

## FONTE OU SUMIDOURO? UMA REVISÃO SOBRE OS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> NA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA

Raquel R. Oliveira<sup>a,b,\*</sup>, Helen M. J. Affe<sup>a,b,c</sup>, Raquel Avelina<sup>a,b</sup>, Luana Q. Pinho<sup>a,b</sup>, Thiago V. Franklin<sup>a,b</sup>, Gizyelle Miguel<sup>a,b</sup> e Leticia C. da Cunha<sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup>Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 20550-900 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

<sup>b</sup>Rede Brasileira de Pesquisa em Acidificação do Oceano, Universidade Federal de Rio Grande, 96203-900 Rio Grande – RS, Brasil

<sup>c</sup>Rede Clima, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 12227-010 São José dos Campos – SP, Brasil

Recebido em 02/04/2022; aceito em 18/08/2022; publicado na web em 09/12/2022

SOURCE OR SINK? A REVIEW OF THE CO<sub>2</sub> FLUXES AT THE BRAZILIAN CONTINENTAL SHELF. Studies of global carbon balance estimates are still incipient in the oceans of the Southern Hemisphere, mainly in coastal areas and continental shelf. Even in Brazil, despite its continental proportion coastline, there is still a great inconsistency in studies on the marine carbonate system and CO<sub>2</sub> fluxes at the air-sea interface. This article presents a review of studies on CO<sub>2</sub> fluxes on the coast of Brazil, published between the years 2000 and 2022, aiming to map the distribution of CO<sub>2</sub> fluxes on the Brazilian continental shelf, to understand its role as a source or sink of CO<sub>2</sub>. In general, large-scale studies show that the Brazilian shelf exhibits a latitudinal variation of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes, behaving mainly as a source in the north, where there is no influence of the Amazon River plume, and as a sink in the south portion. We also identified there is a strong influence on the occurrence of mesoscale and synoptic oceanographic and meteorological events, and the presence of different ecosystems, which can change the behavior of CO<sub>2</sub> fluxes locally. However, there are still many data gaps along the continental shelf, as well as in different seasons for the entire coast.

Keywords: air-sea interaction; Southwest Atlantic Ocean; CO<sub>2</sub> partial pressure; coastal zones; Brazil.

### INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um dos gases de efeito estufa mais abundantes na atmosfera do planeta, cuja concentração tende ao equilíbrio com o oceano, principalmente devido às trocas entre os dois compartimentos.<sup>1</sup> No entanto, o uso contínuo de combustíveis fósseis e as mudanças de uso e cobertura da terra, incluindo queimadas e desflorestamento, têm contribuído significativamente com o aumento da fração molar média de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Na última década (2010-2019) foram emitidos por essas fontes cerca de 10.9 ± 0.9 Gt C por ano, mais que o dobro registrado na década de 1960 (4.5 ± 0.7 Gt C por ano).<sup>2</sup>

A entrada de CO<sub>2</sub> atmosférico no oceano ocorre por processos de troca na interface entre os dois ambientes. As diferenças entre a pressão parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) da superfície do oceano e a atmosfera controlam o sentido do fluxo de CO<sub>2</sub> (Equação 1). Assim, quando a pCO<sub>2</sub> da atmosfera é maior que a do oceano, o oceano tende a absorver o CO<sub>2</sub> atmosférico e apresenta valores de fluxo negativos. Caso contrário, quando a pCO<sub>2</sub> do oceano é maior que a da atmosfera, o oceano atua como fonte e os valores de fluxo são positivos.<sup>3</sup>

$$\Delta pCO_2 = pCO_{2oceanico} - pCO_{2atmosferico} \quad (1)$$

Após a dissolução na água do mar grande parte do CO<sub>2</sub> atmosférico passa a ser íons bicarbonatos e carbonatos.<sup>1</sup> Associada à bomba biológica, parte do CO<sub>2</sub> disponível na água é consumida pela produção primária nos processos de fotossíntese, enquanto os processos de respiração torna o CO<sub>2</sub> disponível novamente na água do mar.<sup>4</sup> A longo prazo, em escala geológica, parte do carbono depositado no sedimento pode retornar para a atmosfera, através de atividades geológicas como vulcões em zonas de subducção e de colisão de placas tectônicas, como também, através de fontes hidrotermais de águas profundas.<sup>5</sup>

Além disso, mudanças na temperatura (TSM) e salinidade na superfície do mar também influenciam os fluxos de CO<sub>2</sub>. A solubilidade do CO<sub>2</sub> na água do mar tem relação inversamente proporcional com a TSM e a salinidade, assim, quanto mais quente e salina, menor a solubilidade do gás na água.<sup>6</sup> Outro fator importante é a transferência de gás de um meio para o outro por processos físicos turbulentos que ocorrem na interface oceano-atmosfera como, por exemplo, a velocidade e estresse do vento, bolhas e estabilidade da camada limite atmosférica.<sup>7</sup>

Com a crescente necessidade de se entender o comportamento dos oceanos em relação ao balanço de CO<sub>2</sub> no planeta, foram propostos a partir da década de 1970 os primeiros mapas de fluxo de CO<sub>2</sub> global, com mais de 3 milhões de medidas *in situ*.<sup>8</sup> Os resultados apontaram que existe uma grande variação latitudinal dos fluxos, sendo caracterizadas como regiões fonte, aquelas próximas ao Equador e trópicos e, como sumidouro, as regiões entre 40° e 60° de latitude no hemisfério Norte e Sul.<sup>3</sup> A partir de 1997, foi disponibilizada a base de dados SOCAT (*Surface Ocean Carbon Atlas*), que conta com mais de 30 milhões de observações da pCO<sub>2</sub> na superfície do oceano em sua versão atual.<sup>9</sup>

No entanto, os estudos do oceano global não costumam levar em conta a complexidade das zonas costeiras, negligenciando sua importância como área de transição e de transferência de compostos orgânicos e inorgânicos entre continente e oceano aberto, geralmente onde ocorrem as maiores taxas de processos biogeoquímicos, e com alta variabilidade de processos oceanográficos e meteorológicos.<sup>8,10,11</sup> Por conta disso, as interpretações feitas quanto a sua importância na assimilação do carbono antropogênico ainda apresentam incertezas.<sup>12-18</sup>

De forma geral, um dos grandes problemas para estimativas mais acuradas do balanço de carbono global é a lacuna de dados nos oceanos do Hemisfério Sul.<sup>16,18-22</sup> Nesse contexto, a costa do Brasil, apesar de suas proporções continentais, ainda apresenta inconsistências, tanto temporais quanto espaciais, nas observações

\*e-mail: oliveira.raquel\_3@posgraduacao.uerj.br

sobre a concentração e os fluxos de  $\text{CO}_2$  e, conseqüentemente, quanto ao seu comportamento como fonte ou sumidouro. Uma revisão da rede de Pesquisa Brasileira em Acidificação dos Oceanos (BrOA) levantou diversas discussões importantes sobre o papel da plataforma continental brasileira (PCB) e das zonas costeiras para o entendimento do ciclo do carbono e o efeito da acidificação dos oceanos, e como isso afeta diversos ecossistemas sensíveis como, por exemplo, manguezais, recifes de coral, bancos de grama marinha, marismas, ou bancos de rodolitos.<sup>23</sup> Do mesmo modo, há discussões sobre as conseqüências das mudanças climáticas em diversos ecossistemas costeiros, incluindo aquelas decorrentes do aumento na frequência e intensidade de eventos que interferem no ciclo do carbono local.<sup>23</sup>

Com o objetivo de entender melhor o comportamento da PCB como fonte ou sumidouro de  $\text{CO}_2$ , foi realizado um levantamento bibliográfico dos trabalhos publicados nos últimos 22 anos na costa do Brasil – sendo apresentados aqui os principais resultados encontrados por eles – para mapear a distribuição dos fluxos de  $\text{CO}_2$  na interface oceano-atmosfera na PCB, bem como indicar as regiões com baixa cobertura de observações ao longo da costa, podendo assim servir de diretriz no planejamento de projetos futuros.

## METODOLOGIA

### Área de estudos

A costa do Brasil abrange as latitudes entre  $4^{\circ}30'N$  e  $34^{\circ}45'S$ .<sup>24</sup> Ao sul o limite marítimo da plataforma continental é com o Uruguai (na barra do Arroio Chuí), e ao norte com a Guiana Francesa (pelo Rio Oiapoque, a oeste do Cabo Orange) (Figura 1).<sup>24,25</sup>

Do ponto de vista geológico, a margem continental do Brasil apresenta três feições: plataforma continental, talude e elevação continental. A largura da plataforma continental varia entre 8 km (ao largo da Bahia) e 330 km (ao largo da região amazônica),<sup>24</sup> chegando a profundidades de até 200 m.<sup>25,26</sup> A partir da quebra da plataforma continental se inicia o talude que se estende até a elevação continental, que por sua vez, termina no limite com as planícies abissais.<sup>25</sup>

A dinâmica física da plataforma continental é representada por três processos principais: correntes geostróficas (Figura 2a e 3), ressurgência costeira (Figura 2b-c) e marés, e que inevitavelmente interagem com as áreas adjacentes.<sup>24</sup> As principais correntes que atuam na plataforma continental do Brasil são a Corrente do Brasil (CB) (Figura 2a) e a Corrente Norte do Brasil (CNB) (Figura 3), que são correntes quentes de contorno oeste, associadas ao Giro Subtropical do Atlântico Sul.<sup>29</sup> A região de Cabo Frio é onde ocorre a principal ressurgência costeira do Brasil devido à combinação da orientação da linha de costa e os ventos de NE perpendiculares ao continente associados a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (Figura 2b e 3). Desse modo, por transporte de Ekman, as águas superficiais, muitas vezes caracterizadas pela Águas Continental (AC) (uma mistura da massa d'água Tropical (AT, temperaturas  $>18^{\circ}\text{C}$  e salinidade  $>36,5$ ) com águas continentais) são removidas, possibilitando que as massas de água mais profundas, como a Água Central do Atlântico Sul (ACAS, temperaturas  $<18^{\circ}\text{C}$  e salinidades  $<36$ ), cheguem à superfície.<sup>24,26,29</sup> Por fim, a maré é o movimento associado ao Sol e a Lua de elevação do nível do mar ao longo de toda costa, chamando atenção para as variações de aproximadamente 8 m nas regiões da foz do Rio Amazonas e na Baía de São Marcos (Maranhão).<sup>24</sup>

### Levantamento de dados

O levantamento bibliográfico foi realizado a partir de pesquisas nas bases de periódicos científicos *Web of Science* e *Scopus* (Elsevier),



**Figura 1.** Mapa da área de estudo com a divisão regional e o número de artigos publicados entre 2000 e 2021, para as regiões norte e nordeste (N-NE, azul = 31 artigos), sul e sudeste (S-SE, vermelho = 19 artigos) e estudos de abordagem global (AG, verde = 53 artigos). No mapa são apresentados os estados costeiros (Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC), Paraná (PR), São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Espírito Santo (ES), Bahia (BA), Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN), Ceará (CE), Piauí (PI), Maranhão (MA), Pará (PA), Amapá (AP), bem como os deltas dos rios com as plumas mais influentes da região, como o Delta do Rio da Prata, do Rio Amazonas e do Rio Orinoco (Venezuela)

acessadas pelo portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Para a pesquisa foram selecionados os anos de 2000 a 2022 (março), e utilizadas as seguintes palavras-chave: “ $\text{CO}_2$  fluxes and Brazil Continental Shelf”, “ $\text{CO}_2$  fluxes and Southwestern Atlantic”, “coastal and  $f\text{CO}_2$  and Brazil”, “coastal and  $p\text{CO}_2$  and Brazil”, “ $\text{CO}_2$  fluxes and air-sea and Brazil”, “ $\text{CO}_2$  and Western Tropical Atlantic Ocean”.

A partir da lista inicial de resultados, foi verificado que as buscas incluíam várias publicações que levavam em consideração os fluxos de  $\text{CO}_2$  nas zonas costeiras de todo o Oceano Atlântico Sul e globais. Desta forma, foi decidido incluí-los na lista de artigos finais e realizar uma discussão entre eles e os trabalhos encontrados para a PCB. Foi realizada a triagem e organização dos artigos encontrados nas duas bases, excluindo aqueles que fugiam ao tema ou que estavam duplicados. Observou-se a ausência de trabalhos conhecidos, publicados nas revistas *Nature* e *Science*, os quais foram adicionados manualmente à lista final. Foi verificado mais uma vez, agora pela análise dos resumos e palavras-chave, se de fato os artigos listados estavam relacionados ao tema. Assim, os estudos que focavam principalmente na área oceânica, ou que não reportavam resultados ligados as interpretações do comportamento como fonte ou sumidouro de  $\text{CO}_2$  de plataformas continentais ou zonas costeiras, em estudos de fluxos de  $\text{CO}_2$  ou de  $p\text{CO}_2$  (ou  $f\text{CO}_2$ ), foram excluídos da lista.

A Figura 4 mostra de forma resumida os passos seguidos durante as buscas e organização dos artigos encontrados. A lista final apresenta um total de 103 artigos.

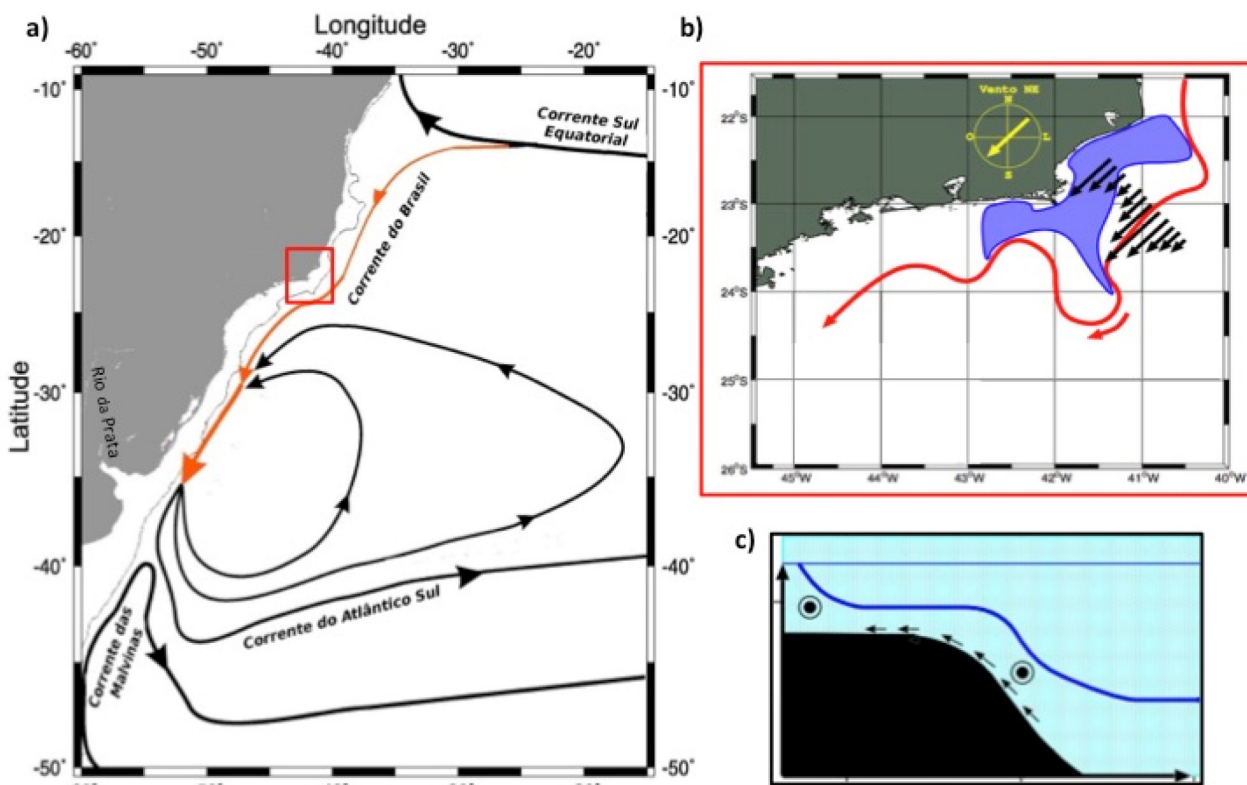


Figura 2. Representação dos processos oceanográficos da plataforma continental do Brasil. Na figura a) em laranja está representada a Corrente do Brasil (CB) e em destaque vermelho a figura b) um esquema da ressurgência costeira na região de Cabo Frio e São Tomé (RJ) em azul. A seta vermelha representa a CB, as setas pretas a direção do vento. A figura c) representa uma seção vertical indicando a entrada da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na plataforma continental. Figuras adaptadas de Ponsoni,<sup>27</sup> e Calado,<sup>28</sup> respectivamente

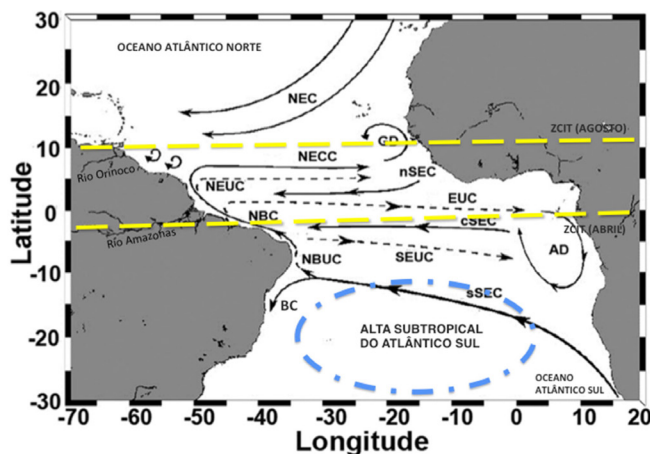


Figura 3. Representação das principais correntes oceânicas da região norte e nordeste do Brasil, SubCorrente Norte do Brasil/Corrente Norte do Brasil (NBUC/NBC), Corrente do Brasil (BC), Corrente Sul Equatorial norte/central/sul (n/c/sSEC), Contra Corrente Norte Equatorial North Equatorial (NECC), SubCorrente Equatorial (EUC), SubCorrente Norte/Sul Equatorial (N/SEUC), Corrente Equatorial Norte (NEC), Giro da Guiné Dome (GD) e Giro da Angola (AD). Com destaque em tracejado amarelo para a área de influência da Zona de Convergência InterTropical (ZCIT), baseada em Carvalho & Oyama,<sup>30</sup> e em ponto-traço azul a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Figura adaptada de Araújo et al.<sup>17</sup>

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Foram encontrados um total de 50 artigos publicados exclusivamente para a costa do Brasil. A Tabela 1 mostra a divisão por Estado Federativo do Brasil do número de artigos que descrevem o

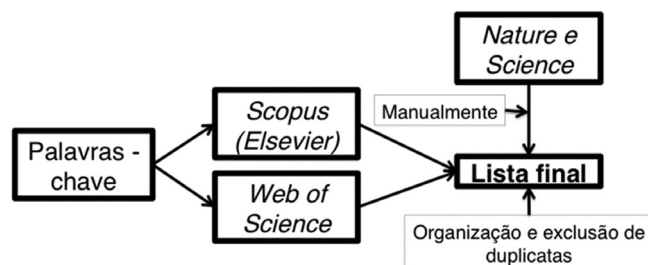


Figura 4. Ilustração em forma de fluxograma com as etapas realizadas durante o processo de levantamento bibliográfico, onde as palavras chave foram: “CO<sub>2</sub> fluxes and Brazil Continental Shelf”, “CO<sub>2</sub> fluxes and Southwestern Atlantic”, “coastal and fCO<sub>2</sub> and Brazil”, “coastal and pCO<sub>2</sub> and Brazil”, “CO<sub>2</sub> fluxes and air-sea and Brazil”, “CO<sub>2</sub> and Western Tropical Atlantic Ocean”

comportamento da PCB como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub>. É possível observar que muitas vezes a mesma referência aparece para mais de um Estado, isso se deve ao fato de que muitos estudos consideram grandes áreas de amostragem, e por isso o resultado final do estudo é referente a uma área em que estão contidos mais de um Estado. Portanto, decidiu-se agrupar os trabalhos por grandes regiões. Assim, os artigos foram separados em três grandes grupos de acordo com a divisão regional da sua área de estudo, sendo eles Sul-Sudeste (S-SE) e Norte-Nordeste (N-NE), como mencionado na Metodologia, o terceiro grupo reúne os estudos que apresentam uma abordagem global (AG) sobre fluxos de CO<sub>2</sub> nas zonas costeiras, ou seja, que não foram feitos especificamente na costa do Brasil, mas que são de grande relevância para entender e discutir os resultados encontrados na costa Brasileira (Figura 1). Dos 103 artigos encontrados, 19 correspondem a região S-SE, 31 a N-NE e 53 são estudos globais em áreas costeiras (AG).

**Tabela 1.** Número de artigos sobre o comportamento da costa do Brasil como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub>, disponíveis na literatura por Estado do Brasil (Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC), Paraná (PR), São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Espírito Santo (ES), Bahia (BA), Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN), Ceará (CE), Piauí (PI), Maranhão (MA), Pará (PA), Amapá (AP)) e suas respectivas distribuições regionais (sul-sudeste (S-SE) e norte-nordeste (N-NE))

| Estado | Região | n° de artigos | Referências  |
|--------|--------|---------------|--|
| RS     | S-SE   | 7             | Arruda et al.; <sup>31</sup> Carvalho-Borges et al.; <sup>32</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Ito et al.; <sup>34</sup> Lencina-Avila et al.; <sup>35</sup> Liutti et al.; <sup>36</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| SC     | S-SE   | 6             | Arruda et al.; <sup>31</sup> Carvalho-Borges et al.; <sup>32</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Ito et al.; <sup>34</sup> Liutti et al.; <sup>36</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| PR     | S-SE   | 6             | Arruda et al.; <sup>31</sup> Carvalho-Borges et al.; <sup>32</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Ito et al.; <sup>34</sup> Liutti et al.; <sup>36</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| SP     | S-SE   | 7             | Arruda et al.; <sup>31</sup> Carvalho-Borges et al.; <sup>32</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Ito et al.; <sup>38</sup> Ito et al.; <sup>34</sup> Liutti et al.; <sup>36</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| RJ     | S-SE   | 18            | Abril et al.; <sup>39</sup> Arruda et al.; <sup>31</sup> Brandini et al.; <sup>40</sup> Carvalho-Borges et al.; <sup>32</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Cotovicz et al.; <sup>41</sup> Cotovicz et al.; <sup>42</sup> Cotovicz et al.; <sup>43</sup> Cotovicz et al.; <sup>44</sup> Cotovicz et al.; <sup>45</sup> Cotovicz et al.; <sup>46</sup> Cotovicz et al.; <sup>47</sup> Erbas et al.; <sup>48</sup> Ito et al.; <sup>34</sup> Liutti et al.; <sup>36</sup> Marotta et al.; <sup>49</sup> Oliveira et al.; <sup>50</sup> Padin et al. <sup>37</sup> |
| ES     | S-SE   | 3             | Bonou et al.; <sup>51</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| BA     | N-NE   | 6             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Bonou et al.; <sup>51</sup> Carvalho et al.; <sup>33</sup> Longhini et al.; <sup>52</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| SE     | N-NE   | 6             | Abril et al.; <sup>54</sup> ; Araújo et al.; <sup>55</sup> ; Araújo et al.; <sup>17</sup> ; Bonou et al.; <sup>51</sup> ; Noriega & Araújo; <sup>53</sup> ; Padin et al.; <sup>37</sup>  |
| AL     | N-NE   | 4             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Bonou et al.; <sup>51</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Padin et al.; <sup>37</sup>   |
| PE     | N-NE   | 10            | Araújo et al.; <sup>17</sup> Bertini & Braga; <sup>56</sup> Gaspar et al.; <sup>57</sup> Guenther et al.; <sup>58</sup> Lefèvre et al.; <sup>59</sup> Noriega et al.; <sup>60</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Noriega et al.; <sup>61</sup> Noriega et al.; <sup>62</sup> Padin et al. <sup>37</sup>   |
| PB     | N-NE   | 4             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Lefèvre et al.; <sup>59</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| RN     | N-NE   | 6             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Carvalho et al.; <sup>63</sup> Lefèvre et al.; <sup>59</sup> Lefèvre et al.; <sup>64</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Padin et al. <sup>37</sup>   |
| CE     | N-NE   | 6             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Carvalho et al.; <sup>63</sup> Cotovicz et al.; <sup>65</sup> Lefèvre et al.; <sup>64</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Padin et al. <sup>37</sup>  |
| PI     | N-NE   | 4             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Carvalho et al.; <sup>63</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Souza et al. <sup>66</sup>   |
| MA     | N-NE   | 4             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Carvalho et al.; <sup>63</sup> Lefèvre et al.; <sup>67</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup>  |
| PA     | N-NE   | 12            | Araújo et al.; <sup>55</sup> Araújo et al.; <sup>68</sup> Araújo et al.; <sup>17</sup> Cooley et al.; <sup>69</sup> Ibánhez et al.; <sup>19</sup> Ibánhez et al.; <sup>70</sup> Körtzinger; <sup>71</sup> Lefèvre et al.; <sup>72</sup> Lefèvre et al.; <sup>15</sup> Medeiros et al.; <sup>73</sup> Noriega & Araújo; <sup>53</sup> Valério et al. <sup>74</sup>  |
| AP     | N-NE   | 9             | Araújo et al.; <sup>17</sup> Cooley & Yager; <sup>75</sup> Cooley et al.; <sup>69</sup> Ibánhez et al.; <sup>76</sup> Körtzinger; <sup>71</sup> Lefèvre et al.; <sup>15</sup> Medeiros et al.; <sup>73</sup> Ternon et al.; <sup>77</sup> Valério et al. <sup>74</sup>   |

Na Tabela 2 estão apresentados os locais em que a costa do Brasil atua como fonte ou sumidouro, os métodos utilizados para identificar essas condições, bem como os valores médios dos fluxos de CO<sub>2</sub> (mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) quando foi possível acessar essa informação nos artigos.

### Métodos utilizados para os cálculos de fluxos de CO<sub>2</sub>

Como observado na Tabela 2, a maioria dos estudos realizados no litoral brasileiro calcularam os fluxos de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) a partir da fórmula *bulk* (equação 2), em uma abordagem puramente físico-química (Tabela 1).

$$FCO_2 = k \cdot s(\Delta pCO_{2(oc-atm)}) \quad (2)$$

em que “k” é a velocidade de transferência do gás entre ambientes<sup>7,8,78,81-86</sup> “s” é o coeficiente de solubilidade do gás na água do mar<sup>6</sup> e “ΔpCO<sub>2(oc-ar)</sub>” é a diferença entre a pCO<sub>2</sub> da água do mar e da atmosfera.

Os dados da pCO<sub>2</sub> descritos na maioria dos trabalhos na costa do Brasil foram adquiridos por medidas autônomas, realizadas durante o deslocamento dos cruzeiros oceanográficos.<sup>87</sup> Os valores de xCO<sub>2</sub> são transformados em pCO<sub>2</sub>,<sup>8</sup> o qual é corrigido para o valor de fugacidade de CO<sub>2</sub> (fCO<sub>2</sub>).<sup>88</sup> Essa correção é necessária, uma vez que o CO<sub>2</sub> não se comporta como um gás ideal na água do mar. Apesar da fugacidade considerar o comportamento não ideal do CO<sub>2</sub> e possuir maior acurácia, considera-se que a pCO<sub>2</sub> e a fCO<sub>2</sub> apresentam virtualmente o mesmo valor numérico.<sup>6,84</sup> Diferentes equações são adotadas para calcular a velocidade de transferência do gás, considerando as diferentes condições hidrodinâmicas, especialmente decorrentes da maior ou menor velocidade do vento.

Dessa forma, as equações adotadas em cada estudo levam em conta cenários mais próximos das condições locais.<sup>7,81,82</sup> Um método diferente para calcular o FCO<sub>2</sub>, utilizado pela primeira vez em um estudo na costa do Brasil,<sup>50</sup> é baseado em dados coletados em alta frequência (20 Hz), denominado de Covariância de Vórtices (CV). O método de CV determina os fluxos turbulentos pela covariância encontrada entre as flutuações turbulentas da componente vertical do vento com relação à média da densidade do ar seco, a componente vertical do vento e da razão de mistura H<sub>2</sub>O<sub>(v)</sub>/CO<sub>2</sub> (Equação 3).<sup>89</sup>

$$FCO_{2CV} = \overline{\rho_a w' c'} \quad (3)$$

em que as barras correspondem às médias e os apóstrofes indicam as variações turbulentas com relação à média. ρ<sub>a</sub> é a densidade do ar seco, w é a componente vertical da velocidade do vento, c é a razão de mistura.

Outros trabalhos utilizam modelos numéricos como, por exemplo, o modelo oceânico biogeoquímico PlankTOM10,<sup>90</sup> baseado em grupos funcionais do plâncton, em conjunto com o modelo de circulação geral dos oceanos NEMOV2.3, para avaliar a influência das plumas dos principais rios do Oceano Atlântico Tropical nas medidas de carbono e nutrientes. A climatologia da PCB S-SE do Brasil e áreas adjacentes (incluindo a PC da Patagônia Argentina) foi realizada utilizando modelagem numérica, com o modelo hidrodinâmico *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) e o modelo biogeoquímico do tipo Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus (NPZD).<sup>46</sup>

Atualmente, alguns trabalhos utilizam metodologias baseadas em inteligência artificial, a exemplo a climatologia de fluxos de CO<sub>2</sub> no oceano global a partir de um método que utiliza redes neurais, com 1° x 1° de resolução espacial,<sup>10</sup> e para as climatologias das plataformas continentais globais, com uma resolução espacial de 25 km.<sup>16</sup> O

**Tabela 2.** Comportamento como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub> da costa do Brasil de acordo com a sua referência bibliográfica. A tabela apresenta as regiões de ocorrência pelo grupo S-SE (sul-sudeste) e N-NE (norte-nordeste), a distribuição latitudinal, o tipo de ambiente estudado (plataforma continental brasileira (PCB), PCB na região da Pluma do rio Amazonas (PCB-PA), estuário, baía, laguna, recife de coral e manguezal), o período dividido por meses, estações do ano e anos. Valores médios de fluxos de CO<sub>2</sub> (mmol C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) - Valores positivos indicam uma região fonte de CO<sub>2</sub> (fluxo na direção atmosfera-oceano) e valores negativos indicam uma região sumidouro de CO<sub>2</sub> (fluxo na direção oceano-atmosfera) – de acordo com o método utilizado, onde o método bulk está representado pela referência da equação da velocidade de transferências do gás

| Grupo | Latitudes       | Ambiente                               | Período                            | Anos                  | Fluxo de CO <sub>2</sub><br>médios<br>(mmol C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) | Método*               | Comportamento<br>médio           | Referências                                    |
|-------|-----------------|--|------------------------------------|-----------------------|---|-----------------------|----------------------------------|--|
| S-SE  | < 24,6°S        | PCB                                    | Primavera - Verão -<br>Inverno     | 1997 - 1998           | 4,8   | W92                   | fonte                            | Ito <i>et al.</i> <sup>38</sup>                |
| S-SE  | 15°S - 31°S     | PCB                                    | Outono<br>Primavera                | 2000 - 2008           | 1,1<br>1,4  | W92                   | fonte                            | Padin <i>et al.</i> <sup>37</sup>              |
| S-SE  | 21°S - 30°S     | PCB interior<br>PCB media/<br>exterior | Todas as estações                  | ---                   | 0 - 1,4<br>-4,1 a 0   | Modelagem<br>numérica | fonte<br>sumidouro               | Arruda <i>et al.</i> <sup>31</sup>             |
| S-SE  | 22,6°S - 22,9°S | Baía                                   | Todos os meses                     | 2013 - 2014           | -26,4<br>-33,1  | W92<br>RC01           | sumidouro<br>sumidouro           | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>41</sup>           |
| S-SE  | 22,75°S         | Baía                                   | Abril                              | 2011                  | ---   | Metabolismo           | sumidouro                        | Brandini <i>et al.</i> <sup>40</sup>           |
| S-SE  | 22,6°S - 22,9°S | Baía                                   | Todas as estações                  | 2014 - 2015           | ---   | ΔpCO <sub>2</sub>     | fonte                            | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>42</sup>           |
| S-SE  | 35°S            | PCB                                    | Primavera                          | 2011                  | -0,5  | W92                   | sumidouro                        | Lencina-Avila <i>et al.</i> <sup>35</sup>      |
| S-SE  | 21,5°S - 34,9°S | PCB                                    | Dezembro<br>Janeiro                | 2010<br>2011          | 1,8<br>11,3   | W92                   | fonte<br>fonte                   | Ito <i>et al.</i> <sup>34</sup>                |
| S-SE  | 23°S - 33°S     | PCB                                    | Outono                             | 2014                  | ---   | Modelo TrOCA          | sumidouro                        | Carvalho-Borges<br><i>et al.</i> <sup>32</sup> |
| S-SE  | 22,4°S - 23°S   | PCB                                    | Julho                              | 2015                  | -26,9   | CV                    | sumidouro                        | Oliveira <i>et al.</i> <sup>50</sup>           |
| S-SE  | 22,6°S - 22,9°S | Baía                                   | Inverno e Verão                    | 2013 - 2014           | ---   | pCO <sub>2</sub>      | sumidouro                        | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>44</sup>           |
| S-SE  | 21,6°S          | Estuário                               | Fevereiro<br>Outubro<br>Março      | 2017<br>2018          | -3,05<br>-5,26<br>14,59   | RC01                  | sumidouro<br>sumidouro<br>fonte  | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>45</sup>           |
| S-SE  | 22,8°S          | Baía                                   | Junho<br>Julho<br>Agosto           | 2018                  | 0,0<br>2,4<br>-4,1  | WK96                  | neutro<br>fonte<br>sumidouro     | Marotta <i>et al.</i> <sup>49</sup>            |
| S-SE  | 22,6°S          | Laguna                                 | Julho<br>Fevereiro                 | 2017<br>2018          | -8,2<br>7,3   | W14                   | sumidouro<br>fonte               | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>46</sup>           |
| S-SE  | 22,9°S          | Laguna                                 | Março<br>Junho<br>Novembro<br>Maio | 2017<br>2018          | 17,8<br>13,7<br>5,9<br>15,5   | RC01                  | fonte<br>fonte<br>fonte<br>fonte | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>47</sup>           |
| S-SE  | 22,8°S          | Laguna                                 | Novembro<br>Fevereiro              | 2019<br>2020          | -62,4<br>-134,4   | W92, RC01 e<br>A09    | sumidouro<br>sumidouro           | Erbas <i>et al.</i> <sup>48</sup>              |
| S-SE  | 20°S - 35°S     | PCB                                    | Verão - Primavera                  | 2010 - 2011 e<br>2014 | 5,6   | W14                   | fonte                            | Carvalho <i>et al.</i> <sup>33</sup>           |
|       | 5,4             |  |                                    |                       | fonte   |                       |                                  |  |
|       | 8,1             |  |                                    |                       | Fonte   |                       |                                  |  |
|       | 3,2             |  |                                    |                       | Fonte   |                       |                                  |  |
| N-NE  | 7,5°N           | PCB - PA                               | Maio                               | 1996                  | -24,2   | W92                   | sumidouro                        | Ternon <i>et al.</i> <sup>77</sup>             |
| N-NE  | 4°N - 9°N       | PCB - PA                               | Primavera                          | 2002                  | 46  | W92 e Modelagem       | fonte                            | Körtzinger <sup>71</sup>                       |
| N-NE  | 3°N - 15°N      | PCB - PA                               | Verão                              | 2001                  | 9,7   | W92                   | fonte                            | Cooley & Yager <sup>75</sup>                   |
| N-NE  | 6°N - 13°N      | PCB - PA                               | Primavera                          | 2003                  | 7   | WMG89                 | fonte                            | Cooley <i>et al.</i> <sup>69</sup>             |
| N-NE  | 11,5°S          | Estuário                               | Todas as estações                  | 1996                  | 41,1  | C94                   | fonte                            | Souza <i>et al.</i> <sup>66</sup>              |
| N-NE  | 5°S - 10°N      | PCB - PA                               | Todas as estações                  | 2006 - 2009           | 0,57  | W92                   | fonte                            | Lefèvre <i>et al.</i> <sup>72</sup>            |
| N-NE  | 1°N - 15°S      | PCB                                    | Primavera                          | 2000 - 2008           | 4,4   | W92                   | fonte                            | Padin <i>et al.</i> <sup>37</sup>              |

**Tabela 2.** Comportamento como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub> da costa do Brasil de acordo com a sua referência bibliográfica. A tabela apresenta as regiões de ocorrência pelo grupo S-SE (sul-sudeste) e N-NE (norte-nordeste), a distribuição latitudinal, o tipo de ambiente estudado (plataforma continental brasileira (PCB), PCB na região da Pluma do rio Amazonas (PCB-PA), estuário, baía, laguna, recife de coral e manguezal), o período dividido por meses, estações do ano e anos. Valores médios de fluxos de CO<sub>2</sub> (mmol C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) - Valores positivos indicam uma região fonte de CO<sub>2</sub> (fluxo na direção atmosfera-oceano) e valores negativos indicam uma região sumidouro de CO<sub>2</sub> (fluxo na direção oceano-atmosfera) – de acordo com o método utilizado, onde o método bulk está representado pela referência da equação da velocidade de transferências do gás (cont.)

| Grupo   | Latitudes       | Ambiente                        | Período           | Anos        | Fluxo de CO <sub>2</sub><br>médios<br>(mmol C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) | Método*          | Comportamento<br>médio | Referências                          |
|---------|-----------------|---------------------------------|-------------------|-------------|---|------------------|------------------------|--------------------------------------|
| N-NE    | 8°S             | Estuário                        | Todas as estações | 2007        | 30  | RC01             | fonte                  | Noriega <i>et al.</i> <sup>60</sup>  |
| N-NE    | 8°S - 8°N       | PCB                             | Todas as estações | 2008 - 2011 | 1,7   | S07              | fonte                  | Lefèvre <i>et al.</i> <sup>59</sup>  |
| N-NE    | 6°S - 2,5°N     | PCB                             | Outono            | 2009        | 3,52  | S07              | fonte                  | Lefèvre <i>et al.</i> <sup>64</sup>  |
|         |                 |                                 | Inverno           | 2010        | 3,89  |                  | fonte                  |                                      |
| N-NE    | 1,5°S           | Baía                            | Verão - Inverno   | 2012        | 85,7  | RC01             | fonte                  | Noriega & Araújo <sup>53</sup>       |
|         | 0,8°S           | Estuário                        |                   |             | 126,7   |                  | fonte                  |                                      |
|         | 2,5°S           | Baía                            |                   |             | 4,8   |                  | fonte                  |                                      |
|         | 3,9°S           | Estuário                        |                   |             | 2,45  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 4,4°S           | Estuário                        |                   |             | 18  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 4,8°S           | Estuário                        |                   |             | 0,9   |                  | fonte                  |                                      |
|         | 5°S             | Estuário                        |                   |             | 42,6  |                  | Fonte                  |                                      |
|         | 5°S             | Estuário                        |                   |             | 50  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 5,1°S           | Estuário                        |                   |             | 2,3   |                  | fonte                  |                                      |
|         | 5,4°S           | Estuário                        |                   |             | 164,7   |                  | fonte                  |                                      |
|         | 5,7°S           | Estuário                        |                   |             | 77,3  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 6,3°S           | Laguna                          |                   |             | 78,3  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 6,7°S           | Estuário                        |                   |             | 119,5   |                  | fonte                  |                                      |
|         | 7,5°S           | Estuário                        |                   |             | 36,1  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 7,8°S           | Estuário                        |                   |             | 55,3  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 8°S             | Estuário                        |                   |             | 43  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 8,2°S           | Estuário                        |                   |             | 54  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 8,5°S           | Estuário                        |                   |             | 16,4  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 8,8°S           | Estuário                        |                   |             | 25,7  |                  | fonte                  |                                      |
|         | 10,28°S         | Estuário                        |                   |             | 6,3   |                  | fonte                  |                                      |
| 10,75°S | Estuário        | 48,7                            | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 11,4°S  | Estuário        | 81,6                            | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 11,8°S  | Estuário        | 55                              | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 12,8°S  | Estuário        | 20,5                            | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 14,8°S  | Estuário        | 49,6                            | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 14,8°S  | Estuário        | 61,4                            | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 15°S    | Estuário        | 175,2                           | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| 17,7°S  | Estuário        | 23,3                            | fonte             |             |   |                  |                        |                                      |
| N-NE    | 7,55°S - 8,85°S | Estuários                       | Todos os meses    | 2012 - 2013 | 51  | RC01             | fonte                  | Noriega <i>et al.</i> <sup>61</sup>  |
| N-NE    | 16,3°S          | Recife de coral<br>(maré baixa) | Julho             | 2006        | 144   | LM96             | fonte                  | Longhini <i>et al.</i> <sup>52</sup> |
|         |                 |                                 | Junho             | 2007        | 237,6   |                  | fonte                  |                                      |
|         |                 |                                 | Agosto            | 2007        | 290,4   |                  | fonte                  |                                      |
|         |                 |                                 | Janeiro           | 2008        | -9,6  |                  | sumidouro              |                                      |
|         |                 |                                 | Abril             | 2008        | -185712   |                  | sumidouro              |                                      |
| N-NE    | 8,9°S           | Estuário                        |                   | 2012 - 2013 | 4,7   | RC01             | fonte                  | Noriega <i>et al.</i> <sup>62</sup>  |
| N-NE    | 10°S-20°S       | PCB                             | Todas as estações | 1989 - 2014 | ---   | pCO <sub>2</sub> | fonte                  | Bonou <i>et al.</i> <sup>51</sup>    |
| N-NE    | 0,5°S - 4°N     | PCB - PA                        | Outubro           | 2012        | -9 a 9  | S07              | fonte                  | Araújo <i>et al.</i> <sup>68</sup>   |
| N-NE    | 3°S - 5°S       | PCB                             | Outubro           | 2012        | 1,1   | W14              | fonte                  | Carvalho <i>et al.</i> <sup>63</sup> |

**Tabela 2.** Comportamento como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub> da costa do Brasil de acordo com a sua referência bibliográfica. A tabela apresenta as regiões de ocorrência pelo grupo S-SE (sul-sudeste) e N-NE (norte-nordeste), a distribuição latitudinal, o tipo de ambiente estudado (plataforma continental brasileira (PCB), PCB na região da Pluma do rio Amazonas (PCB-PA), estuário, baía, laguna, recife de coral e manguezal), o período dividido por meses, estações do ano e anos. Valores médios de fluxos de CO<sub>2</sub> (mmol C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) - Valores positivos indicam uma região fonte de CO<sub>2</sub> (fluxo na direção atmosfera-oceano) e valores negativos indicam uma região sumidouro de CO<sub>2</sub> (fluxo na direção oceano-atmosfera) – de acordo com o método utilizado, onde o método bulk está representado pela referência da equação da velocidade de transferências do gás (cont.)

| Grupo | Latitudes    | Ambiente        | Período           | Anos        | Fluxo de CO <sub>2</sub> médios (mmol C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) | Método*          | Comportamento médio | Referências                          |
|-------|--------------|-----------------|-------------------|-------------|---|------------------|---------------------|--------------------------------------|
| N-NE  | 8°S          | Estuário        | Janeiro           | 2008        | -6,7  | RC01             | sumidouro           | Guenther <i>et al.</i> <sup>58</sup> |
|       |              |                 | Abril             |             | -6,1  |                  | sumidouro           |                                      |
|       |              |                 | Julho             |             | -4,5  |                  | sumidouro           |                                      |
| N-NE  | 2,5°S        | PCB             | Todos os meses    | 2013 - 2014 | 1,81  | S07              | fonte               | Lefèvre <i>et al.</i> <sup>67</sup>  |
| N-NE  | 5°S - 10°N   | PCB - PA        | Abril             | 2013        | 46,5  | S07              | fonte               | Lefèvre <i>et al.</i> <sup>15</sup>  |
|       |              |                 | Maio              | 2014        | 41,5  |                  | fonte               |                                      |
| N-NE  | 8°S          | Estuário        | Verão - Inverno   | 2010 - 2011 | 90  | RC01             | fonte               | Gaspar <i>et al.</i> <sup>57</sup>   |
|       | 8,1°S        | Estuário        |                   |             | 186   |                  | fonte               |                                      |
| N-NE  | 12,9°S - 7°N | PCB             | Todas as estações | 1995 - 2001 | -1,2 a 2  | W14              | sumidouro/fonte     | Araújo <i>et al.</i> <sup>17</sup>   |
| N-NE  | 3,5°S        | Recife de coral | Julho             | 2019        | 8,4   | W14              | fonte               | Cotovicz <i>et al.</i> <sup>65</sup> |
|       |              | PCB             |                   |             | 5   |                  | fonte               |                                      |
| N-NE  | 10,5°S       | Estuário        | Agosto            | 2014        | 0,6   | W92              | fonte               | Abril <i>et al.</i> <sup>54</sup>    |
|       |              | Manguezal       |                   |             | 0,2   |                  | fonte               |                                      |
|       |              | Estuário        | Novembro          | 2015        | 1,6   |                  | fonte               |                                      |
|       |              | Manguezal       |                   |             | 0,5   |                  | fonte               |                                      |
| N-NE  | 6°N - 8°N    | PCB - PA        | Verão - Inverno   | 2010 - 2014 | -17,5 a 43,5  | W92              | sumidouro/fonte     | Valério <i>et al.</i> <sup>74</sup>  |
| N-NE  | 8°S          | PCB             | Julho             | 2013        | -3,58   | pCO <sub>2</sub> | sumidouro           | Bertini & Braga <sup>56</sup>        |
|       | 7,7°S        |                 |                   |             | -14,9   |                  |                     |                                      |

\*Referências dos métodos de velocidade de transferência de gás (k): LM86;<sup>78</sup> WK96;<sup>79</sup> WMG99;<sup>80</sup> W92;<sup>7</sup> RC01;<sup>81</sup> S07;<sup>82</sup> A09;<sup>83</sup> W14.<sup>84</sup>

método consiste em aplicar uma rede neural do tipo *Self Organizing Map* (SOM) para determinar províncias e após isso é utilizada uma rede do tipo *Feed Forward* (FF) para determinar os valores mensais dos fluxos de CO<sub>2</sub> para cada uma delas. Essa é uma abordagem cujo uso está em crescimento em diferentes áreas das ciências naturais e pode ser aprimorada com diferentes tipos de arquiteturas no futuro. Não foi encontrado nenhum trabalho usando essa metodologia para calcular os fluxos de CO<sub>2</sub> especificamente na PCB.

Todos esses métodos têm em comum a utilização de dados auxiliares para determinar os fluxos de CO<sub>2</sub> além da pCO<sub>2</sub>/fCO<sub>2</sub>, ajudando na interpretação dos resultados. Em sua maioria, são utilizados dados de temperatura da superfície do mar (TSM), salinidade e campos de velocidade do vento. Geralmente, eles variam em escala temporal e espacial, de acordo com o objetivo do trabalho, e podem ser obtidos de diversas fontes, por exemplo, medidas *in situ*, por satélites, ou por produtos de reanálises. Alguns estudos também utilizaram a concentração de clorofila-a (Chla), Alcalinidade Total (AT), pH e Carbono Inorgânico Dissolvido (DIC), para o cálculo empírico do pCO<sub>2</sub> ou para análises e discussões dos resultados.

A grande maioria dos trabalhos calculou os fluxos de CO<sub>2</sub> por uma abordagem puramente físico-química, portanto, não levando em consideração a contribuição biológica durante as medidas (Tabela 1). Para incluir o efeito biológico na discussão, são utilizados os valores de Chla, como *proxy* da produtividade primária marinha (PPM). De certa forma, para as zonas costeiras – as regiões mais produtivas dos oceanos – esses métodos podem subestimar os valores dos fluxos de CO<sub>2</sub> em certas áreas de alta PPM. Por outro lado, em uma vertente biológica, alguns estudos em ecossistemas marinhos, como estuários e recifes de coral, apresentam os cálculos do metabolismo

do ambiente, proporção da comunidade por organismos heterótrofos ou autótrofos, ou da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), entre outros.<sup>40,45,49,52,65</sup>

### Região Sul – Sudeste

O menor número de trabalhos publicados (19) foi encontrado para a região S-SE brasileira. Sendo a maioria destes realizados na região costeira entre os estados do RJ e RS (Tabela 1) com uma cobertura de coleta de dados que vão da região de Cabo Frio (RJ) até Rio Grande (RS). De todos os estados do Brasil, o ES é o que apresenta o menor número de estudos, apenas 3 (Figura 5). Os dados dessa região costeira compõem em maior parte estudos de larga escala, não havendo nenhuma publicação sobre uma área ou ecossistema específicos da costa do Estado (Tabela 1). A Figura 5 apresenta uma representação do comportamento médio da PCB dos estados do S-SE, com seus respectivos números de publicações.

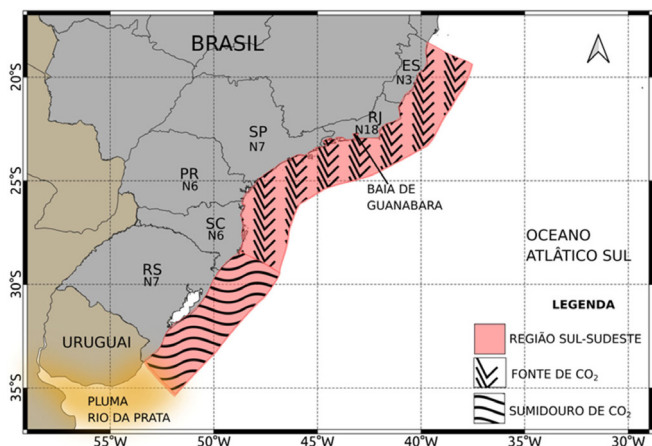
A maioria dos estudos na região S-SE (11 artigos) foi desenvolvido em ecossistemas costeiros, principalmente na Baía de Guanabara (BG), sendo assim o RJ é o estado que apresenta o maior número de artigos (Tabela 1).

A BG é a segunda maior baía brasileira e está localizada na segunda maior região metropolitana do país (Figura 5).<sup>40,41,49,91</sup> Por se tratar de um ambiente de clima tropical, com alta disponibilidade de luz, aporte de diversos rios, descarga de efluentes domésticos não tratados e áreas de manguezal, a BG possui uma alta concentração de nutrientes e, portanto, intensa atividade biológica, sendo assim considerada uma baía eutrófica.<sup>40,41,44,91</sup> A eutrofização na região estimula os processos de síntese e degradação da matéria orgânica,

causando intensa liberação de  $\text{CO}_2$  para atmosfera. No entanto, apesar da região atuar predominantemente como fonte, em ciclos nictemerais pode haver alternâncias entre sub e supersaturação de  $\text{CO}_2$  no estuário. Dessa forma, os estudos ressaltam a importância da contribuição biológica sobre a regulação de compostos de carbono (orgânicos e inorgânicos) e, conseqüentemente, como os processos biológicos afetam diretamente as trocas de  $\text{CO}_2$  entre o mar e o ar.<sup>49</sup> Resultados de observações de 24 h contínuas durante os meses de inverno austral evidenciaram que durante o dia a BG atua como sumidouro de  $\text{CO}_2$ ,<sup>49</sup> em concordância com outros estudos desenvolvidos anteriormente na área.<sup>40,41</sup> Por outro lado, durante a noite, a região atua como fonte de  $\text{CO}_2$ .<sup>49</sup> O padrão noturno pode ser justificado pelo encerramento das atividades fotoquímicas, devido à ausência de luz, quando predominam os processos de respiração celular.

Ainda no RJ, o estuário do rio Paraíba do Sul, um dos principais rios da região sudeste do Brasil, apresenta uma grande variabilidade entre as estações seca e chuvosa, modulando variações da comunidade planctônica (heterotróficos e autotróficos) na maior parte do estuário.<sup>65</sup> A região mais externa do sistema estuarino se comporta como sumidouro de  $\text{CO}_2$ . Entretanto, o estuário pode se tornar fonte de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera diante de pressões antrópicas como, por exemplo, a construção de barragens que diminuem a descarga do rio e de efluentes domésticos.<sup>65</sup>

Sobre a PCB, os estudos analisados demonstraram uma forte dependência no sentido dos fluxos de  $\text{CO}_2$  com as condições oceanográficas, devido a eventos de circulação de mesoescala (vórtices e frentes oceânicas), trocas com o continente (por rios e estuários) e ressurgência costeira na região de Cabo Frio/Cabo de São Tomé e no Cabo de Santa Marta ano (Figura 2b).<sup>33-35,37,38,50</sup>



**Figura 5.** Representação do comportamento médio da PCB na região Sul-Sudeste (S-SE, vermelho) quanto a ser fonte (chamfrado) ou sumidouro (ondas) de  $\text{CO}_2$ . Localização dos estados que compõem essa região com os respectivos números de artigos (N) encontrados na revisão, (Rio Grande do Sul (RS, N = 7), Santa Catarina (SC, N = 6), Paraná (PR, N = 6), São Paulo (SP, N = 7), Rio de Janeiro (RJ, N = 18), Espírito Santo (ES, N = 3). Em marrom a ilustração da Pluma do Rio Da Prata (PRP) no Uruguai

Na parte mais ao sul da PCB, a influência da pluma do rio da Prata (PRP) tem um papel importante no sentido de transformar a região em sumidouro de  $\text{CO}_2$  (Figura 5).<sup>33,35,37</sup> Nessa região, a combinação das baixas salinidades, que favorecem a solubilização do  $\text{CO}_2$ , e o consumo do  $\text{CO}_2$  pelos produtores primários devido à alta concentração de nutrientes, faz com que a região influenciada pela PRP fique insaturada em  $\text{CO}_2$ , favorecendo o transporte de  $\text{CO}_2$  atmosférico.<sup>31,33-35,37</sup> Além disso, esta é uma região de ciclogênese, o que favorece os processos de mistura e solubilidade do gás devido aos

menores valores de TSM, aos ventos intensos e a geração de ondas, principalmente no inverno austral.<sup>92,93</sup>

Próximo a PCB Sudeste, os fluxos de  $\text{CO}_2$  tendem a ser positivos, devido a influência da AT, massa d'água quente, salina e oligotrófica, transportada para o sul pela CB, que diminui a solubilidade do  $\text{CO}_2$  na água.<sup>29,34,38,94</sup> Nas regiões de Cabo Frio e Cabo de São Tomé ocorre o fenômeno de ressurgência costeira, com a intrusão da ACAS, uma massa de água que apresenta temperaturas e salinidades mais baixas, mais rica em nutrientes e DIC do que a água tropical em superfície.<sup>29,32</sup> Esse fenômeno tende a ocorrer com maior intensidade no verão e primavera austral, com episódios eventuais durante o resto do ano, devido a posição da ASAS.<sup>94</sup> A permanência da ACAS próximo à superfície, condiciona uma saturação de  $\text{CO}_2$ , pois apesar das condições de baixas temperaturas serem favoráveis a solubilização do gás, e os nutrientes intensificam a produção primária e todos os processos ligados a bomba biológica, a região atua como fonte de  $\text{CO}_2$ .<sup>34</sup> No entanto, em eventos de ressurgência costeira no inverno austral, quando o tempo de residência da ACAS é menor, o conjunto de condições turbulentas na atmosfera faz com que a região se torne sumidouro de  $\text{CO}_2$ .<sup>50</sup> Alguns estudos evidenciaram que a região sudeste da PCB atua como fonte de  $\text{CO}_2$  ou permanece neutra.<sup>31,33,34,37</sup> Essa variabilidade é explicada pela abordagem sinótica e pelas diferenças entre as extensões consideradas nas áreas amostrais dos estudos.

A PCB S-SE apresenta, assim, alta variabilidade em suas características oceanográficas e atmosféricas, o que nem sempre é bem representado nos estudos publicados até agora. Além disso, os estudos na região possuem uma cobertura temporal descontinuada, não representando a sazonalidade da região. Dessa forma, fica evidente a necessidade de se obter mais observações nessas regiões para uma análise mais acurada do comportamento da PCB S-SE em relação aos fluxos de  $\text{CO}_2$ .

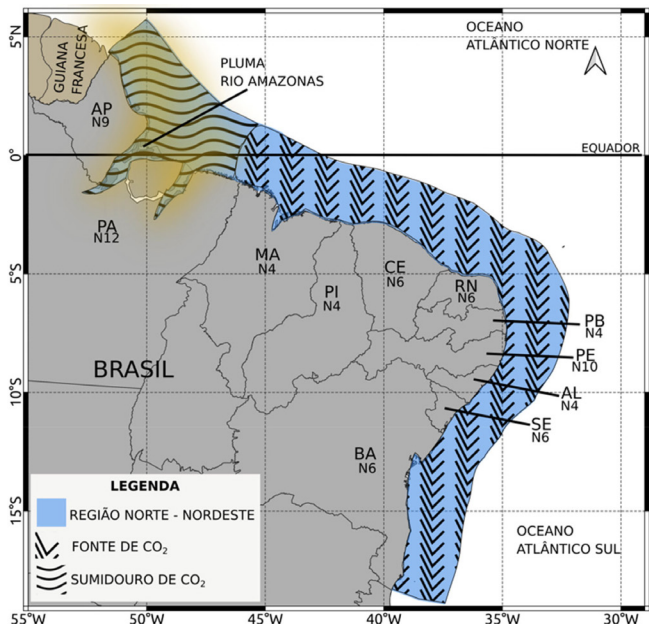
### Região Norte – Nordeste

A região N-NE foi analisada em um número maior de estudos, sendo 31 no total. No entanto é possível observar que existem apenas 4 estudos publicados que abrangem os estados de AL, PB, PI e MA, todos incluídos em estudos de larga escala e nos estudos sobre os estuários da região N-NE realizado por Noriega & Araujo<sup>53</sup> (Tabela 1). A maioria dos estudos se concentram no PE, PA e AP (Tabela 1). No estado do PE os estudos são focados nos ecossistemas costeiros, especialmente nos estuários próximos a região metropolitana de Recife, enquanto os estados do PA e AP abrangem a região da pluma do Rio Amazonas (PA) (Figura 6). A PA influencia não só a PCB, mas toda a região do Oceano Atlântico tropical oeste, podendo se estender por cerca de 300 km.<sup>95</sup> Dessa forma, dos 31 artigos encontrados para a região N-NE, 45% (14 artigos) discutem de forma direta a influência da PA nos fluxos de  $\text{CO}_2$  evidenciando que parte oeste do Oceano Atlântico Equatorial se comporta como sumidouro de  $\text{CO}_2$  atmosférico, por conta principalmente da contribuição dos rios Amazonas e Orinoco (Venezuela).<sup>77</sup> Outros estudos realizados próximos da PA mostraram se tratar de uma região que se comporta como um fraco sumidouro de  $\text{CO}_2$ .<sup>71,75</sup> A sazonalidade climática tem forte efeito na região, influenciando no volume da descarga do rio Amazonas.<sup>77</sup> Por apresentar apenas duas estações bem marcadas (períodos de chuvas e seca), o volume de água do rio Amazonas que entra no sistema do Oceano Atlântico Tropical varia em 50% de uma estação para outra.<sup>95</sup> Além disso, a extensão e volume da PA podem ser alterados por eventos extremos de precipitação ou de seca na região continental da bacia hidrográfica do rio Amazonas, devido à posição da ZCIT (Figura 3),<sup>64,72</sup> e da ocorrência de eventos La Niña (El Niño), que podem aumentar (diminuir) a descarga do rio.<sup>15,19</sup> Além disso, o



comportamento e extensão da PA também está intimamente ligado às correntes de superfície oceânicas que atuam na região (Figura 3).

Estudos recentes na região demonstraram uma forte influência dos processos de mesoescala nas variações mensais da extensão da PA,<sup>15,17,19,72,96</sup> e consequentemente nos valores da pCO<sub>2</sub> e fluxos de CO<sub>2</sub>, o que levaria a condições de insaturação de CO<sub>2</sub> em superfície na PA. Assim, de forma geral, ainda não existe um consenso quanto à variabilidade sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> na região da PA, porém, a maioria dos autores concorda que a região atua como sumidouro de CO<sub>2</sub> na maior parte do ano (Figura 6).



**Figura 6.** Representação do comportamento médio da PCB na região Norte-Nordeste (N-NE, azul) quanto a ser fonte (chamfrado) ou sumidouro (ondas) de CO<sub>2</sub>. Localização dos estados que compõem essa região com os respectivos números de artigos (N) encontrados na revisão, Bahia (BA, N = 6), Sergipe (SE, N = 6), Alagoas (AL, N = 4), Pernambuco (PE, N = 10), Paraíba (PB, N = 4), Rio Grande do Norte (RN, N = 4), Ceará (CE, N = 6), Piauí (PI, N = 4), Maranhão (MA, N = 4), Pará (PA, N = 12), Amapá (AP, N = 9). Em marrom a ilustração da Pluma do Rio Amazonas (PA)

Fora da zona de influência da PA, os trabalhos mostram que a PCB na região N-NE atua como fonte de CO<sub>2</sub>, em função das condições físico-químicas (altos valores de TSM e salinidade), com intensa atuação do vento e recebendo águas oceânicas oligotróficas (Figura 6).<sup>17,37,51,59,67</sup> Áreas na PCB N-NE sujeitas a processos de precipitação de carbonato de cálcio, pela presença de recifes de corais, também atuam como fontes de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, com diferença significativa para regiões externas aos recifes de coral.<sup>65</sup>

Na região nordeste do Brasil também foi observada uma forte influência da ZCIT e ENSO, especialmente no ano de 2010, quando foram registrados os maiores valores de fluxo de CO<sub>2</sub> positivo.<sup>59</sup> Os autores associaram esse aumento a três processos oceanográficos: Oscilação do Atlântico Norte, Oscilação Multidecadal do Atlântico e El Niño, sendo os últimos dois os mais influentes. Uma das implicações da conjuntura desses processos é que a ZCIT fica posicionada mais ao norte e com isso faz com que a TSM e a salinidade aumentem na região NE e, consequentemente, favoreçam as condições físico-químicas para que essa região atue como fonte de CO<sub>2</sub>.

Assim como na região S-SE, diversos autores descrevem o comportamento de ecossistemas costeiros da região N-NE como, por exemplo, estuários, lagunas e recifes de coral. Em um estudo foram analisados 28 estuários, e observou-se um padrão de comportamento

como fontes de CO<sub>2</sub>.<sup>53</sup> A área de estudo foi dividida em 4 regiões de acordo com as condições climáticas classificadas segundo Köppen-Geiger.<sup>97</sup> Os autores verificaram que os estuários na região de clima de floresta tropical (Af) são os que tem a maior contribuição como fonte de CO<sub>2</sub>, enquanto as regiões de clima semiárido (BSh) são as que menos contribuem com emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O estuário do rio Capibaribe, por exemplo, que corta a região metropolitana do Recife (PE), atua como fonte de CO<sub>2</sub>, com a intensificação dos valores positivos dos fluxos na estação chuvosa,<sup>57,58</sup> ao passo que o estuário no delta do Rio São Francisco, na divisa entre os estados de SE e AL, comporta-se como um sumidouro de CO<sub>2</sub>,<sup>54</sup> e as condições físico-químicas locais se aproximariam daquelas encontradas no delta do Rio Paraíba do Sul.<sup>45</sup>

Os recifes de corais em Coroa Vermelha (sul da Bahia) e do Parque Estadual Marinho da Pedra da Risca do Meio foram descritos como sistemas fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, sendo a precipitação de CaCO<sub>3</sub> (metabolismo inorgânico) mais importante que a respiração e PPM (metabolismo orgânico).<sup>52,65</sup>

Portanto, não fosse a contribuição significativa da PA como sumidouro de CO<sub>2</sub>, toda a região N-NE poderia ser considerada como fonte de CO<sub>2</sub> para atmosfera (Figura 6). É preciso ressaltar novamente a necessidade de mais observações e de longo prazo, para que a influência de diferentes forçantes químicas, físicas e biológicas, além da mistura de águas fluviais com as águas na plataforma, sejam mais bem compreendidas.

#### Estudos de abordagem global em relação ao Brasil

Dentre os resultados das buscas na literatura, foram encontrados 53 artigos de estudos globais das zonas costeiras, sendo uma combinação de estudos sobre os mesmos ecossistemas encontrados na costa do Brasil e outros sobre as plataformas continentais do mundo ou do Oceano Atlântico Sul.

As zonas costeiras são consideradas sumidouro de CO<sub>2</sub>, com uma média global variando entre -0,45 Pg C ano<sup>-1</sup> a -0,20 Pg C ano<sup>-1</sup>, de acordo com as estimativas de diversos autores.<sup>14,98-104</sup>

Com a implementação de novas observações e métodos de análise de dados, destacando principalmente as variações sazonais, sobre o papel regional da plataforma continental no ciclo global de carbono, as incertezas vêm diminuindo.<sup>16,103,105-107</sup> No entanto, é um consenso de que a falta de dados *in situ*, aliada a processos oceanográficos e meteorológicos de grande complexidade, faz com que as estimativas continuem apresentando inconsistências, especialmente para as regiões do hemisfério Sul.<sup>8,14,16,68,98,99,103,104,107</sup> No contexto global, a PCB é sempre representada de forma contínua, ou separada entre a sua parte tropical e subtropical, e assim, apesar de alguns apresentarem concordância com a direção dos fluxos na média anual, a “suavização” dos processos costeiros pode levar a interpretações incoerentes do comportamento da costa brasileira em determinadas áreas.

Análises de dados observacionais indicam que a PA atua principalmente como sumidouro de CO<sub>2</sub>,<sup>19</sup> opondo-se ao que era estimado em estudos de climatologias globais que consideram essa área como fonte de CO<sub>2</sub>.<sup>8,10</sup> Os autores atribuem essa diferença ao fato de as climatologias globais utilizarem uma resolução espacial baixa (4° x 5° e 10° de 1° x 1°)<sup>8</sup> e, principalmente, à falta de dados para as regiões costeiras no geral. Por outro lado, análises de dados de satélite, cujas resoluções espaciais são maiores, mas ainda sem cobertura para as regiões costeiras (principalmente para os dados de salinidade/ 0,5° x 0,5°), apresentam a região oceânica próxima a PCB atuando como fonte de CO<sub>2</sub> para atmosfera,<sup>74</sup> dado que corrobora os dados de climatologia e ressalta a importância da escala espacial e temporal utilizada para os estudos globais, contribuindo para uma interpretação errônea da contribuição da PCB no balanço de carbono. Assim, autores que

utilizaram a escala de 25 km<sup>16,103,104,108</sup> para análises da região costeira, apresentaram resultados mais próximos aos encontrados por estudos que utilizam dados coletados *in situ*. Esse é um bom sinal, visto que muitos desses dados estão depositados no repositório SOCAT, utilizado para a validação dos resultados dos estudos globais.

Dessa forma, diversos estudos elaboram suas discussões em relação aos tipos de processos oceanográficos (tipo de corrente e massas d'água, presença de ressurgência costeira, etc.) e dos ecossistemas costeiros, como estuários, manguezais e marismas,<sup>13,98,100,109</sup> indicando, assim, que a presença desses processos nas zonas costeiras tem influência direta no comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub>, e que é preciso levar em consideração as particularidades de cada região para definir o comportamento da PCB como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub> de forma acurada.

De forma geral, o comportamento dos estuários na região N-NE, como fontes de CO<sub>2</sub>, corrobora com o esperado para estuários em estudos globais.<sup>53,100</sup> Porém, é importante salientar que geralmente, na região da pluma dos rios o cenário se inverte e muitas vezes são encontrados valores negativos de fluxo de CO<sub>2</sub>, indicando regiões de sumidouro de CO<sub>2</sub>.<sup>45,54,110</sup> Os estudos em recifes de corais apresentaram resultados similares àqueles encontrados ao redor do mundo, como Polinésia,<sup>111</sup> Austrália<sup>112</sup> e Havaí,<sup>113</sup> onde os recifes são considerados como fonte de CO<sub>2</sub> para atmosfera.

## CONCLUSÕES

Até agora, é possível concluir que devido ao seu tamanho continental, a PCB apresenta uma variação latitudinal quanto ao seu comportamento fonte/sumidouro, em que da parte da região norte (que não é influenciada pela PA) e nordeste se comportam como fonte de CO<sub>2</sub>, a região sudeste se apresentando fonte fraca, que tende ao equilíbrio, e a região sul como sumidouro de CO<sub>2</sub>. Já a região norte próxima da PA se comporta como sumidouro de CO<sub>2</sub>. Além disso, a maioria dos ecossistemas costeiros encontrados na PCB, como estuários e corais, apresentam comportamento de fonte de CO<sub>2</sub>, devido à forte contribuição biológica e/ou antrópica.

Esse artigo mapeou a distribuição por estados de estudos sobre o comportamento da zona costeira brasileira como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub>. Foram encontrados 50 artigos para a PCB, e 53 publicados com a temática dos fluxos de CO<sub>2</sub> nas zonas costeiras até o presente. As publicações na região N-NE se concentram na região da PA e no estado de PE, enquanto os estados AL, PB, PI e MA foram os menos estudados ao longo dos anos. A região S-SE foi a que menos apresentou artigos na PCB, concentrando as publicações em diferentes ecossistemas costeiros, principalmente no estado do RJ. Em contrapartida, o ES foi o estado com menor cobertura de literatura, com apenas 3 artigos. Foi observado que a maioria dos estudos parte de uma divisão regional entre S-SE e N-NE, apenas o Padin *et al.*<sup>37</sup> apresenta um estudo que envolve as duas regiões em suas observações.

Assim como em outras regiões do hemisfério Sul, a PCB necessita de mais investigações com maiores resoluções temporais e espaciais. Por fim, todos os trabalhos ressaltam a forte influência de eventos oceanográficos e meteorológicos de mesoescala nos fluxos de CO<sub>2</sub>, que precisam ser mais bem explorados, ressaltando a necessidade de programas nacionais de monitoramento, para assim obter uma resposta mais precisa da atuação da PCB nos fluxos de CO<sub>2</sub> e seu impacto no balanço de carbono global.

## AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos ao dr. O. J. Luiz da Universidade Charles Darwin (Austrália) pela sua disponibilidade e sua ajuda com a busca e organização dos artigos, essencial para o desenvolvimento

deste manuscrito. L. C. da Cunha agradece a bolsa de pesquisa Prociência/UERJ e H. M. J. Affe agradece a bolsa Pós-Doutorado Nota 10/FAPERJ. L. C. da Cunha e L. Q. Pinho agradecem a bolsa de pesquisa prociência UERJ. R. Avelina agradece a bolsa de doutorado CAPES No 88887.486629/2020-00 e R. Oliveira agradece a bolsa de doutorado CAPES nº 88887.602733/2021-00.

## REFERÊNCIAS

- Sarmiento, J. L.; Gruber, N.; *Phys. Today* **2002**, *55*, 30. [Crossref]
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W.; Andrew, R. M.; Hauck, J.; Olsen, A.; Peters, G. P.; Peters, W.; Pongratz, J.; Sitch, S.; Le Quééré, C.; Canadell, J. G.; Ciais, P.; Jackson, R. B.; Alin, S.; Aragão, L. E. O. C.; Arneeth, A.; Arora, V.; Bates, N. R.; Becker, M.; Benoit-Cattin, A.; Bittig, H. C.; Bopp, L.; Bultan, S.; Chandra, N.; Chevallier, F.; Chini, L. P.; Evans, W.; Florentie, L.; Forster, P. M.; Gasser, T.; Gehlen, M.; Gilfillan, D.; Gkritzalis, T.; Gregor, L.; Gruber, N.; Harris, I.; Hartung, K.; Haverd, V.; Houghton, R. A.; Ilyina, T.; Jain, A. K.; Joetzjer, E.; Kadono, K.; Kato, E.; Kitidis, V.; Korsbakken, J. I.; Landschützer, P.; Lefèvre, N.; Lenton, A.; Lienert, S.; Liu, Z.; Lombardozi, D.; Marland, G.; Metzl, N.; Munro, D. R.; Nabel, J. E. M. S.; Nakaoka, S.-I.; Niwa, Y.; O'Brien, K.; Ono, T.; Palmer, P. I.; Pierrot, D.; Poulter, B.; Resplandy, L.; Robertson, E.; Rödenbeck, C.; Schwinger, J.; Séférian, R.; Skjelvan, I.; Smith, A. J. P.; Sutton, A. J.; Tanhua, T.; Tans, P. P.; Tian, H.; Tilbrook, B.; van der Werf, G.; Vuichard, N.; Walker, A. P.; Wanninkhof, R.; Watson, A. J.; Willis, D.; Wiltshire, A. J.; Yuan, W.; Yue, X.; Zaehle, S.; *Earth Syst. Sci. Data* **2020**, *12*, 3269. [Crossref]
- Takahashi, T.; Sutherland, S. C.; Wanninkhof, R.; Sweeney, C.; Feely, R. A.; Chipman, D. W.; Hales, B.; Friederich, G.; Chavez, F.; Sabine, C.; Watson, A.; Bakker, D. C. E.; Schuster, U.; Metzl, N.; Yoshikawa-Inoue, H.; Ishii, M.; Midorikawa, T.; Nojiri, Y.; Körtzinger, A.; Steinhoff, T.; Hoppema, M.; Olafsson, J.; Arnarson, T. S.; Tilbrook, B.; Johannessen, T.; Olsen, A.; Bellerby, R.; Wong, C. S.; Delille, B.; Bates, N. R.; de Baar, H. J. W.; *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **2009**, *56*, 554. [Crossref] [PubMed]
- Millero, F. J. In *Chemical Oceanography*; CRC Press, 2013, ch. Descriptiv.
- Williams, R. G.; Follows, M. J.; *Ocean Dynamics and the Carbon Cycle*; Cambridge University Press: Cambridge, 2011.
- Weiss, R. F.; *Mar. Chem.* **1974**, *2*, 203. [Crossref]
- Wanninkhof, R.; *J. Geophys. Res.* **1992**, *97*, 7373. [Crossref]
- Takahashi, T.; Sutherland, S. C.; Wanninkhof, R.; Sweeney, C.; Feely, R. A.; Chipman, D. W.; Hales, B.; Friederich, G.; Chavez, F.; Sabine, C.; Watson, A.; Bakker, D. C. E.; Schuster, U.; Metzl, N.; Yoshikawa-Inoue, H.; Ishii, M.; Midorikawa, T.; Nojiri, Y.; Körtzinger, A.; Steinhoff, T.; Hoppema, M.; Olafsson, J.; Arnarson, T. S.; Tilbrook, B.; Johannessen, T.; Olsen, A.; Bellerby, R.; Wong, C. S.; Delille, B.; Bates, N. R.; de Baar, H. J. W.; *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **2009**, *56*, 554. [Crossref] [PubMed]
- Bakker, D. C. E.; Pfeil, B.; Landa, C. S.; Metzl, N.; O'Brien, K. M.; Olsen, A.; Smith, K.; Cosca, C.; Harasawa, S.; Jones, S. D.; Nakaoka, S.; Nojiri, Y.; Schuster, U.; Steinhoff, T.; Sweeney, C.; Takahashi, T.; Tilbrook, B.; Wada, C.; Wanninkhof, R.; Alin, S. R.; Balestrini, C. F.; Barbero, L.; Bates, N. R.; Bianchi, A. A.; Bonou, F.; Boutin, J.; Bozec, Y.; Burger, E. F.; Cai, W.-J.; Castle, R. D.; Chen, L.; Chierici, M.; Currie, K.; Evans, W.; Featherstone, C.; Feely, R. A.; Fransson, A.; Goyet, C.; Greenwood, N.; Gregor, L.; Hankin, S.; Hardman-Mountford, N. J.; Harlay, J.; Hauck, J.; Hoppema, M.; Humphreys, M. P.; Hunt, C. W.; Huss, B.; Ibáñez, J. S. P.; Johannessen, T.; Keeling, R.; Kitidis, V.; Körtzinger, A.; Kozyr, A.; Krasakopoulou, E.; Kuwata, A.; Landschützer, P.; Lauvset, S. K.; Lefèvre, N.; Lo Monaco, C.; Manke, A.; Mathis, J. T.; Merlivat, L.; Millero, F. J.; Monteiro, P. M. S.; Munro, D. R.; Murata, A.; Newberger, T.; Omar, A. M.; Ono, T.; Paterson, K.; Pearce,

- D.; Pierrot, D.; Robbins, L. L.; Saito, S.; Salisbury, J.; Schlitzer, R.; Schneider, B.; Schweitzer, R.; Sieger, R.; Skjelvan, I.; Sullivan, K. F.; Sutherland, S. C.; Sutton, A. J.; Tadokoro, K.; Telszewski, M.; Tuma, M.; van Heuven, S. M. A. C.; Vandemark, D.; Ward, B.; Watson, A. J.; Xu, S.; *Earth Syst. Sci. Data* **2016**, *8*, 383. [Crossref]
10. Landschützer, P.; Gruber, N.; Bakker, D. C. E.; Schuster, U.; *Global Biogeochem. Cycles* **2014**, *28*, 927. [Crossref]
11. Gruber, N.; Clement, D.; Carter, B. R.; Feely, R. A.; van Heuven, S.; Hoppema, M.; Ishii, M.; Key, R. M.; Kozyr, A.; Lauvset, S. K.; Monaco, C. L.; Mathis, J. T.; Murata, A.; Olsen, A.; Perez, F. F.; Sabine, C. L.; Tanhua, T.; Wanninkhof, R.; *Science (80-. )* **2019**, *363*, 1193. [Crossref] [PubMed]
12. Borges, A. V.; Delille, B.; Frankignoulle, M.; *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*, n/a. [Crossref]
13. Cai, W. J.; *Ann. Rev. Mar. Sci.* **2011**, *3*, 123. [Crossref] [PubMed]
14. Bauer, J. E.; Cai, W. J.; Raymond, P. A.; Bianchi, T. S.; Hopkinson, C. S.; Regnier, P. A. G.; *Nature* **2013**, *504*, 61. [Crossref] [PubMed]
15. Lefèvre, N.; Montes, M. F.; Gaspar, F. L.; Rocha, C.; Jiang, S.; De Araújo, M. C.; Severino Pino Ibánhez, J.; *Front. Mar. Sci.* **2017**, *4*, 1. [Crossref]
16. Laruelle, G. G.; Landschützer, P.; Gruber, N.; Ti, J. L.; Delille, B.; Regnier, P.; *Biogeosciences* **2017**, *14*, 4545. [Crossref]
17. Araujo, M.; Noriega, C.; Medeiros, C.; Lefèvre, N.; Ibánhez, J. S. P.; Flores Montes, M.; Silva, A. C. da; Santos, M. de L.; *J. Mar. Syst.* **2019**, *189*, 62. [Crossref]
18. Roobaert, A.; Laruelle, G. G.; Landschützer, P.; Gruber, N.; Chou, L.; Regnier, P.; *Global Biogeochem. Cycles* **2019**, *33*, 1693. [Crossref]
19. Ibánhez, J. S. P.; Diverrès, D.; Araujo, M.; Lefèvre, N.; *Global Biogeochem. Cycles* **2015**, *29*, 1640. [Crossref]
20. Denvil-Sommer, A.; Gehlen, M.; Vrac, M.; Mejia, C.; *Geosci. Model Dev.* **2019**, *12*, 2091. [Crossref]
21. Le Quééré, C.; Jackson, R. B.; Jones, M. W.; Smith, A. J. P.; Abernethy, S.; Andrew, R. M.; De-Gol, A. J.; Willis, D. R.; Shan, Y.; Canadell, J. G.; Friedlingstein, P.; Creutzig, F.; Peters, G. P.; *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 647. [Crossref]
22. Friedlingstein, P.; Jones, M. W.; O'Sullivan, M.; Andrew, R. M.; Bakker, D. C. E.; Hauck, J.; Quééré, C. Le; Peters, G. P.; Peters, W.; Pongratz, J.; Sitch, S.; Canadell, J. G.; Ciais, P.; Jackson, R. B.; Alin, S. R.; Anthoni, P.; Bates, N. R.; Becker, M.; Bellouin, N.; Bopp, L.; Chau, T. T. T.; Chevallier, F.; Chini, L. P.; Cronin, M.; Currie, K. I.; Decharme, B.; Djeutchouang, L.; Dou, X.; Evans, W.; Feely, R. A.; Feng, L.; Gasser, T.; Gilfillan, D.; Gkritzalis, T.; Grassi, G.; Gregor, L.; Gruber, N.; Gürses, Ö.; Harris, I.; Houghton, R. A.; Hurtt, G. C.; Iida, Y.; Ilyina, T.; Luijckx, I. T.; Jain, A. K.; Jones, S. D.; Kato, E.; Kennedy, D.; Goldewijk, K. K.; Knauer, J.; Korsbakken, J. I.; Körtzinger, A.; Landschützer, P.; Lauvset, S. K.; Lefèvre, N.; Lienert, S.; Liu, J.; Marland, G.; McGuire, P. C.; Melton, J. R.; Munro, D. R.; Nabel, J. E. M. S.; Nakaoka, S.-I.; Niwa, Y.; Ono, T.; Pierrot, D.; Poulter, B.; Rehder, G.; Resplandy, L.; Robertson, E.; Rödenbeck, C.; Rosan, T. M.; Schwinger, J.; Schwingshackl, C.; Séférian, R.; Sutton, A. J.; Sweeney, C.; Tanhua, T.; Tans, P. P.; Tian, H.; Tilbrook, B.; Tubiello, F.; Werf, G. van der; Vuichard, N.; Wada, C.; Wanninkhof, R.; Watson, A.; Willis, D.; Wiltshire, A. J.; Yuan, W.; Yue, C.; Yue, X.; Zaehle, S.; Zeng, J.; *Earth Syst. Sci. Data Discuss. [preprint]* **2021**.
23. Horta, P.; Pinho, P. F.; Gouvêa, L.; Grimaldi, G.; Destri, G.; Mueller, C. M.; Rocha, L.; Barufi, J. B.; Rorig, L.; Assis, J.; da Cunha, L. C.; *Sustentabilidade em Debate* **2020**, *11*, 405. [Crossref]
24. Harari, J.; *Noções de Oceanografia*; 2021.
25. Mohriak, W. U.; Torres, L. C.; *Rev. USP* **2017**, *59*. [Crossref]
26. Castro, B. M.; Brandini, F. P.; Dottori, M.; Fortes, J. F.; *Rev. USP* **2017**, *113*, 7. [Crossref]
27. Ponsoni, L.; *Sistema Corrente do Brasil: Uma Proposta para Utilização de Perfis de XBT em seu Estudo Dinâmico*; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil, 2010. [Link] acessado em julho 2023
28. Calado, L.; *Dinâmica da Interação da Atividade de Meso-Escala da Corrente do Brasil com o Fenômeno da Ressurgência Costeira ao Largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé*, RJ; Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil, 2006. [Link] acessado em Julho 2023
29. Silveira, I. C. A. da; Schmidt, A. C. K.; Campos, E. J. D.; Godoi, S. S. de; Ikeda, Y.; *Rev. Bras. Oceanogr.* **2000**, *48*, 171. [Crossref] [PubMed]
30. Carvalho, M. Â. V. de; Oyama, M. D.; *Rev. Bras. Meteorol.* **2013**, *28*, 305. [Crossref]
31. Arruda, R.; Calil, P. H. R.; Bianchi, A. A.; Doney, S. C.; Gruber, N.; Lima, I.; Turi, G.; *Biogeosciences* **2015**, *12*, 5793. [Crossref]
32. Carvalho-Borges, M. de; Orselli, I. B. M.; Ferreira, M. L. de C.; Kerr, R.; *J. Mar. Syst.* **2018**, *187*, 62. [Crossref]
33. de Oliveira Carvalho, A. da C.; Kerr, R.; Tavano, V. M.; Mendes, C. R. B.; *Biogeochemistry* **2022**, *159*, 139. [Crossref]
34. Ito, R. G.; Garcia, C. A. E.; Tavano, V. M.; *Cont. Shelf Res.* **2016**, *119*, 68. [Crossref]
35. Lencina-avila, J. M.; Ito, R. G.; Garcia, C. A. E.; Tavano, V. M.; *Deep. Res. Part I* **2016**, *115*, 175. [Crossref]
36. Liutti, C. C.; Kerr, R.; Monteiro, T.; Orselli, I. B. M.; Ito, R. G.; Garcia, C. A. E.; *Mar. Chem.* **2021**, *236*, 104020. [Crossref]
37. Padin, X. A.; Vazquez-Rodriguez, M.; Castaao, M.; Velo, A.; Alonso-Perez, F.; Gago, J.; Gilcoto, M.; AlvarezM.; Pardo, P. C.; De La Paz, M.; Rios, A. F.; Perez, F. F.; *Biogeosciences* **2010**, *7*, 1587. [Crossref]
38. Gonçalves Ito, R.; Schneider, B.; Thomas, H.; *J. Mar. Syst.* **2005**, *56*, 227. [Crossref]
39. Abril, G.; Cotovicz Jr, L.; Nepomuceno, A.; Erbas, T.; Costa, S.; Ramos, V.; Moser, G.; Fernandes, A.; Negri, E.; Knoppers, B. A.; Machado, W.; Bernardes, M.; Vantrepotte, V.; *Labomar Arq. Ciencias do Mar* **2022**, *55*, 461. [Crossref]
40. Brandini, N.; Rodrigues, A. P. de C.; Abreu, I. M.; Cotovicz Junior, L. C.; Knoppers, B. A.; Machado, W.; *Acta Limnol. Bras.* **2016**, *28*, [Crossref]
41. Cotovicz, L. C.; Knoppers, B. A.; Brandini, N.; Costa Santos, S. J.; Abril, G.; *Biogeosciences* **2015**, *12*, 6125. [Crossref]
42. Cotovicz, L. C.; Knoppers, B. A.; Brandini, N.; Poirier, D.; Costa Santos, S. J.; Abril, G.; *Limnol. Oceanogr.* **2016**, *61*, S238. [Crossref]
43. Cotovicz, L. C.; Knoppers, B. A.; Brandini, N.; Poirier, D.; Costa Santos, S. J.; Cordeiro, R. C.; Abril, G.; *Biogeochemistry* **2017**, *137*, 1. [Crossref]
44. Cotovicz, L. C.; Knoppers, B. A.; Deirmendjian, L.; Abril, G.; *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2019**, *220*, 185. [Crossref]
45. Cotovicz, L. C.; Vidal, L. O.; de Rezende, C. E.; Bernardes, M. C.; Knoppers, B. A.; Sobrinho, R. L.; Cardoso, R. P.; Muniz, M.; dos Anjos, R. M.; Biehler, A.; Abril, G.; *Mar. Chem.* **2020**, *226*, 103869. [Crossref]
46. Cotovicz, L. C.; Knoppers, B. A.; Régis, C. R.; Tremmel, D.; Costa-Santos, S.; Abril, G.; *Biogeochemistry* **2021**, *156*, 231. [Crossref]
47. Cotovicz, L. C.; Ribeiro, R. P.; Régis, C. R.; Bernardes, M.; Sobrinho, R.; Vidal, L. O.; Tremmel, D.; Knoppers, B. A.; Abril, G.; *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2021**, *28*, 38173. [Crossref] [PubMed]
48. Erbas, T.; Marques, A.; Abril, G.; *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2021**, *263*, [Crossref]
49. Marotta, H.; Peixoto, R. B.; Fernandes, F.; Oliveira, V. P. De; Costa, R.; Keim, R.; Musetti, C.; Cunha, C.; Moser, G.; Pollery, R.; Pinho, L.; *Oecologia Australis* **2020**, *24*, 365. [Crossref]
50. Oliveira, R. R.; Pezzi, L. P.; Souza, R. B.; Santini, M. F.; Cunha, L. C.; Pacheco, F. S.; *Cont. Shelf Res.* **2019**, *181*, 135. [Crossref]
51. Bonou, F. K.; Noriega, C.; Lefèvre, N.; Araujo, M.; *Dyn. Atmos. Ocean.* **2016**, *73*, 47. [Crossref]
52. Longhini, C. M.; Souza, M. F. L.; Silva, A. M.; *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2015**, *166*, 13. [Crossref]
53. Noriega, C.; Araujo, M.; *Sci. Rep.* **2014**, *4*, 1. [Crossref]

54. Abril, G.; Libardoni, B. G.; Brandini, N.; Cotovicz, L. C.; Medeiros, P. R. P.; Cavalcante, G. H.; Knoppers, B. A.; *Mar. Chem.* **2021**, *233*, 103983. [Crossref]
55. Araujo, M.; Noriega, C.; Lefèvre, N.; *Front. Mar. Sci.* **2014**, *1*, 1. [Crossref]
56. Bertini, L.; Braga, E. de S.; *J. Geosci. Environ. Prot.* **2022**, *10*, 135. [Crossref]
57. Gaspar, F. L.; Pinheiro, B. R.; Noriega, C. E. D.; Araujo, M.; Lefèvre, N.; Montes, M. de J. F.; *Brazilian J. Oceanogr.* **2018**, *66*, 115. [Crossref]
58. Guenther, M.; Araújo, M.; Noriega, C.; Flores-Montes, M.; Gonzalez-Rodriguez, E.; Neumann-Leitão, S.; *Mar. Ecol.* **2017**, *38*, 1. [Crossref]
59. Lefèvre, N.; Caniaux, G.; Janicot, S.; Gueye, A. K.; *J. Geophys. Res. Ocean.* **2013**, *118*, 1645. [Crossref]
60. Noriega, C. E. D.; Araujo, M.; Lefèvre, N.; *Estuaries and Coasts* **2013**, *36*, 1054. [Crossref]
61. Noriega, C.; Araujo, M.; Lefèvre, N.; Montes, M. F.; Gaspar, F.; Veleda, D.; *Reg. Environ. Chang.* **2014**, *15*, 619. [Crossref]
62. Noriega, C.; Araujo, M.; Flores Montes, M.; Lefèvre, N.; *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* **2015**, *50*, 603. [Crossref]
63. Carvalho, A. C. O.; Marins, R. V.; Dias, F. J. S.; Rezende, C. E.; Lefèvre, N.; Cavalcante, M. S.; Eschrique, S. A.; *J. Mar. Syst.* **2017**, *173*, 70. [Crossref]
64. Lefèvre, N.; Urbano, D. F.; Gallois, F.; Diverrès, D.; *J. Geophys. Res. Ocean.* **2014**, *119*, 646. [Crossref]
65. Cotovicz, L. C.; Chielle, R.; Marins, R. V.; *Cont. Shelf Res.* **2020**, *204*, 104175. [Crossref]
66. Souza, M. F. L.; Gomes, V. R.; Freitas, S. S.; Andrade, R. C. B.; Knoppers, B.; *Estuaries and Coasts* **2009**, *32*, 111. [Crossref]
67. Lefèvre, N.; da Silva Dias, F. J.; de Torres, A. R.; Noriega, C.; Araujo, M.; de Castro, A. C. L.; Rocha, C.; Jiang, S.; Ibánhez, J. S. P.; *Cont. Shelf Res.* **2017**, *141*, 38. [Crossref]
68. Araujo, M.; Noriega, C.; Hounsou-gbo, G. A.; Veleda, D.; Araujo, J.; Bruto, L.; Feitosa, F.; Flores-Montes, M.; Lefèvre, N.; Melo, P.; Otsuka, A.; Travassos, K.; Schwamborn, R.; Neumann-Leitão, S.; *Front. Microbiol.* **2017**, *8*, 1. [Crossref]
69. Cooley, S. R.; Coles, V. J.; Subramaniam, A.; Yager, P. L.; *Global Biogeochem. Cycles* **2007**, *21*, 1. [Crossref]
70. Ibánhez, J. S. P.; Araujo, M.; Lefèvre, N.; *Geophys. Res. Lett.* **2016**, *43*, 3804. [Crossref]
71. Körtzinger, A.; *Geophys. Res. Lett.* **2003**, *30*, 2. [Crossref]
72. Lefèvre, N.; Diverrès, D.; Gallois, F.; *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.* **2010**, *62*, 595. [Crossref]
73. Medeiros, P. M.; Seidel, M.; Ward, N. D.; Carpenter, E. J.; Gomes, H. R.; Niggemann, J.; Krusche, A. V.; Richey, J. E.; Yager, P. L.; Dittmar, T.; *Global Biogeochem. Cycles* **2015**, *29*, 677. [Crossref]
74. Valerio, A. M.; Kampel, M.; Ward, N. D.; Sawakuchi, H. O.; Cunha, A. C.; Richey, J. E.; *Cont. Shelf Res.* **2021**, *215*, 104348. [Crossref]
75. Cooley, S. R.; Yager, P. L.; *J. Geophys. Res.* **2006**, *111*, C08018. [Crossref]
76. Ibánhez, J. S. P.; Flores, M.; Lefèvre, N.; *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 1. [Crossref]
77. Ternon, J. ; Oudot, C.; Dessier, A.; Diverrès, D.; *Mar. Chem.* **2000**, *68*, 183. [Crossref]
78. Liss, P. S.; Merlivat, L.; In *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling* Springer Netherlands: Dordrecht, 1986.
79. Wanninkhof, R.; Knox, M.; *Limnol. Oceanogr.* **1996**, *41*, 689. [Crossref]
80. Wanninkhof, R.; McGillis, W. R.; *Geophys. Res. Lett.* **1999**, *26*, 1889. [Crossref]
81. Raymond, P. A.; Cole, J. J.; *Estuaries* **2001**, *24*, 312. [Crossref]
82. Sweeney, C.; Gloor, E.; Jacobson, A. R.; Key, R. M.; McKinley, G.; Sarmiento, J. L.; Wanninkhof, R.; *Global Biogeochem. Cycles* **2007**, *21*, GB2015. [Crossref]
83. Abril, G.; Commarieu, M. V.; Sottolichio, A.; Bretel, P.; Guérin, F.; *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2009**, *83*, 342. [Crossref]
84. Wanninkhof, R.; *Limnol. Oceanogr. Methods* **2014**, *12*, 351. [Crossref] [PubMed]
85. Nightingale, P. D.; Malin, G.; Law, C. S.; Watson, A. J.; Liss, P. S.; Liddicoat, M. I.; Boutin, J.; Upstill-Goddard, R. C.; *Global Biogeochem. Cycles* **2000**, *14*, 373. [Crossref]
86. Borges, A. V.; Vanderborcht, J.-P.; Schiettecatte, L.-S.; Gazeau, F.; Ferrón-Smith, S.; Delille, B.; Frankignoulle, M.; *Estuaries* **2004**, *27*, 593. [Crossref]
87. Pierrot, D.; Neill, C.; Sullivan, K.; Castle, R.; Wanninkhof, R.; Lüger, H.; Johannessen, T.; Olsen, A.; Feely, R. A.; Cosca, C. E.; *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **2009**, *56*, 512. [Crossref]
88. Emerson, S. R.; Hedgesm, J. i; *Chemical oceanography and the marine carbon cycle*; Cambridge University Press: Cambridge, 2008.
89. Miller, S. D.; Marandino, C.; Saltzman, E. S.; *J. Geophys. Res. Atmos.* **2010**, *115*, 1. [Crossref]
90. da Cunha, L. C.; Buitenhuis, E. T.; *Biogeosciences* **2013**, *10*, 6357. [Crossref]
91. Cotovicz, L. C.; Libardoni, B. G.; Brandini, N.; Knoppers, B. A.; Abril, G.; *Quim. Nova* **2016**, *39*, 1206. [Crossref]
92. Gramscianinov, C. B.; Hodges, K. I.; Camargo, R.; *Clim. Dyn.* **2019**, *53*, 4115. [Crossref]
93. Gramscianinov, C. B.; Campos, R. M.; Guedes Soares, C.; Camargo, R. de; *Ocean Eng.* **2020**, *213*, [Crossref]
94. Castro, B.; Brandini, F.; Pires-Vanin, A.; Miranda, L.; In *The sea The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses* Harvard University Press: Cambridge, MA, 2006, ch. 8.
95. Silva, A. C. da; Araújo, M.; Bourlès, B.; *Trop. Oceanogr.* **2010**, *38*, 76. [Crossref]
96. Stramma, L.; Schott, F.; *Atlantic* **1999**, *46*, 279.
97. Peel, M. C.; Finlayson, B. L.; McMahon, T. A.; *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2007**, *11*, 1633. [Crossref]
98. Borges, A. V.; *Estuaries* **2005**, *28*, 3. [Crossref]
99. Cai, W. J.; Dai, M.; Wang, Y.; *Geophys. Res. Lett.* **2006**, *33*, 2. [Crossref]
100. Chen, C.-T. A.; Huang, T.-H.; Chen, Y.-C.; Bai, Y.; He, X.; Kang, Y.; *Biogeosciences* **2013**, *10*, 6509. [Crossref]
101. Laruelle, G. G.; Dürr, H. H.; Slomp, C. P.; Borges, A. V.; *Geophys. Res. Lett.* **2010**, *37*, 1. [Crossref]
102. Gruber, N.; *Nature* **2015**, *517*, 148. [Crossref] [PubMed]
103. Roobaert, A.; Laruelle, G. G.; Landschützer, P.; Gruber, N.; Chou, L.; Regnier, P.; *Global Biogeochem. Cycles* **2019**, *33*, 1693. [Crossref]
104. Roobaert, A.; Resplandy, L.; Laruelle, G. G.; Liao, E.; Regnier, P.; *Ocean Sci.* **2022**, *18*, 67. [Crossref]
105. Chau, T. T. T.; Gehlen, M.; Chevallier, F.; *Biogeosciences* **2022**, *19*, 1087. [Crossref]
106. Lacroix, F.; Ilyina, T.; Laruelle, G. G.; Regnier, P.; *Global Biogeochem. Cycles* **2021**, *35*, 1. [Crossref]
107. Ford, D. J.; Tilstone, G. H.; Shutler, J. D.; Kitidis, V.; *Biogeosciences* **2022**, *19*, 93. [Crossref]
108. Laruelle, G. G.; Lauerwald, R.; Pfeil, B.; Regnier, P.; *Global Biogeochem. Cycles* **2014**, *28*, 1199. [Crossref]
109. Alongi, D. M.; *Forests* **2020**, *11*, 977. [Crossref]
110. Chen, C. T. A.; Huang, T. H.; Fu, Y. H.; Bai, Y.; He, X.; *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2012**, *4*, 179. [Crossref]
111. Gattuso, J. P.; Pichon, M.; Delesalle, B.; Canon, C.; Frankignoulle, M.; *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **1996**, *145*, 109. [Crossref]
112. Falter, J. L.; Lowe, R. J.; Atkinson, M. J.; Cuet, P.; *J. Geophys. Res. Ocean.* **2012**, *117*, 1. [Crossref]
113. Shamberger, K. E. F.; Feely, R. A.; Sabine, C. L.; Atkinson, M. J.; DeCarlo, E. H.; Mackenzie, F. T.; Drupp, P. S.; Butterfield, D. A.; *Mar. Chem.* **2011**, *127*, 64. [Crossref]