo, ao longo de cada ano de lançamento, foram lançadas partículas no último dia de cada ano. Cada partícula foi programada para ter um período de vida máximo de 210 dias, portanto as simulações poderiam durar até 210 dias além do ano de lançamento. Por exemplo, as simulações para o ano de 2009 podem ter duração máxima de um ano (referente à 2009) mais 210 dias (referente à 2010).

O deslocamento horizontal das partículas deu-se em função dos vetores de velocidade obtidos a partir dos modelos globais e um valor randômico, comumente empregado em modelos de dispersão. As componentes de velocidade e salinidade introduzidas foram interpoladas para dentro de um grid produzido no próprio modelo. O deslocamento vertical das partículas foi configurado com o intuito de melhor representar o deslocamento nictemeral das larvas. Ribeiro (2017b) afirma que as larvas se deslocam para menores profundidade durante a noite e maiores durante o dia, podendo ultrapassar 100m. Assim as velocidade verticais das larvas baseadas apenas no fluxo turbulento e mistura mediante método empregado por Röhrs J e Broström (2014). Para investigar o efeito da salinidade sobre a conectividade da região, as simulações foram configuradas com um valor de salinidade letal para as larvas.

Foram realizados quatro tipos de simulação: um sem mortalidade devido a salinidade e três com salinidade letal que diferiram apenas quanto ao valor de salinidade letal empregado. A importância da advecção para a conectividade das regiões foi analisada através das simulações

sem salinidade letal (SSL). Já a eficiência do campo de salinidade como barreiras no trajeto das larvas até o Caribe foi avaliada através das simulações com salinidade letal através da taxa de mortalidade.

Os valores utilizados como salinidade letal foram 32, 33 e 34, isto é, no caso do experimento com salinidade 32 todas as larvas que encontrarem valores de salinidade menores do que 32 morrem, para o experimento 33 valores menores que 33 e assim sucessivamente. A partir deste ponto do documento as simulações serão referidas com base no ano de lançamento e valor de salinidade letal utilizado, S32, S33 e S34. A exemplo, a simulação para o ano de 2016 configurada com salinidade letal de 33 psu será aqui referida como 2016\_S33. Os limites quanto a tolerância in situ a baixas salinidades das larvas das *P. argus* e *P. meripurpuratus* são desconhecidos. A escolha de diferentes valores de salinidade deriva desta lacuna de conhecimento acerca dos limites de tolerância de larvas de lagosta espinhosa quanto a salinidade. Vale lembrar que devido ao complexo ciclo larval, constando de vários estágios até a fase puerulus, a tolerância as condições do meio podem variar significativamente durante a DLP. Experimentos realizados em laboratório com a lagosta *P. argus* sugerem que valores de salinidade superiores a 33.0 psu são confortáveis para todos os estágios larvais (GOLDSTEIN et al., 2008). No ambiente natural a resposta das larvas pode distar da obtida através de experimentos controlados. Baseado nisso foram escolhidos os valores de salinidade letal apresentados.

A interação das partículas com a costa foi configurada de modo que esta atuasse como uma barreira, porém incapaz de aprisionar ou desativar qualquer partícula. Assim, uma partícula que entre em contato com a costa prossegue sua trajetória, podendo ao longo da simulação interagir com o litoral sucessivas vezes. As partículas foram ainda programadas para serem desativadas sob duas circunstâncias. A primeira: ao atingirem a idade de 210 dias, a contar da data de lançamento da respectiva partícula. A segunda: ao cruzar um ponto de grade cuja salinidade seja menor ou igual à salinidade letal determinada para cada tipo de simulação. Características referentes ao comportamento biológico larval tais como taxa de crescimento não foram inseridas nas simulações.

### **3.8 Análise dos dados de saída do modelo**

Foi criado um polígono para identificar as larvas que chegaram até o Caribe (Figura 1). Por conveniência, para análise dos dados provenientes das simulações foram criadas duas taxas, a taxa de conectividade e a taxa de mortalidade. A taxa de conectividade é aqui estabelecida

como a razão entre o número de larvas que chegam até o Caribe e o total de larvas lançadas. A taxa de mortalidade diz respeito ao número de larvas que mortas devido à salinidade dividido pelo número total de larva lançadas na simulação.

Considerou-se como partículas que chegaram ao Caribe aquelas que adentraram o polígono apresentado na Figura 1, ainda que tenham sido desativas mediante salinidade letal após entrar na área do polígono.

## 4 RESULTADOS

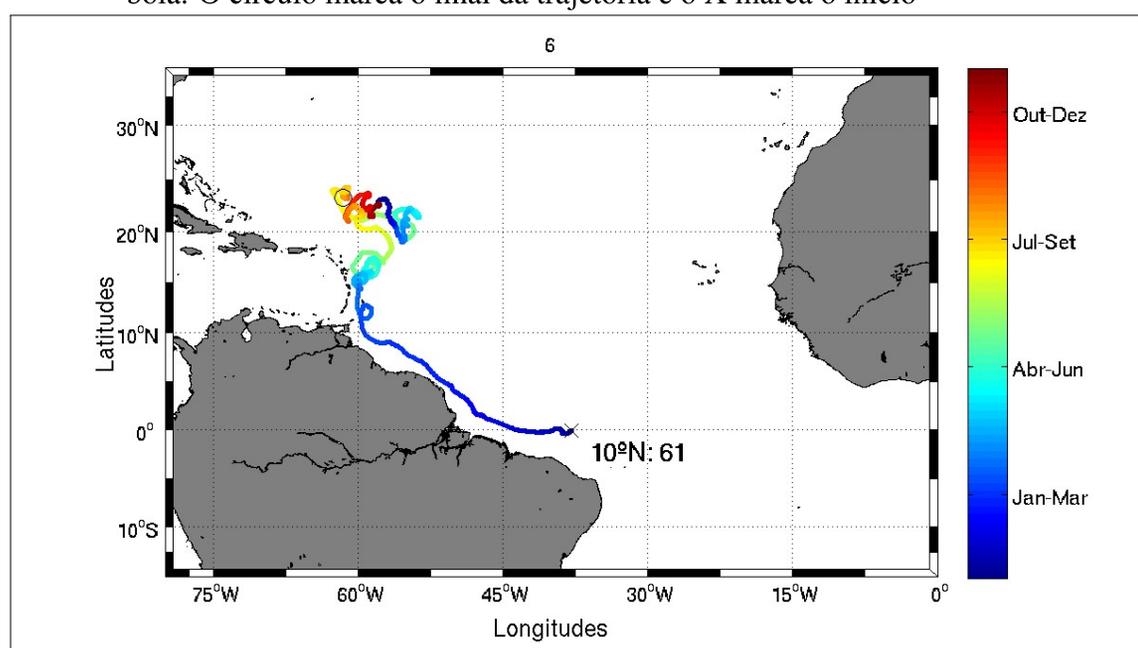
Serão apresentados primeiro apenas os resultados referentes as simulações com deslocamento vertical das larvas habilitado. Esse resultados serão apresentados para os valores de conectividade e sua sazonalidade e para as mortalidade devido à salinidade e sua sazonalidade. Em seguida (seção 4.5) serão apresentados os resultado para as simulações com deslocamento vertical desabilitado e apenas relativos às taxas de mortalidade.

### 4.1 Conectividade entre a PCNNB e o Caribe

#### 4.1.1 Boias de Deriva

Através da análise das trajetórias de 405 boias de deriva que passaram pela região da PCNNB, pode-se afirmar que existe conectividade advectiva entre a região da PCNNB e a região do Caribe. O menor período de conectividade foi 61 dias para um boia liberada na região oceânica na frente do estado do Ceará (Figura 6).

Figura 6 – Boia de deriva lançada na PCNNB que apresentou trajetória mais rápida entre a PCNNB e o Caribe. O período necessário para esta boia ultrapassar a latitude de 10°N foi de 61 dias. A barra de cores indica o período do ano durante a trajetória da boia. O círculo marca o final da trajetória e o X marca o início



Fonte: o autor.

A análise das boias permitiu identificar três tipos predominantes de trajetórias marcados pela sazonalidade da circulação. O primeiro tipo, mais frequentes no primeiro semestre, são

as trajetórias que seguem da PCNNB, percorrendo toda a plataforma brasileira e continuando seguindo na direção noroeste em direção ao Caribe (Figura 7). Em média, as trajetórias do tipo 1 são mais rápidas e levam 95 dias para chegar a latitude de 10°N.

O segundo tipo, que domina as trajetórias das boias no segundo semestre, são as trajetórias que migram para leste ou sudeste na região entre 4° e 7° N, seguindo em direção à África e não chegam ao Caribe (Figura 7). Foi possível identificar ainda um terceiro tipo de trajetória que corresponde aquelas que seguem para norte realizando trajetórias circulares (Figura 8) carregadas por vórtices. As trajetórias do tipo 3, são em geral as mais longas e levaram um mínimo de 113 dias para chegar até o Caribe.

#### 4.1.2 Modelo

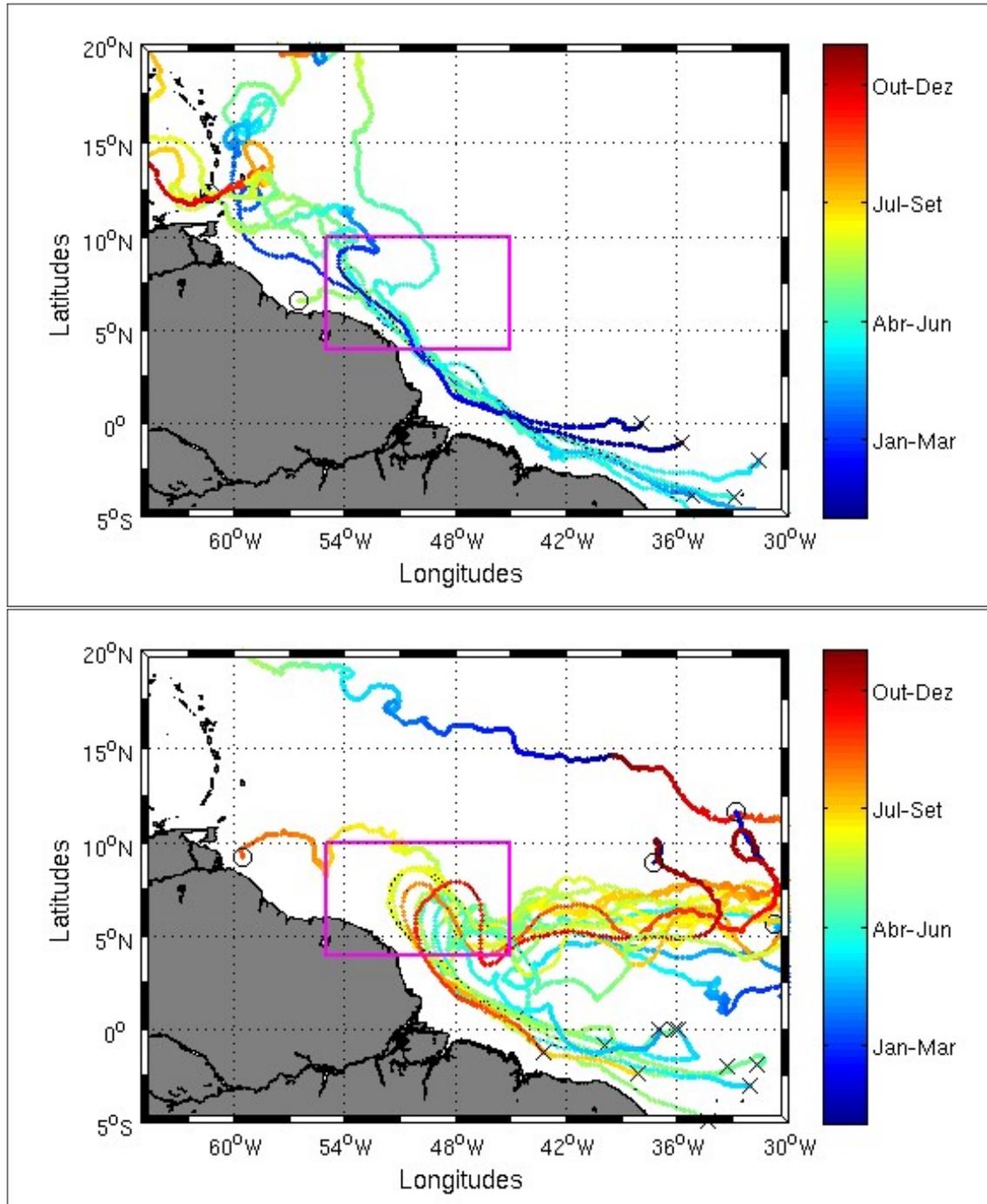
Nesta seção apenas as simulações com migração vertical habilitada foram utilizadas para estimar a conectividade. Neste tipo de migração as larvas são transportadas verticalmente seguindo os fluxos turbulentos e mistura vertical (RöHRS J; BROSTRÖM, 2014). As simulações com deslocamento vertical desabilitado foram usadas apenas para examinar efeitos das variações de profundidade sobre a mortalidade das larvas serão apresentadas na seção 4.5. Em todos os experimentos realizados, independente da salinidade letal ou do ano de simulação, houve conexão entre a PCNNB e o Caribe (Figuras 9 e 10 e tabela 1). Nos experimentos com salinidade letal habilitada, a conexão foi reduzida com o aumento do valor da salinidade letal empregada em cada experimento, ou seja, os experimentos S34 (onde as larvas morrem quando se deparam com salinidades menores que 34) obtiveram menor conectividade e os experimentos S32 (onde as larvas morrem quando se deparam com salinidades menores que 32) maior.

A conectividade máxima foi próxima a 6% no experimento S32\_2016 para o ano de 2016 e com salinidade letal 32. A conectividade mínima foi próxima a 0.75%, no experimento S34\_2016 com salinidade letal 34 para o ano 2016. As diferenças interanuais serão discutidas na seção 5.3.

Os experimentos sem salinidade letal (SSL) (larvas não morrem devido a fatores ambientais) (tabela 1) promoveram conectividade elevada, acima de 50%, para ambos os anos de simulação. A tabela 1 apresenta o número total e relativo de larvas que chegaram até o Caribe para todas as simulações com deslocamento vertical habilitado.

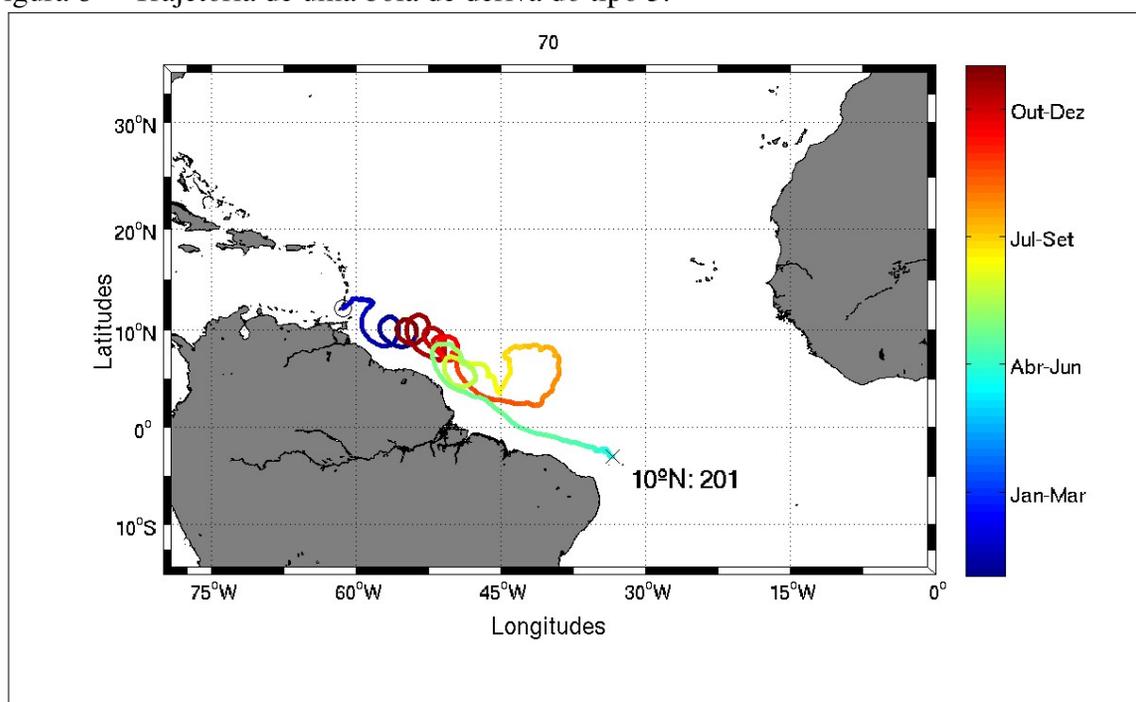
Nos experimentos SSL, o tempo necessário para que as larvas chegassem até o Caribe partindo da desova ficou concentrado entre 90 e 120 dias, para ambos os anos (figura 11).

Figura 7 – Trajetórias das boias de deriva. A de cima para baixo estão as trajetórias do tipo 1 e 2, respectivamente. A barra de cores indicada o período do ano ao longo da trajetória da boia.



Fonte: o autor.

Figura 8 – Trajetória de uma boia de deriva do tipo 3.



Fonte: o autor.

Tabela 1 – Número total e relativo das larvas que chegaram no Caribe por simulação para ambos os de 2009 e 2016. Em cada simulação foram liberadas um total de 8000 larvas.

Anos	2009		2016		
	Simulação	Valor abs	%	Valor abs	%
S 32		467	5.83	486	6.07
S 33		293	3.66	253	3.16
S 34		163	1.28	61	0.76
SSL		4036	50.45	4552	56.9

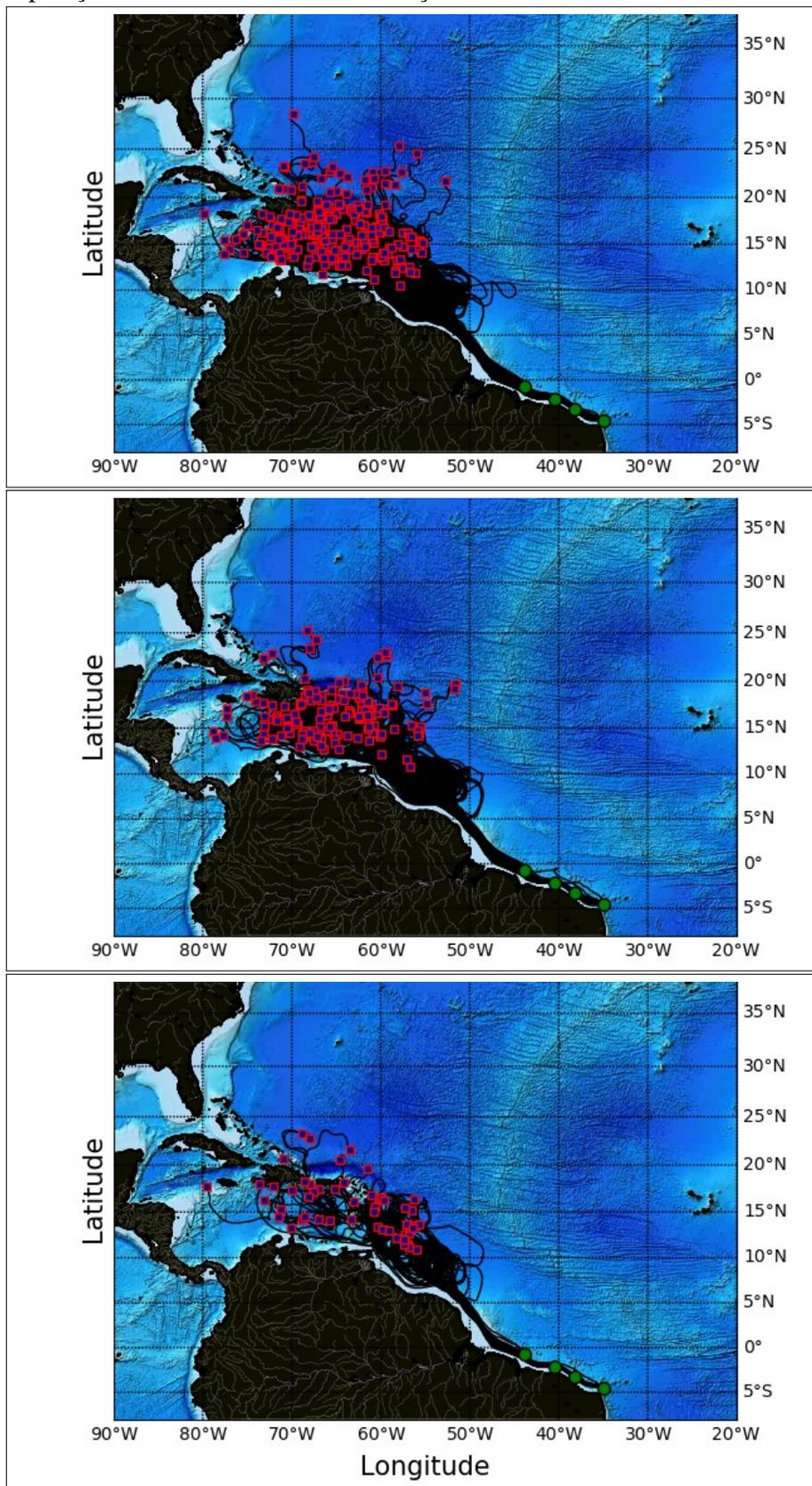
Fonte: o autor.

Não houve conexão abaixo de 56 dias para as larvas no experimento SSL.

#### 4.2 Sazonalidade da conectividade

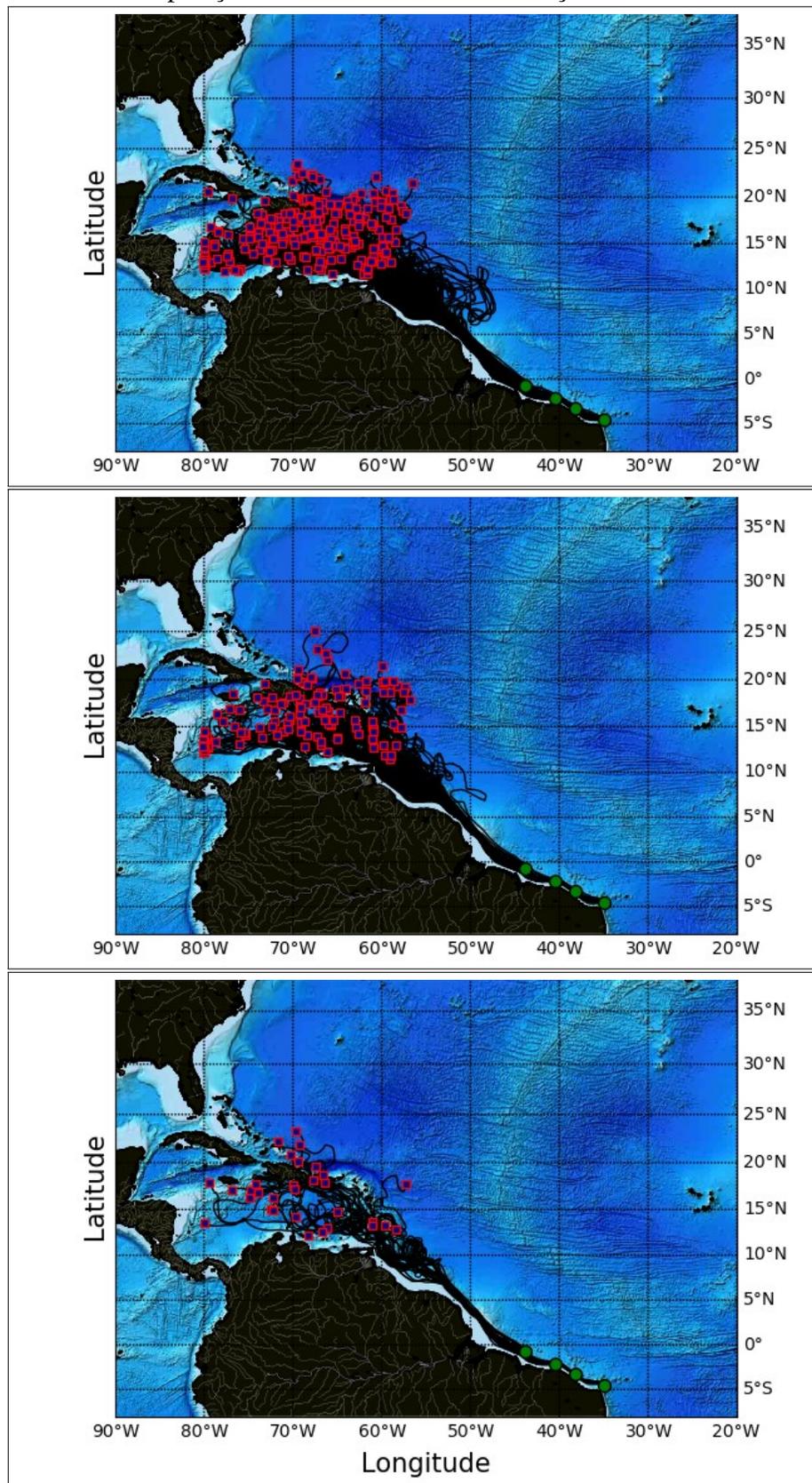
Houve uma assinatura sazonal bem definida no período de desova que apresentam conectividade. De forma geral em ambos os anos a conectividade foi maior para liberações de larvas (desovas) que ocorrem no segundo semestre (Figura 12). Para desovas ocorridas no período entre fevereiro e agosto a conectividade é aproximadamente nula para todos os cenários simulados. De maneira geral, desovas ocorridas no trimestre de outubro a Dezembro promoveram maior conectividade, com exceção do experimento S34\_2016 no qual o período Novembro a Janeiro obteve as maiores taxas de conectividade.

Figura 9 – Mapas apresentando a trajetória das larvas que chegaram até o Caribe para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2009. Os pontos verdes os pontos de liberação das larvas, as linhas pretas sua trajetória e os quadrados vermelhos a posição da larva ao final da simulação.



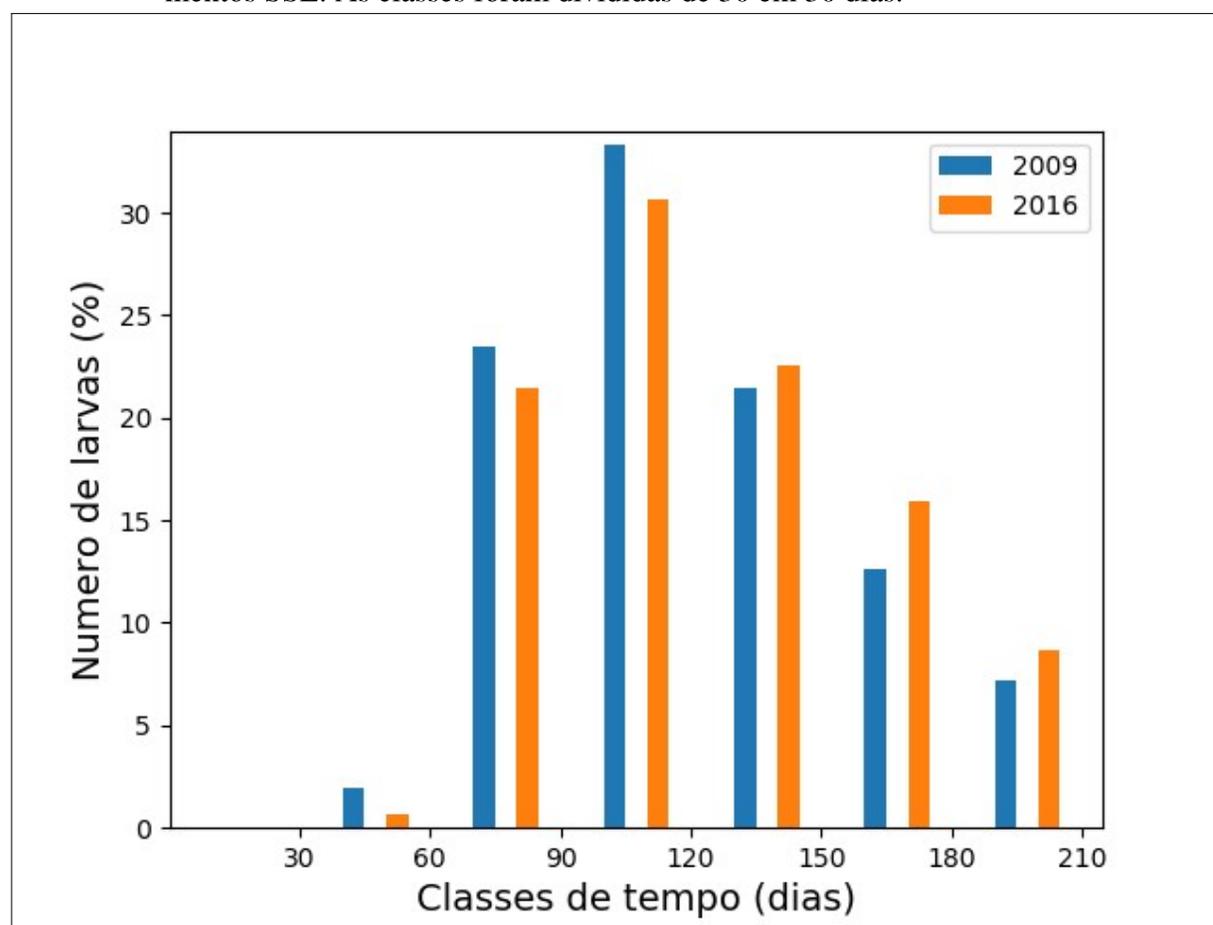
Fonte: o autor.

Figura 10 – Mapas apresentando a trajetória das larvas que chegaram até o Caribe para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2016. Os pontos verdes os pontos de liberação das larvas, as linhas pretas sua trajetória e os quadrados vermelhos a posição da larva ao final da simulação.



Fonte: o autor.

Figura 11 – Histograma do tempo de chegada das larvas, dividido em classes, para os experimentos SSL. As classes foram divididas de 30 em 30 dias.



Fonte: o autor.

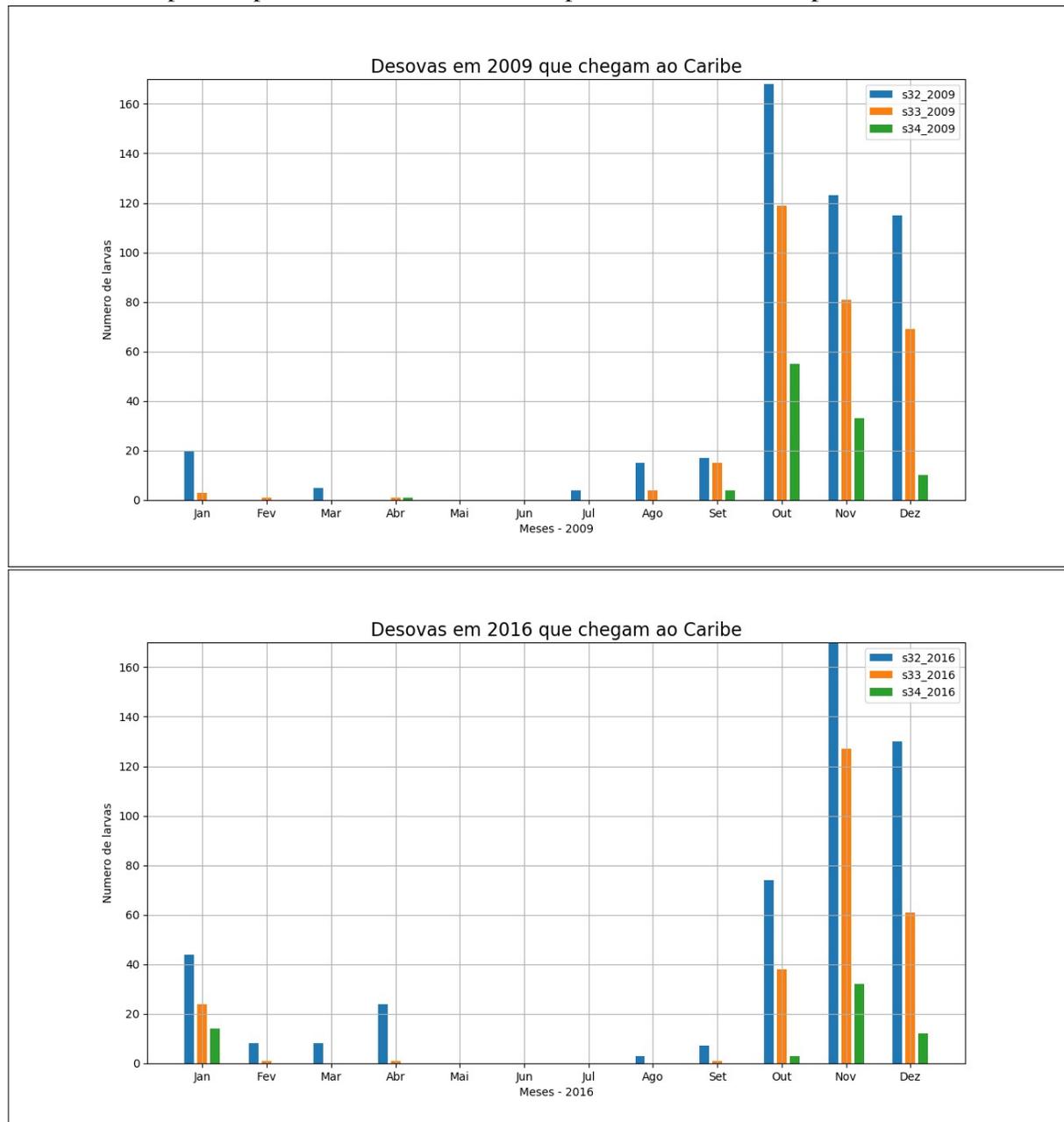
Em 2009, as desovas realizadas no trimestre Out-Dez responderam por aproximadamente 84%, 92% e 95% do total de larvas que chegaram ao Caribe para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente. Em contrapartida, o trimestre de Abr-Jun apresentou conexão nula em quase todas as simulações, salvo no experimento 2009\_S32, cuja conexão foi de 0,86%.

Em 2016, semelhante a 2009, o último trimestre dominou a conexão nos experimentos 2016\_S32 e 2016\_S33, respondendo por aproximadamente 81% e 89% do total de larvas que chegam ao Caribe. No ano de 2016 o mês de janeiro apresentou maior conectividade quando comparado a 2009. Como resultado a maior conectividade no experimento 2016\_S34 ocorreu no trimestre Nov-Jan, respondendo por 95 % das larvas que chegam ao Caribe, contra 77 % para o período de Out-Dez.

A distribuição dos períodos de chegada das larvas ao Caribe foi bimodal para as simulações SSL (Figura 13). Houve um pico no período entre fevereiro e maio e outro entre julho e agosto.

Já para as simulações com salinidade letal, o período de chegada das larvas ao Caribe

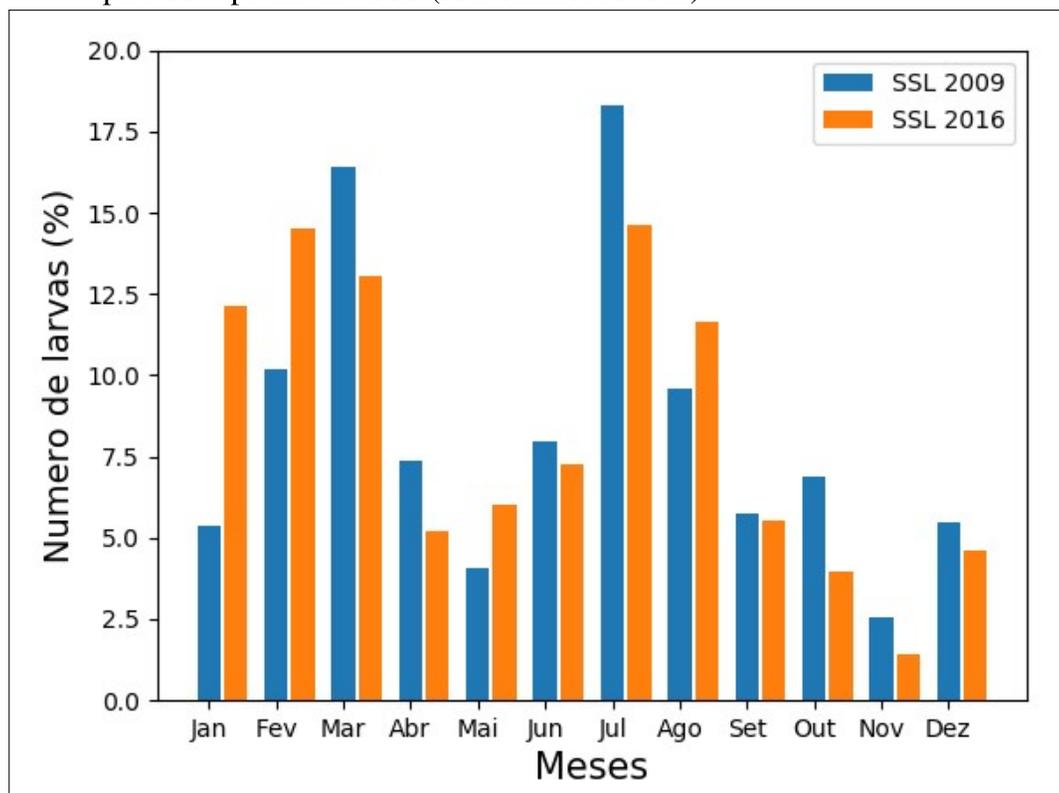
Figura 12 – Distribuição do período mensal de lançamento das larvas que apresentaram conectividade para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde). A figura superior apresenta as médias mensais para 2009 e a inferior para 2016



Fonte: o autor.

(Figura 14) ficou praticamente restrito ao primeiro semestre do ano. Em relação a chegada das larvas a conectividade ficou concentrada no primeiro trimestre (Jan-Mar) para ambos os anos, 2009 e 2016.

Figura 13 – Distribuição mensal do período de chegada das larvas ao Caribe (em porcentagem) para os experimento SSL (sem salinidade letal)



Fonte: o autor.

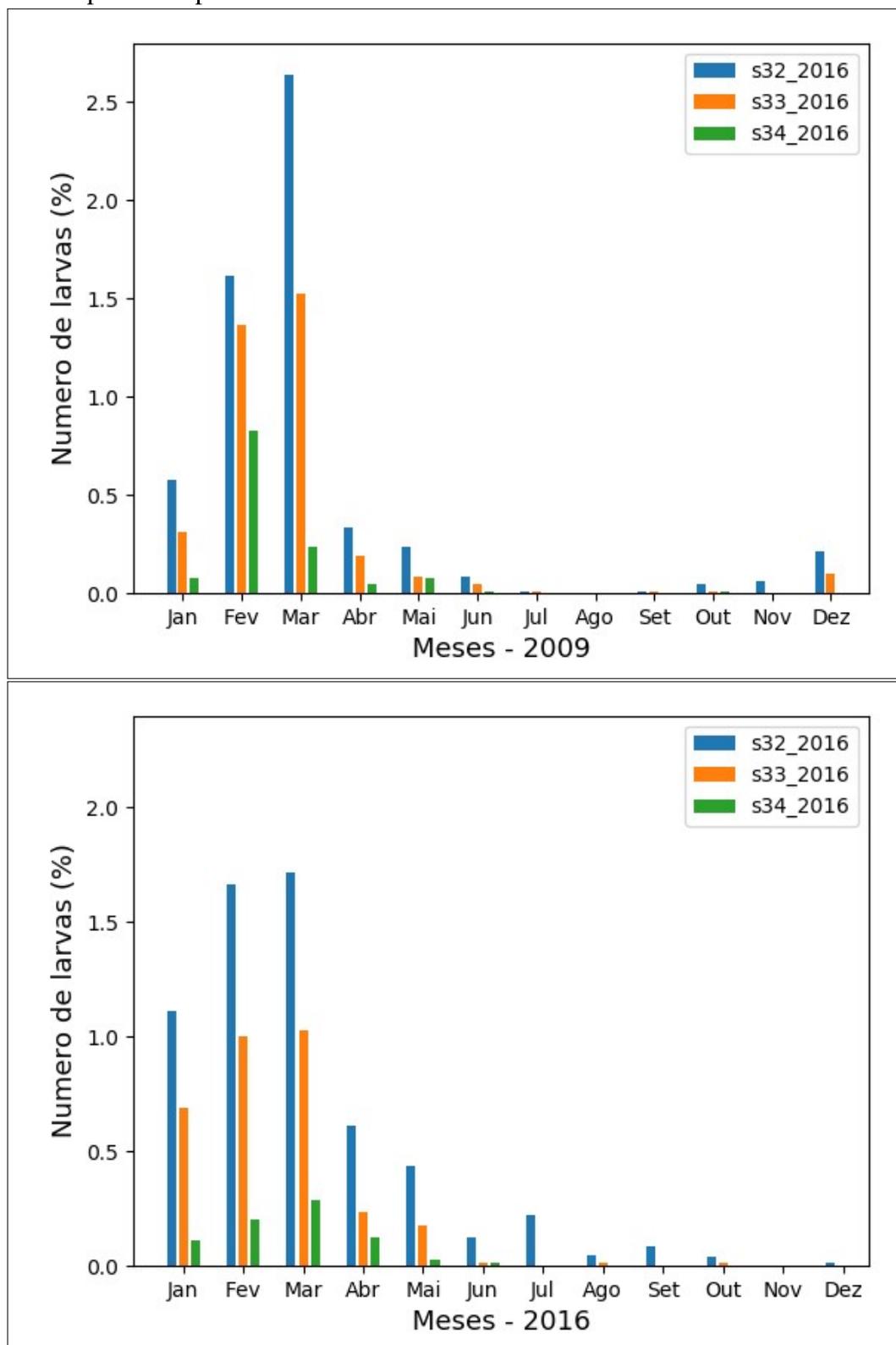
### 4.3 Mortalidade das larvas

Nesta seção as mortes devido à salinidade foram analisadas apenas para os experimentos com deslocamento vertical habilitado. O percentual de mortalidade para cada experimento foi calculada dividindo-se o número total de larvas lançadas no experimento (8.000) pelo número de larvas mortas devido à salinidade.

De forma geral a taxa de mortalidade foi maior nos experimentos configurados com maior salinidade letal. (Tabela 2). Mais de 95 por cento das larvas liberadas morrem devido a salinidade menores que 34, quando o valor letal é mudado para 32, existe um diminuição de aproximadamente 20 por cento no número de mortes. As taxas de mortalidade foram maiores em 2016 e menores em 2009 para todas as salinidades letais testadas.

De maneira geral, a morte das larvas ficou concentrada na região adjacente a foz do

Figura 14 – Distribuição mensal do período de chegada das larvas ao Caribe (em porcentagem) para os experimento com salinidade letal



Fonte: o autor.

Amazonas e sob influência da pluma proveniente da descarga fluvial do Rio Amazonas (figuras 14 e 15). A região de ocorrência das mortes devido à salinidade foi mais restrita nas simulações

Tabela 2 – Mortes totais devido à salinidade para cada simulação com deslocamento vertical habilitado. S32, S33 e S34 refere-se as simulações com salinidades letais 32, 33 e 34, respectivamente

Anos	2009		2016	
Simulação	Valor abs	%	Valor abs	%
S 32	6171	77.14	6323	79.04
S 33	6933	86.66	7051	88.14
S 34	7612	95.15	7632	95.40

Fonte: o autor.

configuradas com menor salinidade letal.

Nos experimentos com deslocamento vertical habilitado, houve diminuição da profundidade média de morte das larvas com aumento da salinidade letal. Essa diminuição pode ser notada em ambos os anos. As simulações com salinidade letal 32 (S32\_2009 e S32\_2016) obtiveram a maior profundidade média de mortalidade, abaixo de 20 m. Já as simulações com salinidade letal 34 (S34\_2009 e S34\_2016) as larvas morreram em média a 17 m de profundidades. A média total da profundidade de mortalidade nesses experimentos foi 18,63m.

Tabela 3 – Profundidade média (m) das mortes por salinidade para as simulações com deslocamento vertical habilitado. A profundidade é zero em superfície e assume valores negativos em direção ao fundo.

Simu - Anos	2009	2016
S 32	-20.25	-20.07
S 33	-18.61	-18.92
S 34	-16.93	-17.04

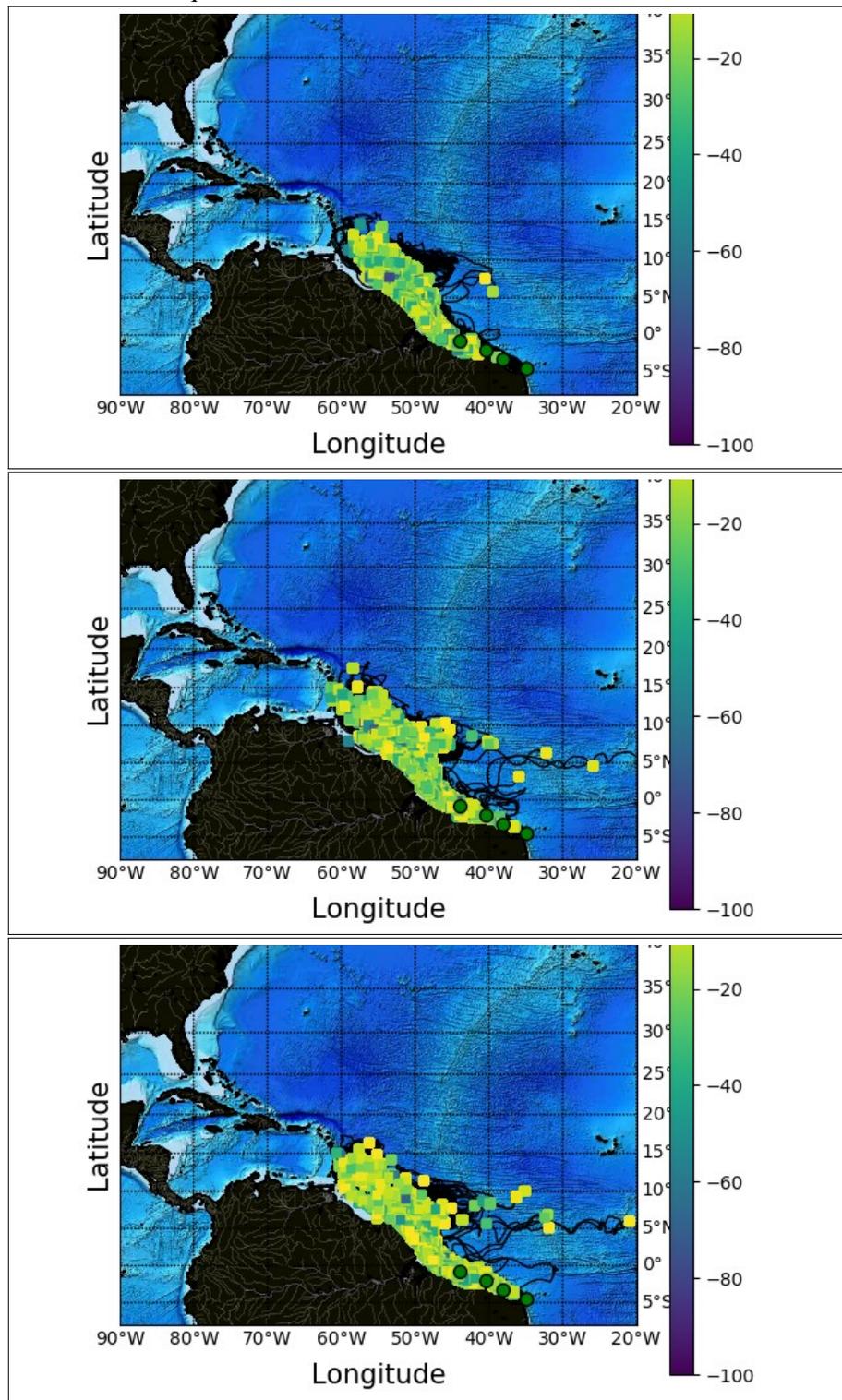
Fonte: o autor.

#### 4.4 Sazonalidade das mortes devido à salinidade

As mortes das larvas devido à salinidade foram analisadas de duas formas, em relação ao período de desova (ou liberação das larvas no modelo) (Figura 16) e ao período da morte das larvas (Figura 17) devido à salinidade. A análise das mortes devido à salinidade em relação ao período da desova tem a finalidade de determinar os períodos de desova mais ou menos influenciados pela baixa salinidade gerada pela pluma do Amazonas.

Observa-se que existe variação sazonal no período de morte das larvas (figura 17) com um número maior de mortes ocorrendo no primeiro semestre em todos os experimentos. A

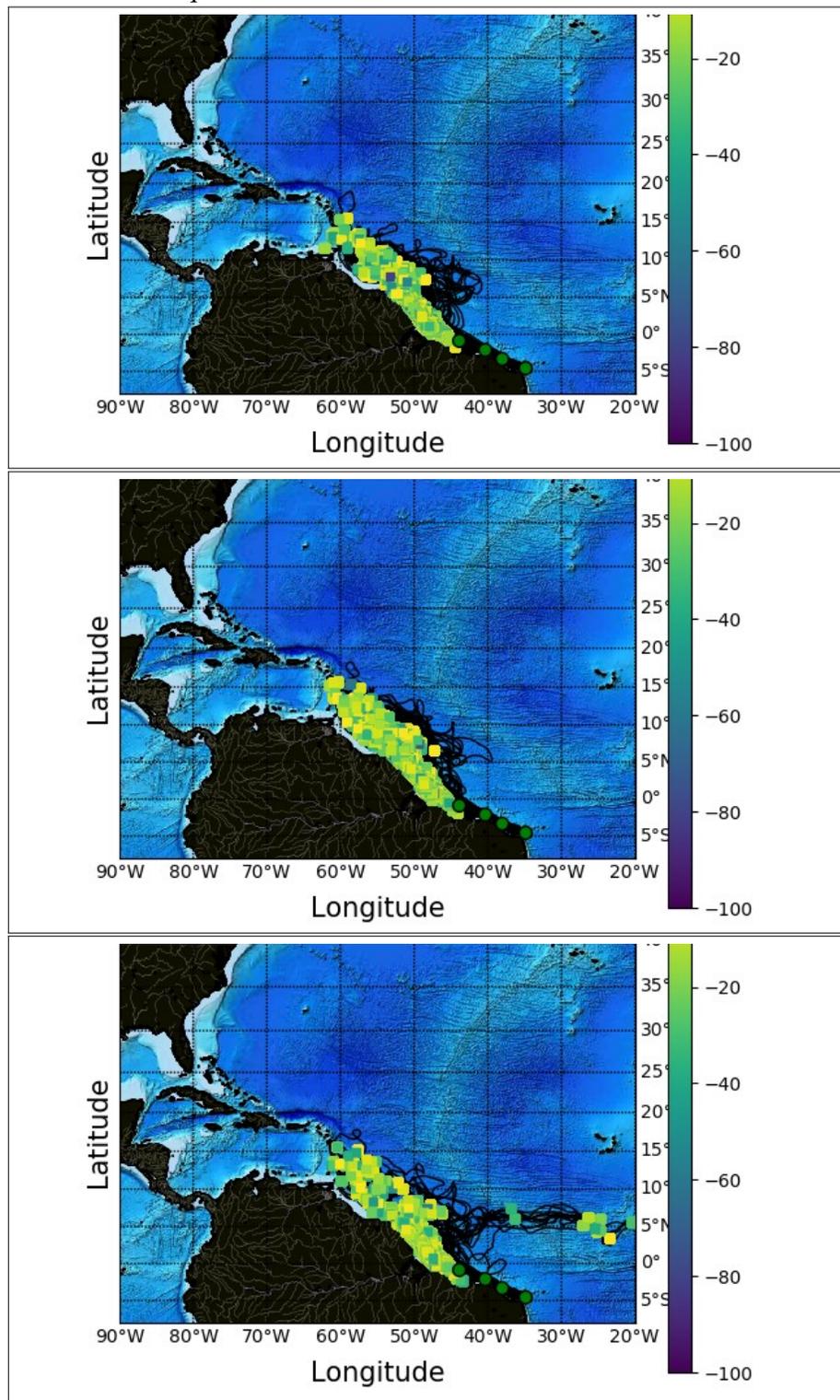
Figura 15 – Mapas apresentando a trajetória das larvas (linhas pretas) e posição (quadrados) de letalidade devido a salinidade para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2009. A barra de cor denota a profundidade onde ocorreu a morte da larva referente aos quadrados.



Fonte: o autor.

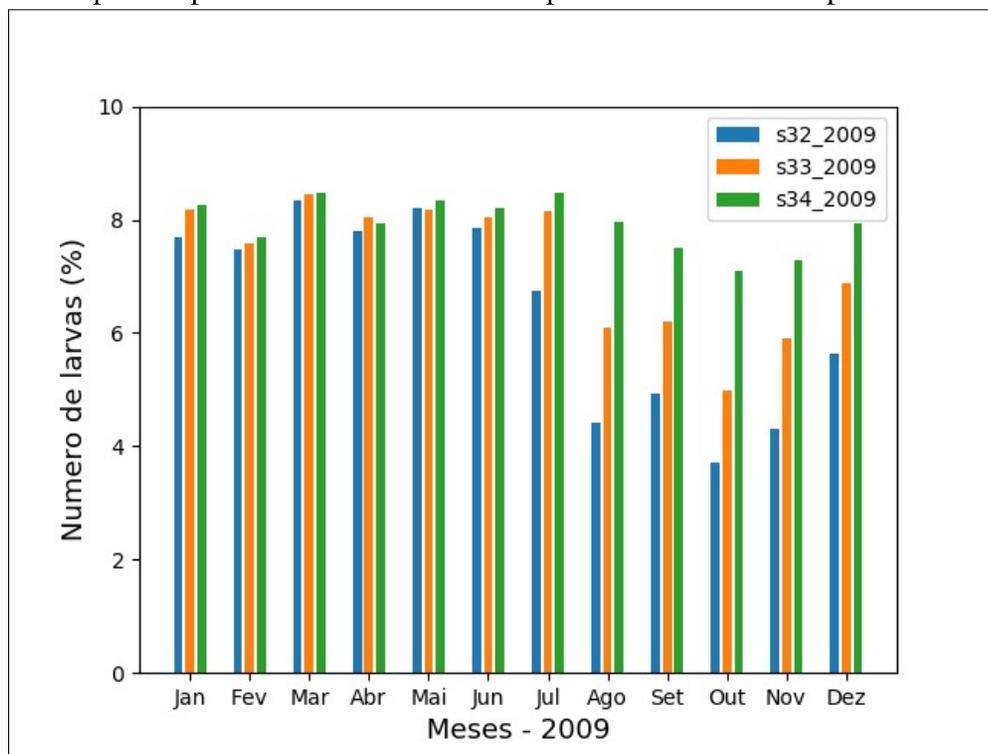
sazonalidade é pequena para valores letais de 34 e maior para valores de 32. Esse padrão sazonal foi mais bem definido no ano de 2009 do que em 2016.

Figura 16 – Mapas apresentando a trajetória das larvas (linhas pretas) e posição (quadrados) de letalidade devido a salinidade para os experimentos S32, S33 e S34, respectivamente, do ano de 2016. A barra de cor denota a profundidade onde ocorreu a morte da larva referente aos quadrados.

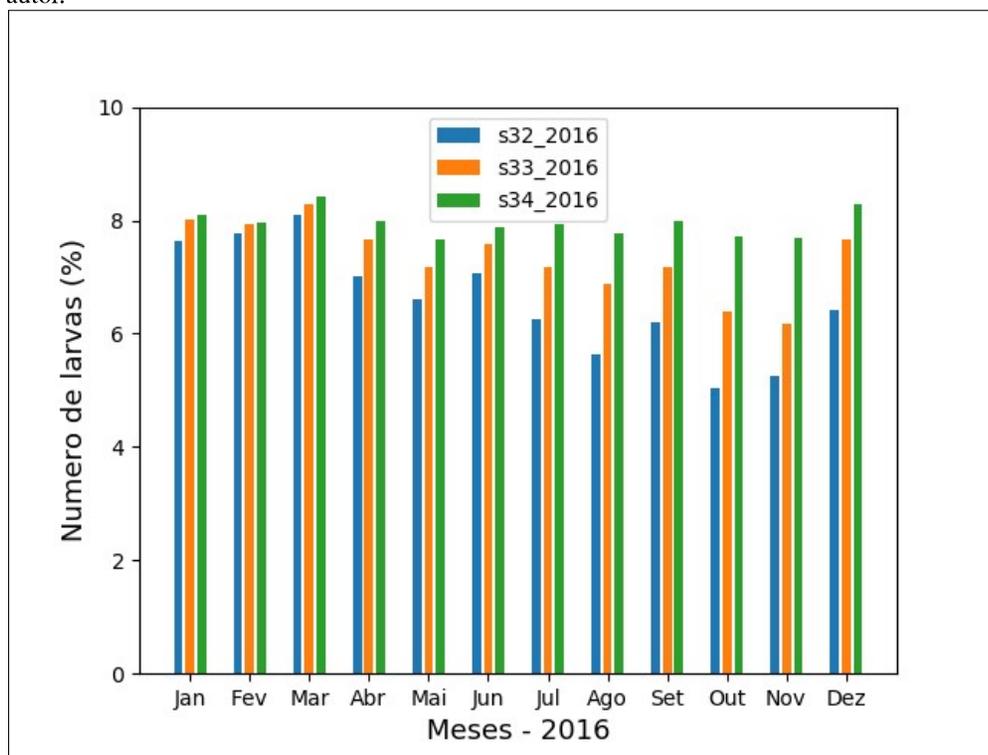


Fonte: o autor.

Figura 17 – Distribuição dos períodos de desova mensal das larvas que morrem devido a salinidade para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde). A figura superior apresenta as médias mensais para 2009 e a inferior para 2016



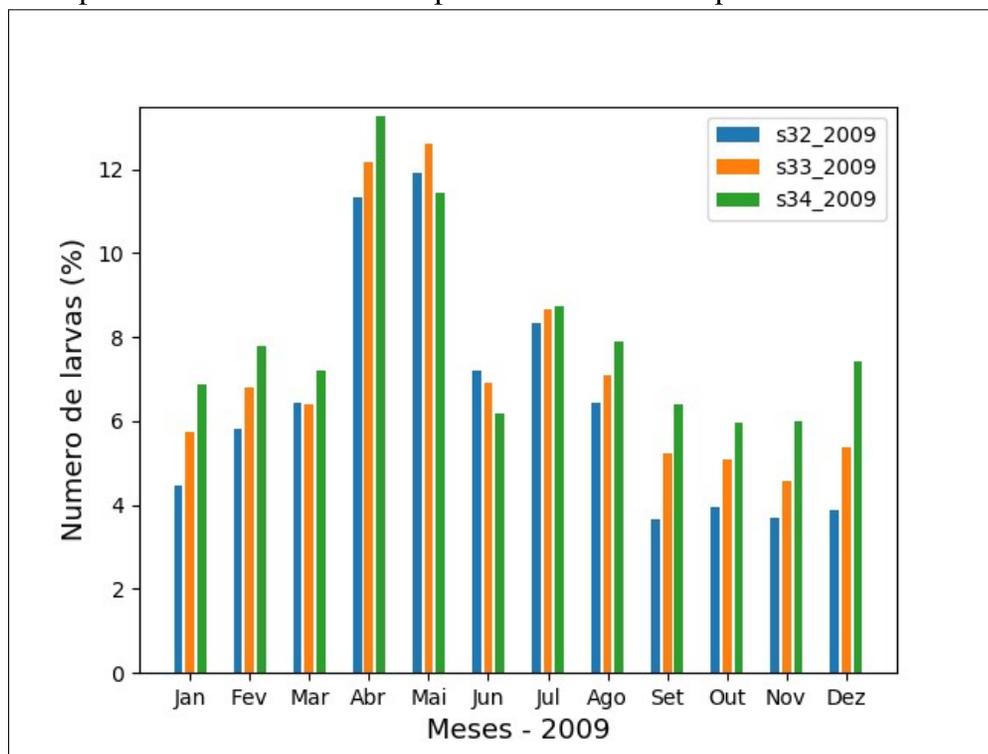
Fonte: o autor.



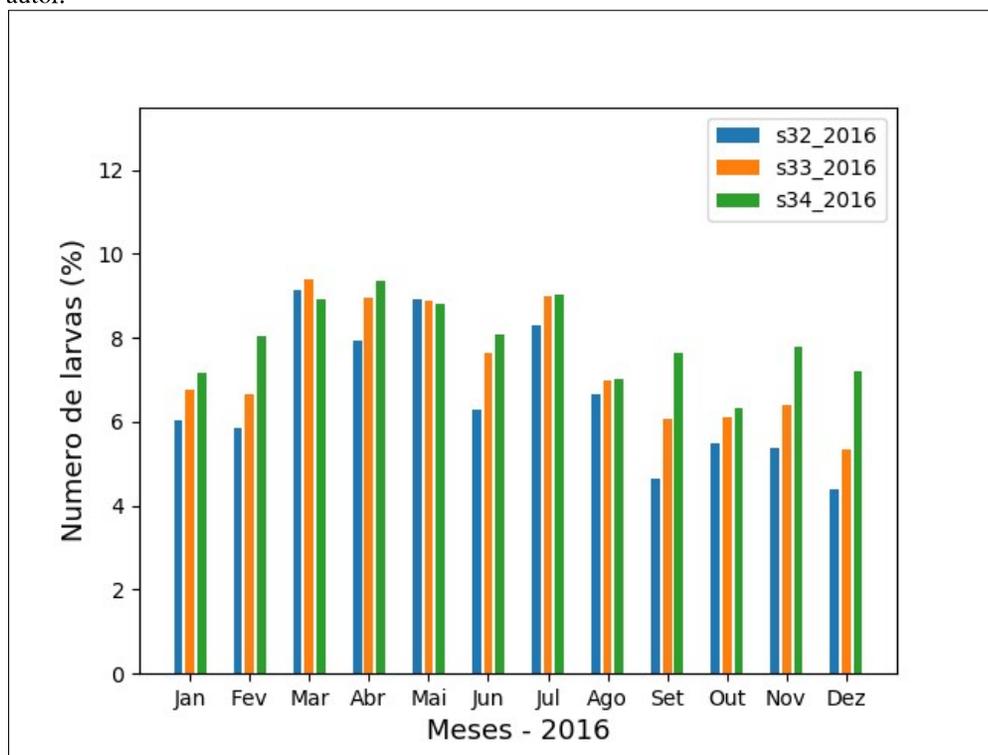
Fonte: o autor.

Em 2009, abril e maio apresentaram o maior número de mortes em todas as simulações, com valores de mortalidade superiores a 12%. Já em 2016 os picos de mortalidade variaram

Figura 18 – Distribuição dos períodos de morte das larvas para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde) em relação ao total de larvas mortas. A figura superior apresenta as médias mensais para 2009 e a inferior para 2016



Fonte: o autor.



Fonte: o autor.

de acordo a salinidade letal, mas se concentram entre março e julho e são superiores a 6%.

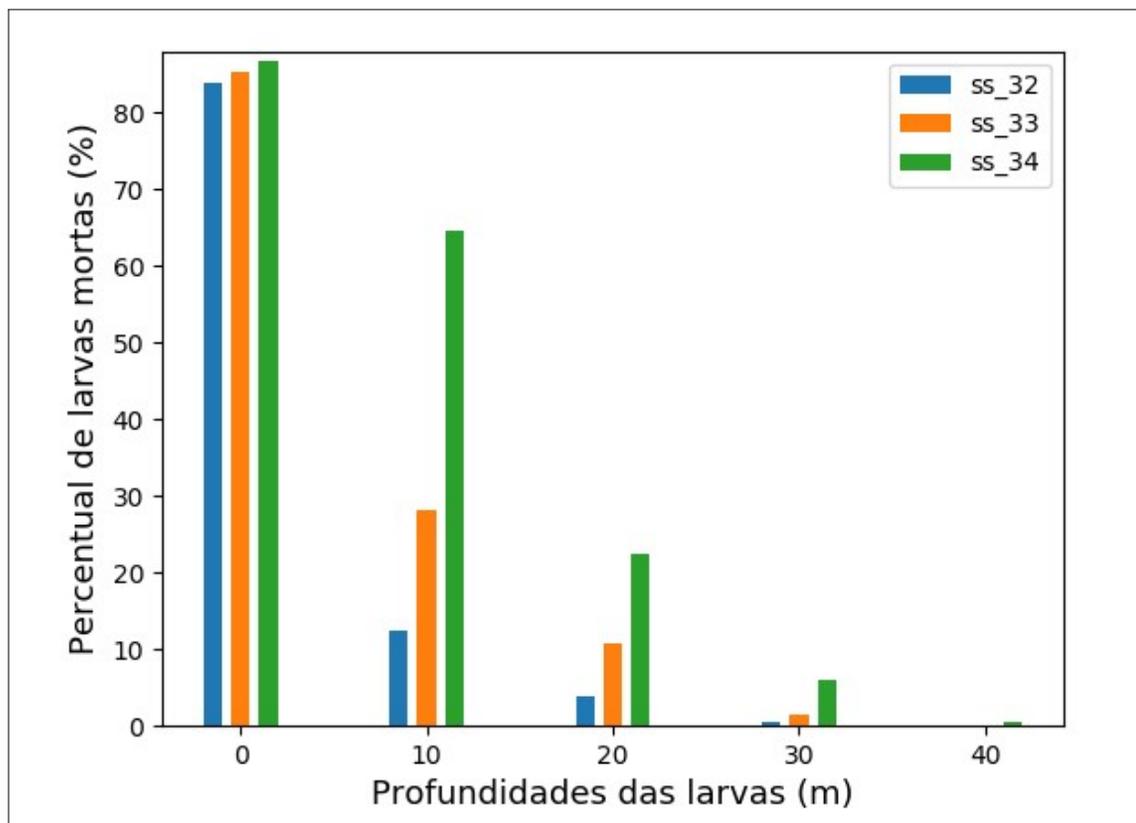
Quando considerado o momento de desova, também houve variação sazonal das

mortes devido à salinidade em ambos os anos (Figura 16). A variação sazonal das mortes em relação a desova também foi maior em 2009 do que em 2016. Essa variação maior é mais perceptível nos experimentos S32 e menor nos experimentos S34. De modo geral, as desovas ocorridas no primeiro semestre sofrem maior mortalidade de larvas devido a baixas salinidades do que as desovas realizadas no segundo semestre. Em ambos os anos as desovas realizadas nos meses de outubro e novembro propiciaram menor mortalidade, mostrando que desovas que ocorrem nestes meses tem maior probabilidade de chegar ao Caribe.

#### **4.5 Simulações com deslocamento vertical desabilitado**

Foram realizados experimentos em que as larvas ficam fixas em determinadas profundidades ao longo de seu deslocamento para estudar o efeito da migração vertical na mortalidade das espécies. Nestes experimentos houve acentuada queda da mortalidade com o aumento da profundidade, com valores superiores de mortalidade superiores a 80% quando a larva se desloca à 0 metros e mortalidades nulas quando o deslocamento se dá em profundidade de 40 m. As diferenças entre as mortalidades das simulações com diferentes salinidades letais cresceu com o aumento da profundidade (Figura 18).

Figura 19 – Percentual de larvas mortas em cada profundidade do experimento com larvas fixas (sem deslocamento) para os experimentos S32 (azul), S33 (laranja) e S34 (verde) para o ano de 2016



Fonte: o autor.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Conectividade Física

A análise das boias de deriva mostra claramente que existe conectividade física entre a PCNNB e o Caribe dentro de uma janela de 210 dias. Apesar da escassez de derivadores na região do AT em relação a outras regiões oceânicas do mundo, um número considerável de boias foi identificado migrando da PCNNB até o Caribe ou a região oceânica adjacente. Do total de 405 boias de deriva que passam pela PCNNB analisadas 37 migraram para norte ou noroeste em direção as águas caribenhas. Todos esses derivadores ultrapassaram a latitude de 10°N em um período inferior a 210 dias. A latitude de 10°N corresponde a uma latitude crucial para a conectividade pois marca o limite norte da retroflexão da CNB (FLAGG et al., 1986; SILVEIRA et al., 2000).

Os resultados das simulações estão de acordo com as evidências observacionais advindas dos derivadores apontando a existência de conectividade advectiva. Os experimentos sem salinidade letal apresentam elevados valores de conectividade (acima de 50 %) e permitem-nos afirmar que a circulação é capaz de transportar as larvas desovadas ao longo da plataforma norte Brasileira para a região do Caribe.

Os resultados das simulações apontaram um período de conectividade menor do que o encontrado mediante análise das boias. Esta diferença pode estar associada a menor quantidade de derivadores disponíveis para avaliar a conexão entre as regiões, e diferenças no período e trajetórias de deslocamento. Estas mesmas diferenças também podem explicar o porquê de um número muito maior de partículas (50%) chega a região do Caribe quando comparado a porcentagem de derivadores (aproximadamente 10%). A partir dessa análise podemos assumir que mesmo as simulações realizadas provavelmente subestimam o tempo necessário para a conectividade.

Outras simulações, que contemplem liberações de partículas nos mesmos períodos e pontos de lançamento das boias de deriva, devem acarretar menores valores de conectividade, porém estão fora do escopo do trabalho.

Apesar das porcentagens de conectividade apresentadas no trabalho serem baixas; no ambiente natural, devido ao grande número de larvas desovadas, mesmo com pequenas taxas de conectividade e com taxas de mortalidades reais acima de 99%, o número de animais que chegam ao caribe poderiam dar origem a conectividade de populações (GIRALDES; SMYTH,

2016; TOURINHO *et al.*, 2012; SARVER *et al.*, 2000). Por outro lado, outros fatores ambientais e ecológicos não considerado neste trabalho podem evitar a chegada e o desenvolvimento das larvas da PCNNB no Caribe.

Apesar de não haver evidências sólidas da distribuição de *Panulirus meripurpuratus* no Caribe, Sarver *et al.* (2000) encontrou 3 indivíduos pertencentes a esta espécie em regiões que são destino das larvas virtuais descrita neste trabalho. Não há dúvida de que a janela de 210 dias, correspondente a DLP, é tempo suficiente para partículas sujeitas a ação das correntes de superfície migrarem da PCNNB para o Caribe. A CNB conecta as camadas superficiais da PCNNB e do Caribe durante todo o ano através do fluxo contínuo e de vórtices que se desprendem na região de retroflexão (MORAES, 2011). As larvas que chegam diretamente ao Caribe no primeiro semestre apresentaram período médio de conectividade de 4 meses nas simulações, aproximadamente metade da DLP indicada por Cruz *et al.* (2015).

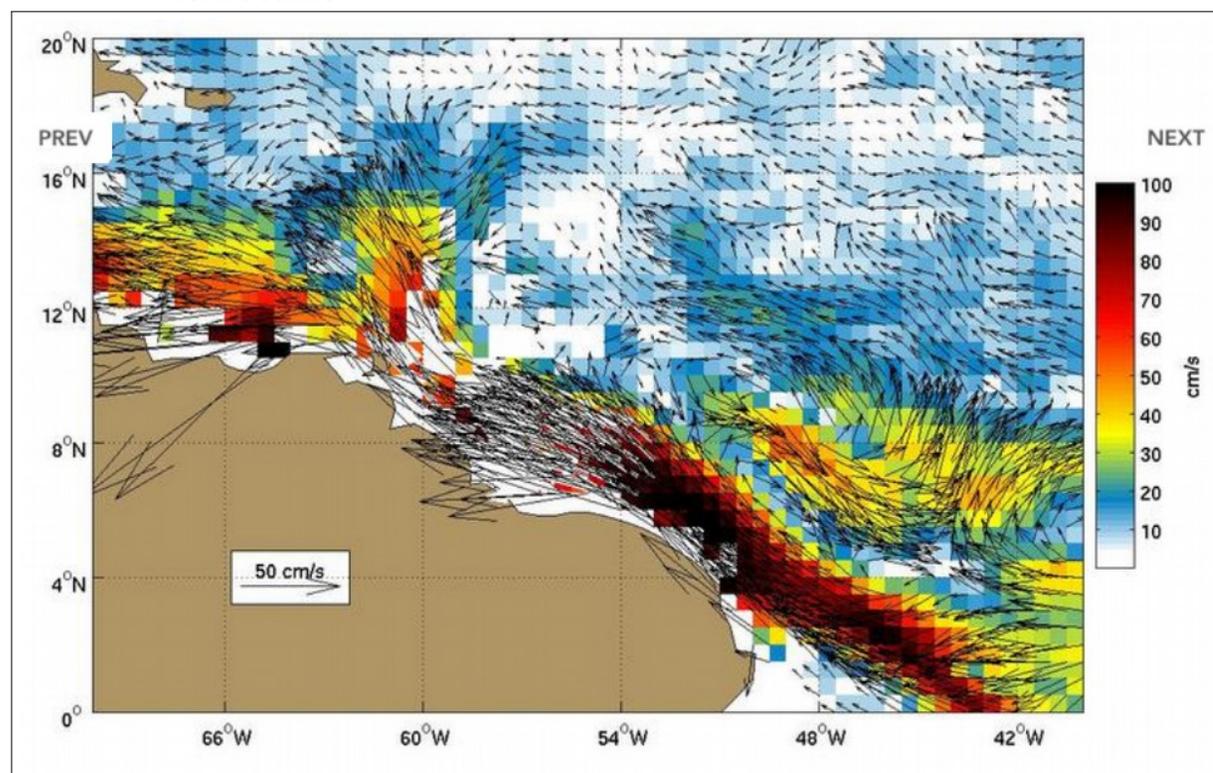
O transporte de larvas de lagosta espinhosa através do desprendimento de vórtices da CNB já foi sugerido por (CRUZ *et al.*, 2016). Ffield (2004) reporta uma ocorrência anual média de 7 a 8 vórtices de superfície gerados na região de retroflexão da CNB e de influência da pluma do Amazonas. Os vórtices são mais predominantes no segundo semestre, período onde retroflexão é mais intensa (Ffield, 2004). Logo, mesmo em períodos onde o comportamento da CNB apresenta-se desfavorável ao transporte entre as regiões de interesse, e a maior parte das larvas é transportada para leste, a conectividade com o Caribe pode continuar a acontecer mediante vórtices de superfície. A correta representação de vórtices de superfície em modelos de circulação global como o Mercator ainda não é adequada, o que sugere que as nossas simulações podem estar subestimando este transporte por vórtices em direção ao Caribe.

## 5.2 Sazonalidade da conectividade

As simulações SSL mostram a forte influência da circulação sobre a sazonalidade da conectividade. A maior concentração das trajetórias das boias do tipo 1 no primeiro semestre do ano coincide com o período que a CNB tem seu fluxo sobre o talude intensificado e contínuo com sentido noroeste (JOHNS *et al.*, 1990; SILVEIRA *et al.*, 2000). No primeiro semestre do ano a CNB acompanha a plataforma continental durante todo seu percurso para nordeste, havendo pequena ou nenhuma presença da retroflexão da CNB (Figura 19). Isso explica porque desovas ocorridas entre outubro e dezembro tem alta probabilidade de chegarem até o Caribe, pois estas larvas atingem a região entre 5° e 10°N no decorrer do primeiro semestre devido a

distância desta região para a área de lançamento. Putman *et al.* (2018), simulando a dispersão de sargassum, reporta que esta algas podem migrar da margem equatorial brasileira para o Caribe em até dois meses quando ocorre continuidade entre CNB e a corrente das guianas, o que favorece as trajetórias do tipo 1.

Figura 20 – Climatologia do campo de correntes da margem equatorial do AT no período entre Abril e Junho

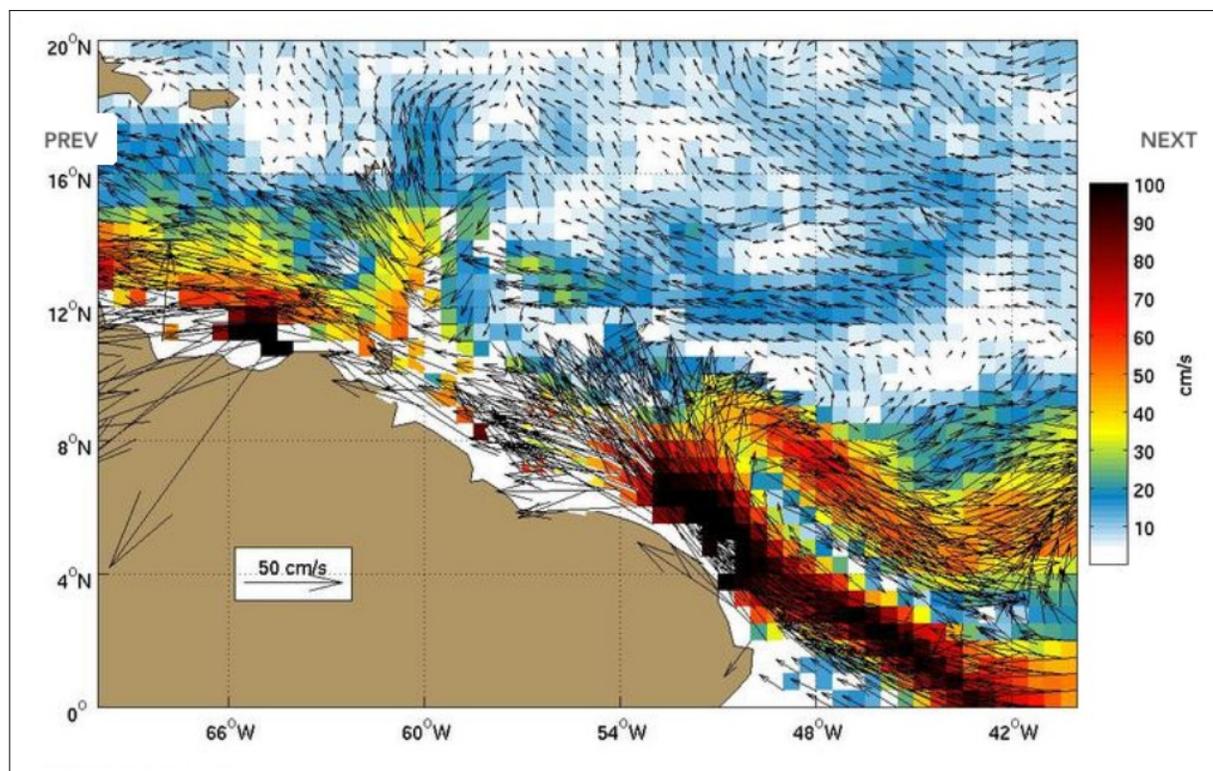


Fonte: Adaptado de Nitrouer (1996).

No segundo semestre, porém, a possibilidade de conexão fica restrita devido a intensificação da retroflexão da CNB (FIELD, 2005). Essa conexão pode ser verificada pelas rotas das trajetórias do tipo 2 que passam pela área de retroflexão neste período. Isso indica uma possível redução da conectividade entre a plataforma brasileira e o Caribe podendo restringindo o número de larvas que chegam ao Caribe que se confirma através das simulações. Assim, as larvas que cruzam a região compreendida entre as latitudes de 5° e 10° N no segundo semestre, ainda que sobrevivam à fatores ambientais adversos, tem menor probabilidade de chegar até o Caribe devido ao transporte predominante da retroflexão da CNB (Figura 20).

Há nesse período, sobretudo no 3º trimestre uma ligação de entre a CNB e CCNE (Figuras 7c e 7d). As boias com trajetória do tipo 3 estão associadas a vórtices que se desprendem da CNB. Esse vórtices predominam no segundo semestre, quando a retroflexão da CNB é mais intensa (MORAES, 2011). Essas trajetórias circulares, apesar de poderem atingir o Caribe dentro

Figura 21 – Climatologia do campo de correntes da margem equatorial do AT no período entre Julho e setembro



Fonte: Adaptado de Nitrouer (1996).

da DPL da *Panulirus meripurpuratus*, acarretam num maior período de viagem para as larvas em relação as trajetórias advectadas pelo fluxo contínuo da CNB. Putman *et al.* (2018) reporta que este transporte via vórtices pode aumentar o tempo médio de duração da trajetória entre as regiões para 6 meses, três vezes mais que as trajetórias do tipo 1.

Putman *et al.* (2018), reporta ainda partículas que inicialmente sejam capturadas pela retroflexão, migrando para leste ou sudeste, podem ainda ser advectadas pela CNE e migrarem em direção ao Caribe, apesar deste trajeto ser bastante raro.

Apesar de não haver evidências *in situ* quanto a salinidade letal das larvas no ambiente, o trabalho de Goldstein *et al.* (2008) nos permite supor que as larvas sobrevivam em salinidades superiores a 33 psu. Como esperado, as simulações configuradas com salinidades letais maiores promoveram maiores taxas de mortalidade e menores taxas de conectividade.

As bandas de baixa salinidade promovidas pelo Amazonas não são capazes de bloquear a conectividade entre a margem equatorial do Brasil e o Caribe mesmo com salinidade letal de 34. Isto torna nossos resultados de conectividade para as simulações com salinidade letal conservadores, em caso de as lagostas sobreviverem a salinidades menores que 32.

Os trabalhos de (GIRALDES; SMYTH, 2016; TOURINHO *et al.*, 2012) supõem que

a pluma do Rio Amazonas pode ter sido o principal agente responsável por cessar o fluxo gênico entre as espécies *Panulirus argus* e *Panulirus meripurpuratus*. Na verdade, a literatura sobre a distribuição de uma série de outras espécies que colonizam a margem oeste do AT sugerem que a pluma do Amazonas atua como barreira ecológica entre os hemisférios (LUIZ *et al.*, 2011).

A hipótese da salinidade ser o fator determinante nesta barreira não foi testada numericamente ou validada com coletas *in situ* ou estudos em laboratórios. Com base nos resultados aqui apresentados sugere-se que outros fatores ambientais (ex.: turbidez) ou ecológicos (ex: predação), que não a salinidade, podem estar gerando este efeito barreira ou que o mesmo não exista.

A descarga do Rio Amazonas, o transporte da CNB e regime de ventos que incide sobre a região de influência da pluma têm fortes ciclos sazonais (GEYER *et al.*, 1991). Grodsky *et al* (2011) demonstra que o efeito combinado regimes de precipitação com a circulação podem ser dominantes sobre os gradientes de salinidade em relação a descarga do Amazonas, mesmo na região de influência da pluma. A descarga do Amazonas, sozinha, não provoca variações na salinidade suficientes para bloquear a conectividade. É fundamental considerar o efeito da circulação e dos regimes de precipitação sobre a salinidade para estudar os efeitos desta sobre organismos sensíveis à variações de salinidade.

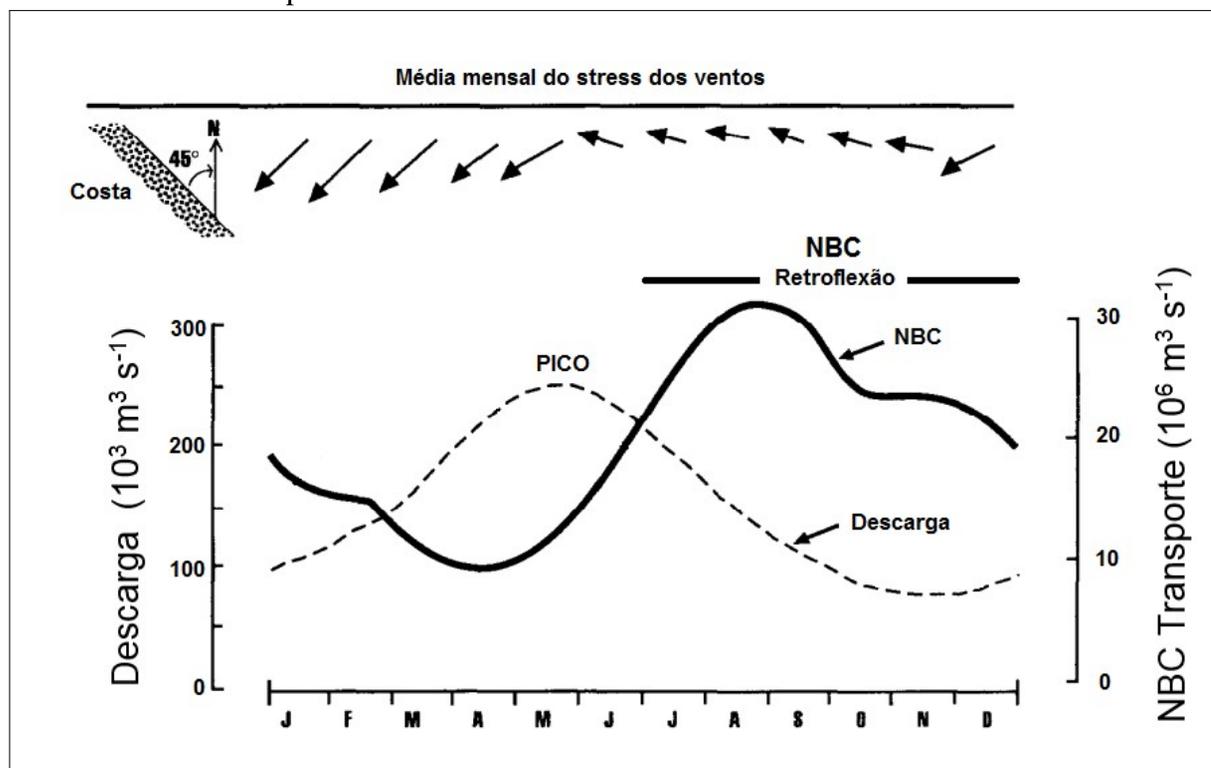
Apesar dessas ressalvas quanto a influência do Amazonas sobre a mortalidade das larvas, os histogramas das figuras 13 e 17 nos permitem perceber que o período de maior mortalidade das larvas coincide com o período de menor chegada das larvas no Caribe. Este período por sua vez, também coincide com o pico de descarga climatológico do Amazonas. Portanto, apesar da variabilidade anual do Rio Amazonas não configurar uma barreira por completo, seu efeito é capaz de provocar mudanças importantes na conectividade.

Os ciclos sazonais da descarga do Amazonas, dos ventos que incidem na e da retroflexão da CNB atuam portanto, como um sistema que regula de maneira conjunta a circulação, as quanto as flutuações de salinidade. No primeiro semestre a descarga do Amazonas podem reduzir a conectividade devido ao aumento da mortalidade das larvas e no segundo semestre a retroflexão da CNB promove uma circulação desfavorável a conectividade (Figura 19)

### **5.3 Variabilidade interanual**

Os anos de 2009 e 2016 representam condições extremas, mínimos e máximos respectivamente, de salinidade na região do AT sob influência da pluma do Amazonas. Essas

Figura 22 – Climatologia sazonal dos ventos na margem oeste do AT, da descarga do Amazonas e do transporte da CNB



Fonte: Adaptado de Nitrouer (1996).

diferenças inter-anuais na salinidade das camadas de superfície entre estes dois anos não resultou em grandes diferenças nas taxas de mortalidade das larvas com base nos valores de salinidade letais utilizados no trabalho.

O ano de 2016, com maiores salinidades, promoveu taxas de mortalidade levemente maiores do que 2009. A influência das baixas salinidades sobre a mortalidade das larvas depende também de quanto tempo estas larvas permanecem em zonas sujeitas a presença de salinidades menores. Neste caso, a circulação acaba por desempenhar papel importante também na mortalidade das larvas devido à salinidade. Em anos de circulação menos intensa na região de influência da pluma do Rio Amazonas as larvas passam mais tempo retidas nessa área e ficam portanto mais expostas as baixas salinidades.

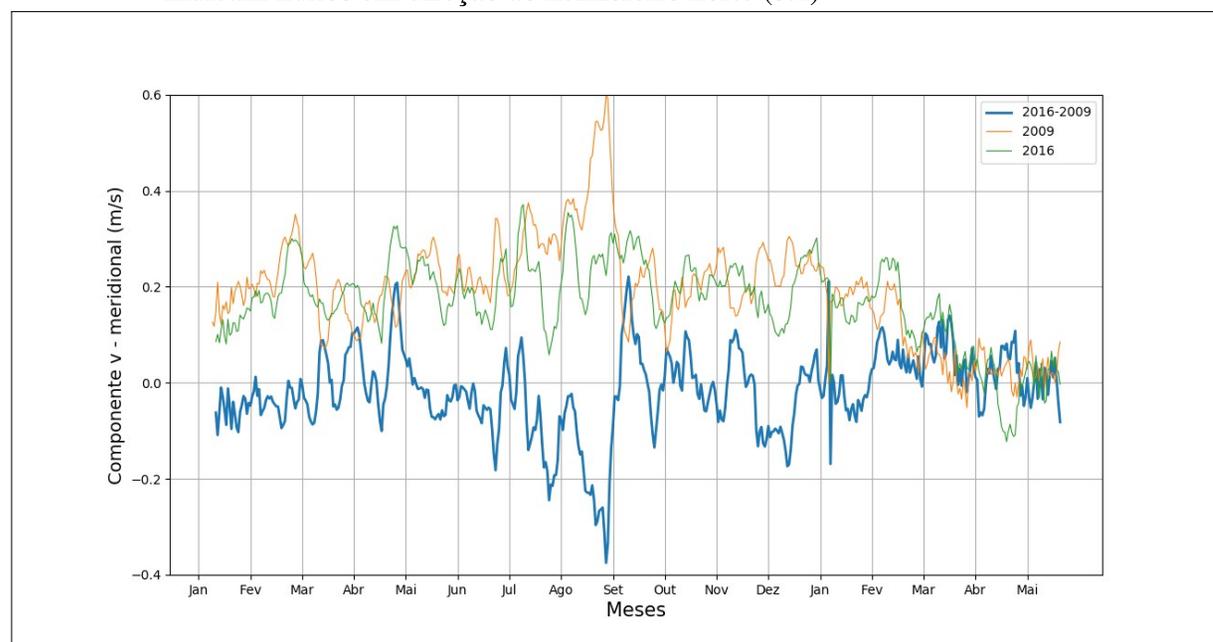
O ano de 2016 é um exemplo deste tipo de situação, apesar de apresentar maiores salinidades médias na região da pluma (Figura 3), correspondeu ao um ano com velocidades meridionais menores do que 2009 na mesma região (Figura 22) e as larvas ficaram mais tempo na região da pluma.

Assim, anos cuja circulação seja menos intensa podem produzir cenários com maiores taxas de mortalidade do que anos com baixas salinidades. Isso significa que a variabilidade

interanual da CNB pode ter papel fundamental na influência da pluma do Rio Amazonas sobre a mortalidade das larvas ou mesmo ser mais importante do que a variabilidade interanual da descarga fluvial e do regime de chuva sobre a região da pluma.

Este efeito da circulação e os efeitos das variações inter-anuais de salinidade na mortalidade talvez sejam mais evidentes com salinidades letais menores que 32, porém mais testes são necessários para comprovar esta hipótese. Além disso, Grodsky S. A. e Coles (2014) sugere que as variações interanuais de circulação e precipitação podem se opor as variações de descarga do Amazonas e dominar os gradientes de salinidade. Esta situação também deve ser analisada com mais detalhes em estudos futuros.

Figura 23 – Médias diárias das velocidades meridionais das trajetórias das larvas entre as latitudes de 5° e 10° N. Em laranja e verde estão as velocidades da componente v da velocidade para os anos de 2009 e 2016, respectivamente. A linha azul corresponde as médias diárias da velocidade meridional das larvas de 2016 menos as médias diárias de velocidade meridional das larvas em 2009. Valores positivos (negativos) indicam fluxos em direção ao hemisfério norte (sul)



Fonte: o autor.

#### 5.4 Influência da Profundidade na mortalidade das larvas

Os experimentos com deslocamento vertical habilitado mostram que há uma pequena variação das profundidades médias de mortalidade das larvas para as diferentes salinidades letais (Tabela 3). Nota-se que nas simulações com salinidade letal maior a profundidade média de mortalidade foi menor. Isto está provavelmente associado a uma redução da influência da pluma

do Amazonas com o aumento da profundidade.

Nos experimentos com larvas fixas nas profundidades de 0, 10, 20, 30 e 40 m para o ano de 2016 é possível analisar melhor a extensão vertical de influência da pluma do Amazonas. Essa extensão vertical varia de acordo com a descarga do Amazonas e a intensidade dos ventos (MASSON; DELECLUSE, 2001). É esperado que as larvas cujas trajetórias se desenvolvam mais próximo da superfície sejam mais afetadas pelas variações de salinidades provocadas pela pluma do Amazonas e regimes de precipitação, porém pela primeira vez obtém-se resultados que mostrem indícios de como a influência da pluma do Amazonas sobre larvas de lagosta espinhosa varia com a profundidade. Nota-se que abaixo de 40 m de profundidade a mortalidade devido à salinidade é aproximadamente nula.

Isto marca uma camada de influência da pluma do Amazonas e uma outra acamada abaixo desta na qual as larvas podem desenvolver sua migração sem serem afetadas pelas baixas salinidades da pluma do Amazonas. Masson e Delecluse (2001) encontraram assinaturas da pluma do Amazonas até 50 m de profundidade na salinidade da margem oeste do AT. O mesmo autor Achou assinaturas em profundidades ainda maiores na temperatura da mesma região. Sabe-se que as larvas de lagosta espinhosa podem chegar até 100 m de profundidade durante seu deslocamento nictemeral e acredita-se que este deslocamento vertical esteja associado a predação. No entanto, a real capacidade destes organismos de controlarem sua profundidade em resposta a outras condições ambientais, tal como variações na salinidade, é ainda desconhecida.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresenta um estudo sobre a conectividade ecológica entre a margem equatorial brasileira e a região do caribe através de simulações numéricas usando o modelo OpenDrift forçado pela circulação proveniente do modelo hidrodinâmico global Mercator.

De forma geral é possível afirmar que existe conectividade ecológica entre estas duas regiões, baseado nas trajetórias de boias de deriva e das simulações numéricas. Baseado nos resultados de simulações, a escala de tempo de conectividade varia entre um mínimo de 60 dias e um máximo de 180.

A baixa salinidade devido a descarga fluvial do Rio Amazonas não é uma barreira física para a conectividade, embora diminua consideravelmente o número de larvas que chegam a região do Caribe.

O período mais favorável a conectividade é para lançamentos ou desovas que ocorrem entre Outubro e Janeiro. Para as desovas ocorridas no primeiro semestre a conectividade é reduzida devido a presença da retroflexão da CNB e das baixas salinidades que as larvas encontram ao cruzar a região oceânica sobre a influência da pluma.

Existem diferenças interanuais na conectividade da região. A salinidade não é o único fator limitante na conectividade. Mesmo um ano mais seco e com maiores salinidades apresentou em geral menor conectividade comparado a um ano mais úmido. Isto ocorre pois quando a circulação próxima a pluma é menos intensa, as larvas ficam propensas a menores salinidades por mais tempo.

Foram usados apenas dois anos nas simulações, que representam extremos de salinidade, porém mais experimentos que representem diferentes condições de salinidade devem ser testados.

A profundidade de dispersão e vida das larvas é fundamental para o sucesso da conectividade. Quando as larvas permanecem em maiores profundidades, onde a salinidade é maior, existe uma menor mortalidade. Já para situações em que as larvas ficam expostas a baixas salinidades na superfície a maior parte dos indivíduos morre. Isto sugere que caso a espécie tenha capacidade de controle de flutuabilidade e permaneça em profundidades maiores ela terá mais sucesso.

Giraldes e Smyth (2016), disse que as populações de lagosta que habitam o Caribe e a região a leste da foz do Rio Amazonas são espécies diferentes baseados em evidências morfológicas e genéticas. O presente trabalho não pode ser usado para dizer que larvas de

*Panulirus meripurpuratus* chegam e se estabelecem no Caribe, dado as evidências biológicas serem contrárias. Outros fatores ambientais e biológicos (turbidez, temperatura, predação, etc) podem explicar a razão de espécie do Brasil não chegar e/ou não se estabelecer no caribe. Porém os nossos resultados mostram que existe conectividade quando considerada apenas a circulação e a salinidade letal, o que pode explicar a ocorrência de exemplares *Panulirus meripurpuratus* encontrados no Caribe como relatado por Sarver *et al.* (2000).

O presente trabalho teve como motivador a dispersão de lagosta da espécie *Panulirus meripurpuratus*; porém os resultados podem ser estendidos a outras espécies com salinidades letais inferiores a 34 e com diferentes períodos larvais. O estudo também pode ser usado para determinar a advecção de materiais (ex: plásticos) dentro do oceano Atlântico Tropical.

## REFERÊNCIAS

- ABESAMIS, R. A.; STOCKWELL, B. L.; BERNARDO, L. P. C.; L, V. C.; RUSS, G. R. Predicting reef fish connectivity from biogeographic patterns and larval dispersal modelling to inform the development of marine reserve networks. **Ecological Indicators**, 2016.
- CASTELLANOS, P. a. Response of the surface tropical atlantic ocean to wind forcing. **Progress in Oceanography**, v. 134, p. 271–292, 2015.
- COWEN, R. K.; LWIZA, K. M. M. a. Conectivity of marine populations: open or closed?
- CRUZ, R.; BERTELSEN, R. D. The spiny lobster (*panulirus argus*) in the wider caribbean: a review of life cycle dynamics and implications. **Proc. Gulf Caribbean**, 2009.
- CRUZ, R. I.; P, T. C. E.; JAMES, J. C.; TRUJILLO, C. A.; MENEZES, M. O. B. Puerulus settlement of the spiny lobster, *panulirus argus* (latreille, 1804) along the colombian caribbean coast. **Crustacean**, 2016.
- CRUZ, R. I.; TEIXEIRA, C. E. P.; MENEZES, M. o. B.; SANTANA, J. V. M.; NETO, T. M.; GAETA, J. C.; FREITAS, P. P.; SILVA, K. C. A.; CINTRA, I. H. A. Large scale oceanic circulation and larval recruitment of the spiny lobster *panulirus argus*. **Crustacean**, v. 88, n. 3, p. 298–323, 2015.
- DAGESTAD, K. F.; RÖHRS, J.; BREIVIK, O.; ADLANDSVIK, B. Opendrift v1.0: a generic framework for trajectory modellin. **Geoscientific Model Development**, 2018.
- FIELD, A. North brazil current rings viewed by trmm microwave imager sst and the influence of the amazon plume. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 52, p. 137–160, 2005.
- FLAGG, C. N.; GORDON, R. L.; MCDOWELL, S. Hydrographic and current observation on the continental slope and shelf of western equatorial atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 16, p. 1412–1428, 1986.
- GEYER, R. W.; BERDSLEY, R. C.; CANDELA, J.; CASTRO, B. M.; LEHECKIS, R. V.; LENTZ, S. J.; LIMEBURNER, R.; MIRANDA, L. B.; TROWBRIDGE. The physical oceanography of the amazon outflow. **Oceanography**, 1991.
- GIRALDES, B.; SMYTH, D. M. Recognizing *panulirus meripurpuratus* sp. nov. (decapoda: Palinuridae) in brazil—systematic and biogeographic overview of *panulirus* species in the atlantic ocean. **Zootaxa**, v. 3, n. 4107, p. 353–366, 2016.
- GOLDSTEIN, J. S.; MATSUDA, H.; TAKENOUGH, T.; IV, M. J. B. A description of the complete development of larval caribbean spiny lobster *panulirus argus* (latreille, 1804) in culture. **Journal of Crustacean Biology**, 2008.
- GRODSKY S. A., R. G. C. J. A.; COLES, V. J. Year-to-year salinity changes in the amazon plume: contrasting 2011 and 2012 aquarius/sacd and smos satellite data. **Remote Sens. Environ.**, n. 140, p. 14–22, 2014.
- HOGG, N. G.; JOHN, W. E. Western boundary currents. **Reviews of Geophysics**, v. 32, p. 1311–1334, 1995.

- JOHNS, W. E.; LEE, T. N.; SCHOTT, F. A.; ZANTOPP, R. J.; EVANS, R. H. The north brazil current retroflection: seasonal structure and eddy variability. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 22103–22120, 1990.
- KOUGH, A. S.; PARIS, C. B.; IV, M. J. B. Larval conectivity and the international managment of fisheries. **PLOS ONE**, 2013.
- LELLOUCHE, J. M.; LEGALLOUDEC, O.; REGNIER, C.; LEVIER, B.; GREINER, E.; DREVILLON, M. Copernicus Mercator **QUALITY INFORMATION DOCUMENT For Global Sea Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL\_ANALYSIS\_FORECAST\_PHY\_001\_024**: manual guide. French. 67 p.
- LETT, C.; VERLEY, P.; MULLON, C.; PARADA, C.; BROCHIER, T.; PEVEN, P.; BLANKE, B. A lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. **Environmental Modelling Software**, 2008.
- LUIZ, O. J.; MADIN, J. S.; ROBERTSON, D. R.; ROCHA, L. A.; WIRTZ, P.; FLOETER, S. R. Ecological traits inuencing range expansion across large oceanic dispersal barriers: insights from tropical atlantic reef shes. **The Royal Society: Biological Sciences**, 2011.
- LUMPKIN, R.; GARZOLI, S. L. Near-surface circulation in the tropical atlantic ocean. **Deep-Sea Research I**, 2005.
- MASSON, S.; DELECLUSE, P. Influence of the amazon river runoff on the tropical atlantic. **Phys. Chem. Earth**, 2001.
- MCCONAUGHA, J. R. Decapod larvae: Dispersal, mortality, and ecology. a working hypothesis. **American Ecology**, v. 32, p. 512–523, 1992.
- MEDEL, C.; PARADA, C.; E, M. C.; O, P.; C, C. B. E. How biophysical interactions associated with sub- and mesoscale structures and migration behavior affect planktonic larvae of the spiny lobster in the juan fernández ridge: A modeling approach. **Progress in Oceanography**, 2018.
- MORAES, A. P. K. **Caracterização da Corrente Norte do Brasil na região de retroflexão**. 2006. Dissertação (Mestrado) — COPPE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- PROBIC, J.; PARADA, C.; ERNST, B.; HORMAZÁBAL, S. E.; COMBES, V. Modelación de la conectividad de las subpoblaciones de la langosta de juan fernández (*jasus frontalis*), a través de un modelo biofísico. **Latin american journal of aquatic research**, v. 3, n. 40, p. 613–632, 2012.
- PUTMAN, N. F.; GONI, G. J.; GRAMER, L. J. L. J.; HU, C.; JOHNS, E. M.; TRINANES, J.; WANG, M. Simulating transport pathways of pelagic sargassum from the equatorial atlantic into the caribbean sea. **Progress in Oceanography**, n. 165, p. 205–214, 2018.
- RIBEIRO, F. **Dispersão de plumas no Atlântico Tropical e a formação de bandas zonais de baixa salinidade**. 2017. Dissertação (Mestrado) — Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade de Santa Catarina, 2017.
- RIBEIRO, S. S. **Conectividade ecológica no oceano Atlântico Tropical por meio de modelagem numérica**. 2017. 65 f. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Universidade Federal do Ceará, 2017.

RUDORFF, C. A. G. **Análise Da Dispersão De Larvas De Lagostas No Atlântico Tropical a Partir De Correntes Geostróficas Superficiais Derivadas Por Satélites**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2006.

RUDORFF, C. A. G.; LORENZZETTI, J. A.; GHERARDI, D. F. M.; OLIVEIRA, J. E. L. Application of remote sensing to the study of the pelagic spiny lobster larval transport in the tropical atlantic. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, n. 1, 2009.

RUDORFF, C. A. G.; LORENZZETTI, J. A. AND, G. D.; OLIVEIRA, J. E. L. Modeling spiny lobster larval dispersion in the tropical atlantic. **Fisheries Research**, v. 2-3, n. 96, p. 206–215, 2009.

RöHRS J, C. K. H. V. F. S. S. S. ; BROSTRÖM, G. Wave-induced transport and vertical mixing of pelagic eggs and larvae. **Lim. Oceanography**, n. 59, p. 1213–1227, 2014.

SARVER, S. K.; FRESHWATER, D. W.; WALSH, P. J. The occurrence of the provisional brazilian subspecies of spiny lobster (*panulirus argus westonii*) in florida waters. **Fisherie Bulletin**, 2000.

SARVER, S. K.; SILBERMAN, J. D.; WALSH, P. J. Mitochondrial dna sequence evidence supporting the recognition of two subspecies or species of the florida spiny lobster *panulirus argus*. **Journal of Crustacean Biology**, v. 1, n. 18, p. 177–186, 1998.

SCHOTT, F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. Transports and pathways of the upper layer circulation in the western tropical atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, 1998.

SILVEIRA, I. C. A. D.; BROWN, W. S.; FLIERL, G. R. Dynamics of the north brazil current retroflection region from the western tropical atlantic experiment observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 137–160, 2000.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical atlantic ocean. **Deep-Sea Research II**, 1999.

TOURINHO, J. L.; SOLÉ-CAVA, A. M.; LAZOSKI, C. Cryptic species within the commercially most important lobster in the tropical atlantic, the spiny lobster *panulirus argus*. **Marine Biology**, 2012.

URBANO, D. F.; ALMEIDA, R. A. F. D.; P, N. Equatorial under current and equatorial countercurrent at 38°w: A new perspective from direct velocity data. **Journal of Geophysical Research**, 2008.

VASILE, R.; HARTMANN, K.; HOBDAV, A. J.; OLIVER, E.; S, T. Evaluation of hydrodynamic ocean models as a first step in larval dispersal modelling. **Continental Shelf Research**, n. 152, p. 38–49, 2018.