

Artigo

Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos

Souza, M. F. L.;* Longhini, C. M.; Silva, A. M.; Lentini, C. A. D.

Rev. Virtual Quim., 2012, 4 (5), 566-582. Data de publicação na Web: 5 de outubro de 2012

<http://www.uff.br/rvq>**Carbon Cycle: Biogeochemical, Physical Processes and Compartment Interactions in the Todos os Santos Bay**

Abstract: Processes involving carbon in coastal marine ecosystems are important to the global cycle of this element. These processes have been changed by human activities, resulting in effects at local, regional and global scale. Studies concerning carbon cycling in this interface between land and ocean are still scarce, especially in tropical regions. The present article provides a brief review of these processes, characterizing biological, chemical and physical aspects related to the carbon cycle in the Todos os Santos Bay. A preliminary estimate of net community metabolism (gross primary production – respiration) was made using data available in the literature for each kind of environment, revealing the importance of pelagic and soft bottom sediments to the production of organic matter. The relevance of mangrove and reef communities to the carbon fluxes is also described.

Keywords: Coastal marine ecosystems; primary production; respiration; carbon dioxide.

Resumo

Os processos envolvendo o carbono em ecossistemas marinhos costeiros são importantes para o ciclo global deste elemento. Estes processos têm sido modificados pelas atividades humanas, com implicações em escala local, regional e global. Esta região de transição entre continentes e oceanos ainda é pouco estudada com relação à ciclagem do carbono, especialmente nos trópicos. Este artigo revisa estes processos, caracterizando aspectos biológicos, químicos e físicos pertinentes ao ciclo do carbono na Baía de Todos os Santos. Uma estimativa preliminar do metabolismo líquido da comunidade (produção primária bruta – respiração) foi realizada utilizando dados da literatura para os diferentes ambientes desta baía. Ela revelou a importância dos compartimentos pelágico e bêntico em substrato inconsolidado na produção de matéria orgânica. A relevância de manguezais e ambientes de recifes para os fluxos de carbono também é descrita.

Palavras-chave: Ecossistemas marinhos costeiros; produção primária; respiração; dióxido de carbono.

*Universidade Estadual de Santa Cruz, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Aquáticos Tropicais, Laboratório de Biogeoquímica Marinha, Rodovia Ilhéus-Itabuna km 16, CEP 45652-900, Ilhéus-BA, Brasil.

✉ marland@bgqmar.net

DOI: [10.5935/1984-6835.20120044](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20120044)

Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos

Marcelo F. L. Souza,^{a,*} Cybelle M. Longhini,^b Ananda M. Silva,^c Carlos A. D. Lentini^d

^a Universidade Estadual de Santa Cruz, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Aquáticos Tropicais, Laboratório de Biogeoquímica Marinha, Rodovia Ilhéus-Itabuna km 16, CEP 45652-900, Ilhéus-BA, Brasil.

^b Floram Engenharia e Meio Ambiente Ltda, Rua 23 de Maio, 140, Centro, CEP 45820-075, Eunápolis-BA, Brasil.

^c Bahia Mineração S.A., Avenida Bahia nº 220, Cidade Nova, CEP 45652-050, Ilhéus-BA, Brasil

^d Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Geremoabo, s/n, Instituto de Física, Salvador-BA, Brasil.

*marland@bgqmar.net

Recebido em 16 de agosto de 2012. Aceito para publicação em 25 de setembro de 2012

1. Introdução
2. O ciclo do carbono em um ecossistema marinho costeiro
3. Padrões de circulação e transporte de massa na Baía de Todos os Santos
4. Compartimentos e comunidades biológicas na Baía de Todos os Santos
5. O sistema CO₂-H₂O na água do mar e processos envolvendo fluxos de CO₂
6. Considerações Finais

1. Introdução

O carbono é o elemento mais essencial para a vida na Terra, em grande parte devido à sua propriedade de formar até 4 ligações covalentes, que permite que seja constituinte estrutural de uma enorme variedade de compostos essenciais (proteínas, carboidratos, lipídeos, pigmentos, etc.). O efeito estufa gerado pelas concentrações de dióxido de carbono (CO₂) e de metano (CH₄) na atmosfera manteve a atual faixa de

temperatura do planeta, tendo um papel fundamental para a evolução da vida. As concentrações atmosféricas destes gases evitam que o planeta esteja completamente congelado, com uma temperatura média 33°C, inferior a atual. A fixação fotossintética do CO₂ ao longo do tempo geológico também é responsável pela existência das concentrações atuais de oxigênio na atmosfera.¹

Os oceanos são os maiores reservatórios de carbono da superfície terrestre (Figura 1). Com exceção dos carbonatos e carbono

orgânico precipitados e retidos em sedimentos,^{2,3} a maior parte de carbono encontra-se nos oceanos sob a forma de carbono inorgânico dissolvido (CID = $[\text{CO}_{2(\text{g})}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$).^{2,4} Embora as frações orgânica dissolvidas e particuladas sejam 1 e 2 ordens de magnitude menores, os

processos de produção primária e respiração de material autóctone e alóctone em ambientes costeiros são de fundamental relevância para o ciclo global deste elemento, juntamente com as trocas de CO_2 com a atmosfera.^{4,5}

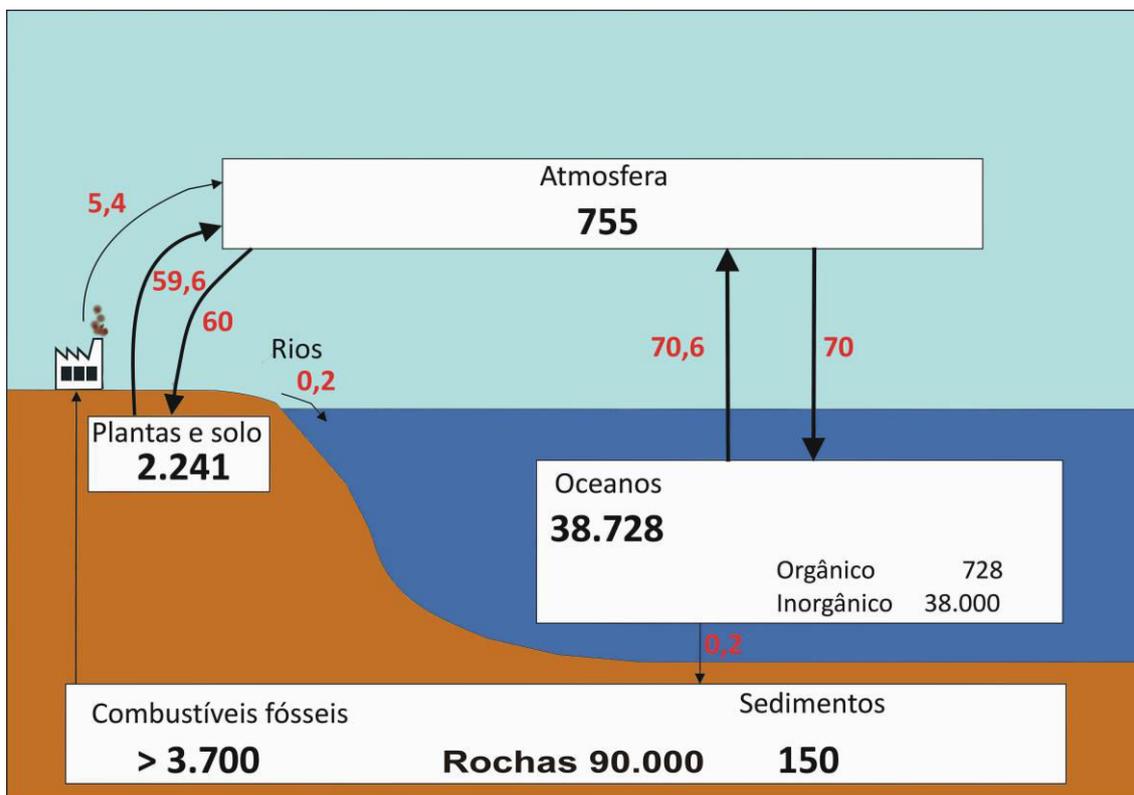


Figura 1. Ciclo global simplificado do carbono, com os principais compartimentos (caixas), armazenagem (números) e fluxos (setas). Armazenagem e fluxos em Pg (10^{15} g) C e Pg C . ano⁻¹ respectivamente^{4,6,2}

Os ecossistemas na zona costeira são um dos principais focos de interesse das pesquisas envolvendo o ciclo global do carbono, uma vez que são áreas de intensa atividade de processos biogeoquímicos envolvendo o carbono e nutrientes, e possuem uma grande acumulação de sedimentos. Estes respondem por cerca de 25 % da produtividade biológica e 90 % da produção pesqueira global. Ademais, mais de 45 % da população humana está estabelecida ao longo da costa, grande parte em cidades com alta densidade demográfica. Esta concentração da população ao longo da costa gera uma série de forçantes antropogênicas

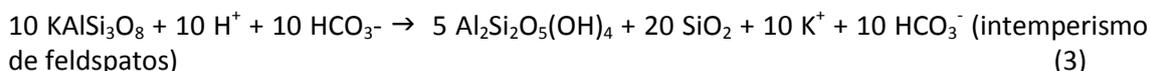
sobre os ecossistemas marinhos, dentre as quais alterações do ciclo hidrológico, sedimentar e de nutrientes, e a modificação e/ou perda de habitats. Estas forçantes têm como efeitos a eutrofização (enriquecimento em nutrientes) e aumento da turbidez da água, eventos de florescimento de algas nocivas, e a invasão de espécies exóticas.⁷

A Baía de Todos os Santos (BTS) tem uma população em seu entorno de cerca de 2,4 milhões de habitantes. Além do escoamento de águas pluviais e esgoto doméstico, recebe efluentes de uma refinaria, complexo petroquímico e do Centro Industrial de Aratú. Um emissário submarino ao norte da barra

lança esgotos tratados na plataforma, possivelmente influenciando indiretamente a baía através de sua renovação da água.⁸ A construção de uma barragem e usina hidroelétrica no Rio Paraguaçu, seu principal tributário, provocou modificações na vazão e no gradiente de salinidade.⁹ A descarga de água doce em seu estuário hoje é dependente do gerenciamento da usina hidroelétrica, o que causa modificações no habitat e no aporte fluvial. Todas estas atividades antrópicas representam alterações no ciclo do carbono neste ecossistema costeiro.

2. O ciclo do carbono em um ecossistema marinho costeiro

O carbono proveniente dos continentes entra nos ecossistemas marinhos através dos



Os sedimentos carbonáticos encontrados na BTS são predominantemente de origem biogênica autóctone.¹¹

Em sistemas localizados junto a regiões com alta densidade demográfica e industrializadas como a BTS, o esgoto doméstico, efluentes industriais e a

rios (Figura 2), fluxo de água subterrânea e deposição atmosférica. As entradas fluviais são normalmente mais importantes, e sua composição depende do tipo de vegetação, solo e litologia da bacia de drenagem. Solos ácidos, com densa cobertura de florestas tendem a contribuir com mais carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) do que com carbono inorgânico dissolvido ($\text{CID} = [\text{CO}_{2(\text{g})}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_2^{2-}]$). Bacias drenando terrenos carbonáticos e vegetação mais esparsa apresentam maiores concentrações de CID.¹ É provável que haja uma importante contribuição fluvial e CID, dado o grau de antropização da drenagem do Recôncavo Baiano e a presença de rochas carbonáticas.¹⁰ O carbono inorgânico particulado (carbonatos) tende a ser um componente menor neste aporte, por predominarem processos de intemperismo químico (reações 1 a 3) e **dissolução** em relação à erosão e transporte:

drenagem de áreas urbanas contribuem de forma significativa para a entrada de carbono, principalmente na forma orgânica. Estas fontes antropogênicas podem eventualmente se tornar mais importantes que as entradas naturais.

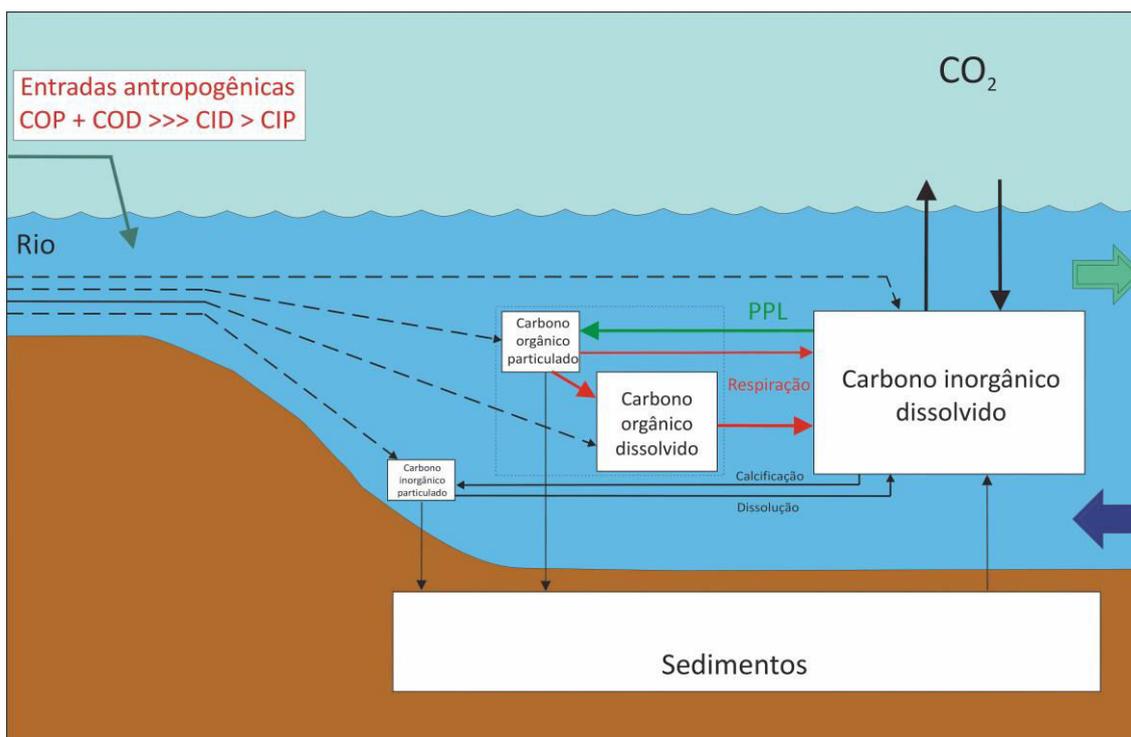
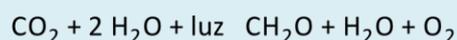
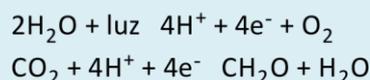


Figura 2. Ciclo do carbono em um ecossistema marinho costeiro. PPL = produção primária líquida. Dimensão dos compartimentos das formas de carbono e das setas aproximadamente proporcional à importância da armazenagem e fluxos. As setas grandes coloridas representam os fluxos destes constituintes entre o mar e o sistema, e também implicam no deslocamento espacial dos compartimentos e processos ao longo de cada ciclo de maré

O COD e o COP possuem grande importância para o ciclo do carbono nos ecossistemas costeiros, embora com menores concentrações que o CID, O compartimento COP inclui além de detritos orgânicos, toda a biomassa viva e os produtores primários. A produção primária

líquida (PPL), resultante principalmente de processos fotossintéticos (reações 4 a 6), é uma importante fonte “interna” de carbono orgânico, consumindo CID e eventualmente transformando estes sistemas em acumuladores de CO₂ atmosférico.



A deposição de COP no sedimento constitui outro sumidouro de carbono nestes sistemas. Outro processo relevante em sistemas costeiros é a respiração (R) da matéria orgânica (COD e COP) alóctone e autóctone, e a remineralização deste carbono. O predomínio dos processos de produção (autotrofia líquida; PPL > R) ou

respiração da matéria orgânica (heterotrofia líquida; PPL < R) vai condicionar os principais fluxos de carbono no ecossistema. Como estes processos de produção e remineralização da matéria orgânica envolvem assimilação ou liberação de CO₂, influenciam o pH da água e vão condicionar a especiação química do sistema CO₂-H₂O.

3. Padrões de circulação e transporte de massa na Baía de Todos os Santos

A BTS, com uma área total de 1.233 km², um volume de 11,9 x10⁹ m³ e um prisma de

maré de 2,4 x10⁹ m³,¹² e uma profundidade média de 9,8 m (Figura 3), apresenta um padrão de circulação hidrodinâmico predominantemente forçado por mares e praticamente invariável ao longo do ano em seu interior.¹³

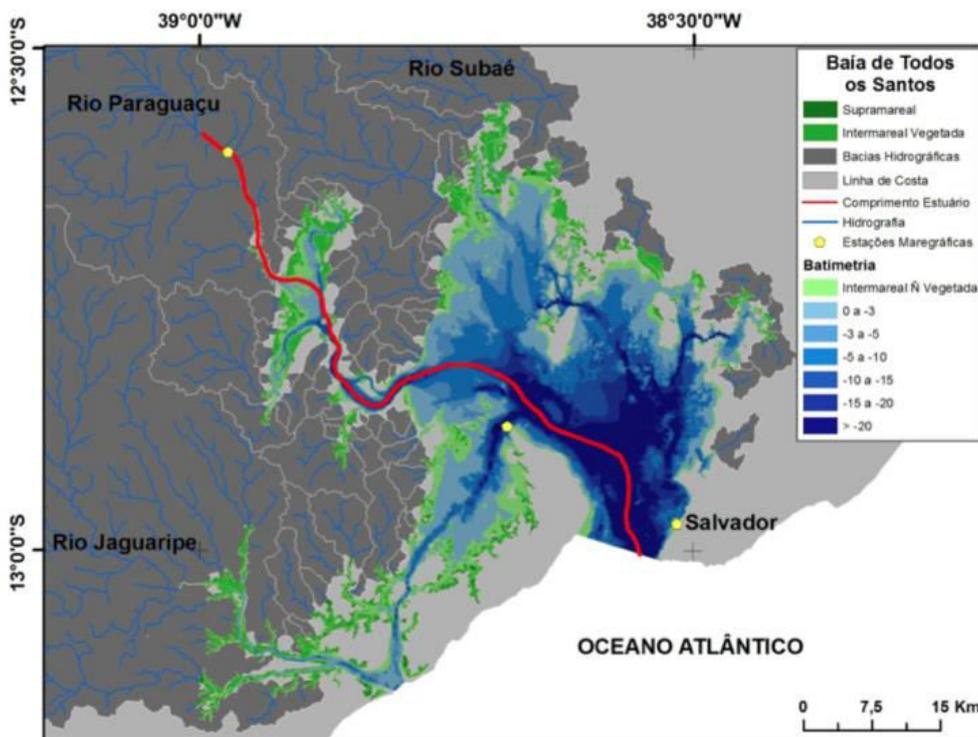


Figura 3. Mapa das unidades geomorfológicas básicas da Baía de Todos os Santos. Extraído de Santos¹²

As propriedades físicas de suas águas interiores são alteradas sazonalmente. Durante o período seco (setembro a fevereiro), suas águas apresentam características tipicamente marinhas, com a presença de Água Tropical (AT) em quase toda sua extensão, com exceção na região da desembocadura do Rio Paraguaçu. Por outro lado, com o aumento do aporte de água doce durante o período chuvoso (março a agosto), a penetração da AT para dentro da BTS é inibida e ocupada por uma água costeira formada localmente.

Conforme mencionado acima, apesar da circulação não variar sazonalmente no interior da baía, observa-se que a plataforma interna ao largo da BTS é caracterizada por dois cenários típicos. Durante o verão, os ventos de leste, que proporcionam ressurgência, geram correntes para sudoeste, enquanto que durante o inverno, a maior ocorrência de frentes frias (ventos de sul), tende a reverter o padrão de circulação.¹³

Com uma bacia de drenagem de 56.911 km² e uma vazão média de 124 m³/s, o aporte de água doce oriundo dos diversos cursos fluviais que nela deságuam é duas

ordens de grandeza inferior ao aporte de água salgada que penetra pela entrada principal da baía.^{12,14}

Devido a extensa área e a baixa vazão, a análise da razão entre o volume da descarga fluvial na BTS durante meio ciclo de maré e seu prisma de maré (diferença de volume entre a baixa-mar e preamar), resulta num valor que é 3 ordens de magnitude maior que sua descarga líquida média. Esse resultado indica uma maior influência da maré e uma boa capacidade de mistura de suas massas d'água interiores. Além disso, as maiores descargas específicas de sedimentos (i.e., razão entre descarga sólida e área da bacia) não ocorrem nos estuários com maior descarga sedimentar. A produção de sedimento por km² na BTS é de 1,0 x10⁵ kg.km².ano⁻¹, valor que chega a ser de cinco a seis vezes menor do que os valores estimados para as baías de Guanabara e Paranaguá, respectivamente.¹²

4. Compartimentos e comunidades biológicas na Baía de Todos os Santos

A grande área e o volume da BTS fazem com que o compartimento pelágico assumam uma grande importância no ciclo do carbono deste sistema costeiro, especialmente nas áreas mais profundas (Tabela 1). Os organismos do fitoplâncton marinho e estuarino, compostos predominantemente por micro-organismos tais como diatomáceas, dinoflagelados, cocolitoforídeos, silicoflagelados e cianobactérias são os principais produtores primários. A abundância relativa destes grupos varia ao longo do tempo em resposta

às modificações da salinidade, temperatura, turbulência e estabilidade da coluna d'água, penetração da radiação solar e disponibilidade de nutrientes (N, P e Si).¹⁵ O comportamento destas variáveis ao longo do gradiente de mistura estuarino também condiciona a distribuição espacial destes grupos de fotoautótrofos.

Condições favoráveis podem levar ao florescimento de um destes grupos, e eventualmente à formação de marés vermelhas, causadas pelo crescimento rápido de dinoflagelados (e.g., *Goniaulax*, *Gymnodinium*).¹⁶ Um evento de maré vermelha foi relatado em 2007, causado por *Gymnodinium sanguinum* (Figura 4a).^{17,18} As concentrações de clorofila-A (um indicador de biomassa do fitoplâncton, Figura 4b) observadas normalmente nas águas da BTS não são muito elevadas (0,1 a 9 µg . L⁻¹), mas já foi registrado um máximo de 47 µg . L⁻¹ próximo a Madre de Deus.¹⁹ Em ambientes marinhos grande parte da matéria orgânica fotossinteticamente produzida pelo fitoplâncton é devido à ação de organismos de pequeno tamanho (nano e picoplâncton). Os resultados disponíveis na literatura confirmam este predomínio.^{20,19}

Além da transferência desta produção primária para outros níveis tróficos, através do seu consumo pelo zooplâncton, parte desta produção é utilizada pelo bacterioplâncton, através de compostos orgânicos dissolvidos liberados por exudação e lise celular. A matéria orgânica liberada pelo zooplâncton e protistas heterotróficos também serve de substrato para bactérias. Os ambientes com entradas alóctones de carbono orgânico, especialmente dissolvido, podem ter suas teias tróficas baseadas na produção microbiana.

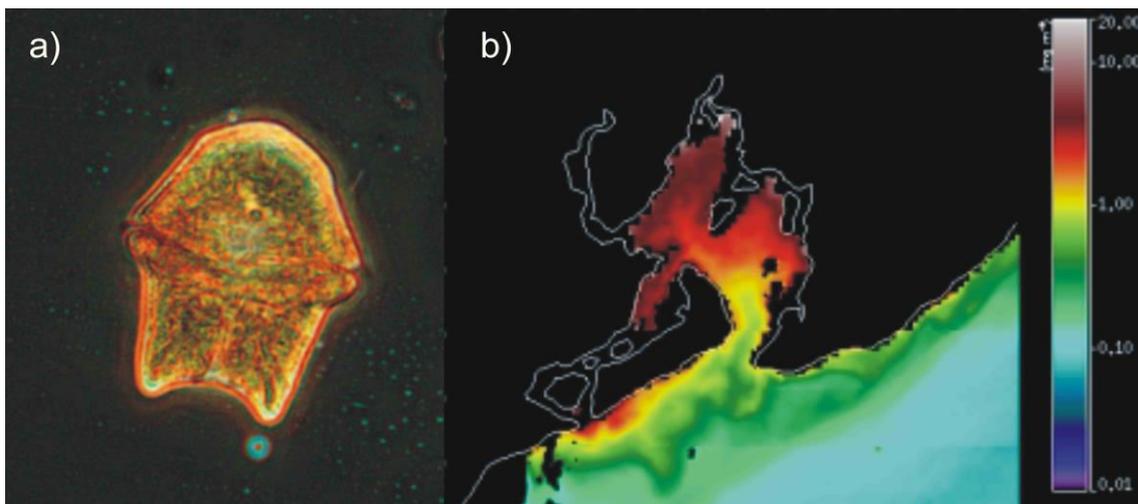


Figura 4. a) dinoflagelado *Gymnodinium sanguinum*, causador de maré vermelha na Baía de Todos os Santos; Foto: Sharyn Hedrick, Smithsonian Environmental Research Center, reproduzida com autorização; b) distribuição da clorofila na Baía de Todos os Santos obtida a partir de imagem MODIS-Aqua em 05/04/2009²¹

Existem poucas informações disponíveis na literatura a respeito da estrutura e funcionamento das áreas de manguezal da BTS, a despeito de sua área de cobertura (177,6 km²).²² Embora as taxas de produção primária destes ecossistemas seja geralmente um pouco superior à do fitoplâncton, grande parte desta é armazenada por longo período de tempo em sua biomassa aérea (troncos e galhos) e subterrânea (raízes).^{15,16} O carbono orgânico é transferido para as águas estuarinas através da queda de serapilheira (matéria orgânica de origem vegetal). No sedimento do manguezal, uma grande abundância de micro-organismos heterotróficos (bactérias e fungos) decompõe este material, porém retendo uma grande parte em sua biomassa. Esta produção heterotrófica também é um componente importante para o funcionamento do ecossistema.

Embora considerados muito produtivos, estes sistemas podem atuar como importadores de carbono orgânico, inclusive na fração dissolvida.²³ Desta forma, a entrada de serapilheira torna-se mais importante para a manutenção da teia trófica microbiana em seu sedimento do que como exportação para o estuário.²⁴ Nestas áreas pode

predominar um metabolismo heterotrófico,^{25,26} atuando como fontes de CO₂ e CH₄ para a atmosfera.²⁷ Há uma grande variação das taxas de exportação de carbono de manguezais para estuários.²⁸ Pesquisadores descrevem taxas de exportação de carbono obtidas em estudos no Brasil, mas de manguezais em latitudes muito mais baixa (1° S) e alta (23° S), e diferentes características hidrográficas e climatológicas.²⁸ Taxas de exportação de carbono em manguezais com feições mais comparáveis podem ser obtidas para os estuários dos rios Mandovi-Zuari (Índia), e Piauí (Sergipe, Brasil).^{22,29} Mesmo estes resultados são bastante discrepantes, entre 82 g C . m⁻² . ano⁻¹, e cerca de 1.600 g C . m⁻² . ano⁻¹ de exportação de carbono orgânico, respectivamente (Tabela 1). É importante ressaltar que estas taxas não representam a produção líquida do mangue (em sua maior parte retida em biomassa aérea) nem do manguezal, mas a contribuição em termos de exportação de COP e COD para o metabolismo da BTS. Na realidade, manguezais (definidos como as áreas entre marés nesta feição fitofisiográfica e suas comunidades e o meio abiótico na água e sedimento) podem apresentar heterotrofia líquida e atuarem como sumidouros de

carbono.^{24,25,26,29} Taxas de metabolismo líquido (PPL – R) em um manguezal de Sergipe sujeito a uma expressiva entrada de carbono orgânico antropogênico variaram entre -690 e 1.100 g C . m⁻² . ano⁻¹.²⁹ Esta heterotrofia líquida é sustentada pela decomposição de serapilheira e de matéria orgânica alóctone (terrestre e marinha). Além destas fontes de matéria orgânica, hidrocarbonetos provenientes da Refinaria Landulpho Alves e terminais de óleo devem ser um componente importante do metabolismo dos manguezais ao N-NE da BTS (por exemplo, R. Mataripe).

Comunidades recifais estão representadas na BTS com uma área de cobertura menor que os demais ambientes (cerca de 30 km²). Além do metabolismo do carbono, os recifes de coral atuam no processo de calcificação. Este processo em grande parte é intensificado pela simbiose com zooxantelas, dinoflagelados do gênero *Symbiodinium* e demais comunidades de fotoautotrófos presentes nos recifes.^{30,31} Além das zooxantelas, macroalgas e microfototrófos epilíticos (que crescem sobre o substrato) e endolíticos (que perfuram e estabelecem-se no substrato carbonático) são os principais organismos fotossintetizantes nestes ambientes. A importância destes dois últimos grupos de organismos para a produtividade recifal foi reconhecida deste 1955,³² mas, ainda, não há um consenso na literatura sobre qual predomina no metabolismo recifal.^{33,34} De qualquer forma, grande parte do carbono assimilado pela fotossíntese em recifes de coral é consumido pela respiração (utilizado no próprio sistema). O balanço diário das taxas metabólicas em recifes de coral mostra que estes sistemas apresentam equilíbrio entre os processos assimiladores e liberadores de CO₂, o que resulta em uma proporção P/R aproximadamente igual a 1. Porém, o enriquecimento em nutrientes e matéria orgânica em recifes costeiros pode causar oscilações entre períodos de autotrofia e heterotrofia líquida (Tabela 1).^{35,36}

As áreas da baía cobertas por sedimento

inconsolidado possuem características sedimentológicas e comunidades biológicas muito diversificadas.¹⁰ As principais comunidades de produtores primários são as microfítobênticas (cianobactérias, clorofíceas e diatomáceas no sedimento superficial), macroalgas e pradarias de fanerógamas marinhas (vegetais superiores). A área de cobertura destas comunidades na BTS não é conhecida, mas durante episódios de forte vento S-SW pode ser observada grande quantidade de aglomerados de comunidades microfítobênticas flutuando na região entre a foz do Rio Paraguaçu e a extremidade norte da ilha de Itaparica. Este fenômeno ocorre devido à formação de bolhas de oxigênio pelas altas taxas fotossintéticas destas comunidades e ao aumento da turbulência devido à ação de ventos. A desagregação deste material na coluna d'água é uma importante forma de acoplamento bêntico-pelágico (entre o sedimento e a coluna de água) em ambientes marinhos rasos, mesmo em águas oligotróficas (pobres em nutrientes).³⁷

Cerca de 61 % do fundo da BTS são recobertos por areias e areias silto-argilosas (51% areias), 37% por sedimentos lamosos, e < 2% de sedimentos carbonáticos cascalhosos.¹⁰ Nas áreas arenosas de alta energia normalmente não há o estabelecimento de expressivas comunidades de produtores primários. Areias argilo-siltosas costumam apresentar agrupamentos de macroalgas e comunidades microfítobênticas. Nos sedimentos mais finos estas últimas tendem a apresentar maiores biomassas. Os sedimentos carbonáticos, em grande parte biodetrítico, certamente são colonizados por uma variedade de algas rodofíceas calcárias incrustantes e comunidades epilíticas e endolíticas (micro-organismos que perfuram o substrato carbonático), mas sua área de cobertura é muito pequena. Como uma estimativa conservadora, consideramos uma faixa de taxas de PPL do microfítobentos e macroalgas calcárias crustosas e as áreas recobertas por substratos compatíveis com o estabelecimento destas comunidades¹⁰.

A estimativa de produção anual mostra que o microfítobentos em substratos inconsolidados pode ser responsável pela maior parte da produção primária da BTS, superior inclusive à produção pelágica (Tabela 1). As taxas de produção pelágica também podem ser uma subestimativa, uma vez que nas porções mais internas da baía, próximas a estuários e manguezais, a maior disponibilidade de carbono orgânico provavelmente resulta em heterotrofia líquida. As áreas de manguezal também são locais em que ocorrem altas taxas de produção, remineralização, e contribuem com grandes quantidades de carbono orgânico para o metabolismo da BTS. Apesar

de seu caráter heterotrófico, a grande quantidade de matéria orgânica alóctone (natural e antropogênica) que as áreas de manguezal recebem faz com que elas atuem como exportadoras de carbono, além das altas taxas de emissão de CO₂ para a atmosfera. As comunidades recifais e sedimentos carbonáticos processam uma quantidade de várias ordens de grandeza menor de matéria orgânica, dada à pequena área de cobertura na BTS (~2%). Apesar desta baixa representatividade, as comunidades recifais possuem um importante papel nos fluxos de carbono e nutrientes, uma vez que alternam períodos de autotrofia e heterotrofia líquida.

Tabela 1. Taxas de produção primária líquida representativa dos diferentes tipos de compartimentos e comunidades, e estimativa do total de produção anual de carbono orgânico para a Baía de Todos os Santos. Valores negativos correspondem à respiração líquida (PPL < R).

Compartimento/Comunidade	Área km ²	g C . m ⁻² . ano ⁻¹	Kg C . ano ⁻¹
<i>Pelágico</i> ¹⁵	1.233 ¹²	256	3,2 x 10 ¹¹
<i>Pelágico BTS</i> ²⁰	1.233 ¹²	182	2,2 x 10 ¹¹
<i>Mangue, fluxo de COP+DOC</i> ²⁴	177,6 ²²	82	1,5 x 10 ¹⁰
<i>Mangue, fluxo de COP+DOC</i> ²⁹	177,6 ²²	1.600	2,9 x 10 ¹¹
<i>Manguezal</i> ²⁹	177,6 ²²	-690 – -1.100	-1,2 x 10 ¹¹ – -2,0 x 10 ¹¹
<i>Comunidades recifais</i> ³⁵	30	-1.800 – 4.700	-5,6 x 10 ⁴ – 1,4 x 10 ⁵
<i>Comunidades recifais</i> ³⁶	30	-2.400 – 4.400	-7,3 x 10 ⁴ – 1,3 x 10 ⁵
<i>Sedimento inconsolidado (lamoso), Microfítobentos</i> ¹⁶	460 ¹⁰	100 – 2.100	4,6 x 10 ¹⁰ – 9,7 x 10 ¹¹
<i>Sedimento carbonático, Macroalgas calcáreas crustosas</i> ³⁸	30 ¹⁰	123 – 946	3,7 x 10 ⁴ – 2,8 x 10 ⁵

5. O sistema CO₂-H₂O na água do mar e processos envolvendo fluxos de CO₂

A superfície dos oceanos e a atmosfera apresentam uma relação intrínseca, o que permite a difusão de gases e a troca bidirecional entre esta interface. O dióxido de carbono, ao se dissolver na água, reage com

esta e se dissocia produzindo íons bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻).³⁹ A concentração destes íons na água do mar normalmente é muito maior que na água doce. Assim, o dióxido de carbono nos oceanos é representado por três diferentes formas: CO₂ dissolvido e os íons HCO₃⁻ e CO₃²⁻ (Figura 5). A soma das concentrações dessas espécies químicas é denominada carbono inorgânico total (CT) ou carbono inorgânico dissolvido (CID).

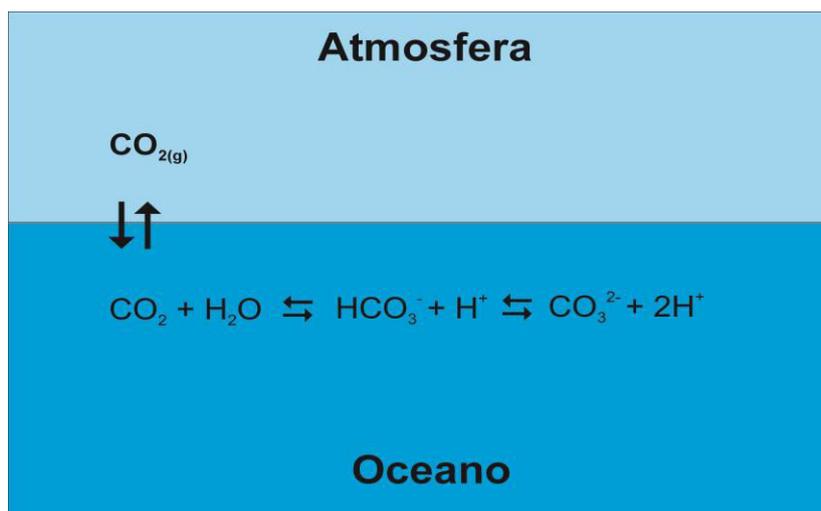


Figura 5. Modelo esquemático do sistema carbonato na água do mar

A especiação química do CO_2 na água do mar e as concentrações dos íons produzidos por sua dissociação dependem, principalmente, da alteração do pH no sistema. Outras variáveis como a temperatura, a salinidade e a pressão também alteram o sistema carbonato na água do mar. Em ambientes marinhos sob condições normais para estas variáveis (tais como $\text{pH} = 8,1$; $T = 25^\circ\text{C}$ e Salinidade (S) = 35), os percentuais (%) das espécies químicas do carbono são $[\text{CO}_2]:[\text{HCO}_3^-]:[\text{CO}_3^{2-}] \approx 0,5 : 86,5 : 13$. Assim, a forma de CID predominante na água do mar é o íon HCO_3^- , seguido pelo CO_3^{2-} .³⁹ A proporção de CO_2 dissolvido nestas condições é pequena, mas aumenta em pH mais baixo. Processos que aumentem ou diminuam o pH, como a fotossíntese e a respiração da matéria orgânica, vão alterar tanto a proporção entre as espécies químicas quanto a concentração total de CID. O predomínio de cada um destes processos vai afetar a concentração e a pressão parcial de CO_2 ($p\text{CO}_2$) na água de forma diferente em cada ambiente marinho (Figura 6).

Os fluxos de gases entre a atmosfera e o oceano ocorrem no sentido de manter o equilíbrio entre as concentrações dos gases na atmosfera e na fase líquida. Assim, os

fluxos de CO_2 através da interface água-atmosfera são direcionados pelo gradiente da pressão parcial de CO_2 ($\Delta p\text{CO}_2$) entre essas fases, ocorrendo do local de maior $p\text{CO}_2$ para o de menor $p\text{CO}_2$. Apesar dos aumentos registrados para a $p\text{CO}_2$ atmosférica nas últimas décadas, em locais onde não há interferência direta de fontes pontuais de CO_2 esta variável apresenta um valor aproximadamente constante, sendo estimada uma média de $370 \mu\text{atm}$. Em geral, o gradiente a ser gerado entre a água e a atmosfera ocorrerá em função de alterações nas concentrações de CO_2 na água do mar, o que, por sua vez também estará relacionado aos processos metabólicos de produção/respiração e precipitação/dissolução de CaCO_3 .

Outro fator determinante para a magnitude dos fluxos entre a interface água-atmosfera é a velocidade dos ventos. Assim, a direção dos fluxos de CO_2 é guiada pelo gradiente de $p\text{CO}_2$ e as taxas de troca são controladas principalmente pela velocidade do vento.^{40,41} Quanto maior a energia eólica, maior será o coeficiente de troca entre a interface e tanto maior será a magnitude dos fluxos entre estes compartimentos.

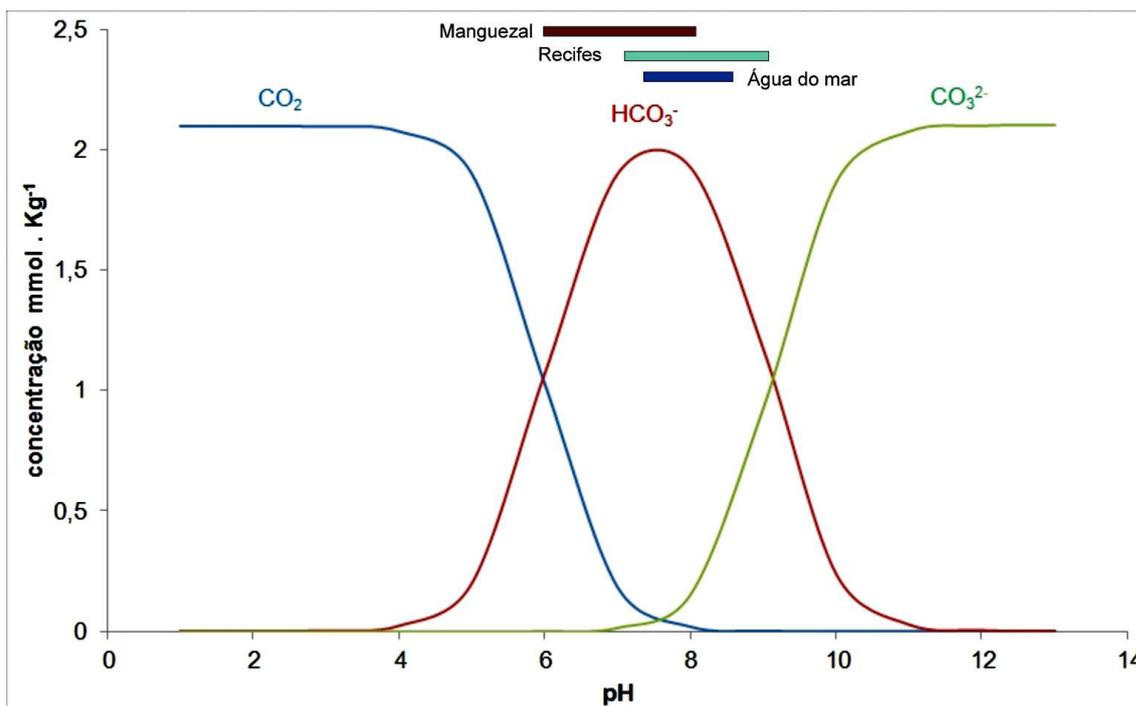


Figura 6. Concentração das espécies químicas do sistema carbonato em função do pH, em uma água do mar com CID = 2,1 mmol . Kg⁻¹, salinidade 35 a 25 °C. Barras horizontais mostram a faixa aproximada de pH na água do mar, recifes de coral e manguezais

Considerando que os fluxos de CO₂ são guiados principalmente, pelos processos metabólicos, ecossistemas que apresentam autotrofia líquida tendem a funcionar como um sumidouro de CO₂, uma vez que o consumo deste gás pelos processos de produção primária resultam no decréscimo em pCO₂ na água, tornando-o menor do que na atmosfera e permitindo o fluxo de CO₂ no sentido atmosfera-água. O oposto poderá ser observado em ambientes que apresentam heterotrofia líquida.

No caso dos recifes de coral, as trocas de CO₂ entre a água do mar e a atmosfera envolvem outros processos. Além das atividades metabólicas de produção/respiração, o processo de calcificação é muito importante nestes ambientes (Figura 7). A deposição do carbonato de cálcio (CaCO₃) ocorre preferencialmente, a partir da reação do cálcio com o íon HCO₃⁻, o que resulta na liberação de CO₂ para o ambiente circundante e, eventualmente, a evasão deste para a atmosfera:^{40, 42, 43}



A discussão acerca do papel dos ambientes recifais para os fluxos de CO₂ ainda gera controvérsias. Alguns estudos mostram que estes ecossistemas atuam como um sumidouro de CO₂ da atmosfera (Figura 7b).^{35,44} Outros, no entanto, mostram que o balanço metabólico total ao longo do período de 24 horas resulta em uma razão P/R aproximadamente igual a um, o que gera um balanceamento entre as taxas de assimilação e liberação de CO₂ através da interface água-atmosfera.^{45,46} Gattuso *et al.*³⁰ registraram a evasão líquida de CO₂ para a atmosfera em Moorea, na Polinesia Francesa, resultado associado a maior importância dos processos de calcificação e respiração, em detrimento da produção líquida registrada na área de estudo considerada (Figura 7a). As taxas metabólicas e conseqüentemente a direção dos fluxos de CO₂ irão variar de acordo com a estrutura da comunidade recifal, que pode ser representada pelo

predomínio de corais, algas ou uma mistura entre estes grupos.^{46,47}

A Figura 7 mostra o funcionamento de ambientes recifais costeiros para as trocas de CO_2 , em função dos processos metabólicos predominantes no sistema. Em geral, ambientes caracterizados por heterotrofia líquida apresentam menores taxas de calcificação e predomínio de dissolução líquida de CaCO_3 , em função do aumento nas concentrações de CO_2 e conseqüente redução do pH. Nestas condições, ocorre a liberação de CO_2 para a atmosfera, em

resposta ao aumento da $p\text{CO}_2$ na água do mar (Figura 7a). Esta situação pode ser observada em ecossistemas costeiros, cujo aporte de matéria orgânica alóctone favorece o predomínio dos processos de respiração/remineralização na coluna d'água e compartimento bêntico. Em ambientes onde as taxas de produção primária superam as de respiração, o processo de calcificação é favorecido pelo consumo de CO_2 e aumento do pH, resultando em entrada de CO_2 atmosférico para o sistema (Figura 7b).

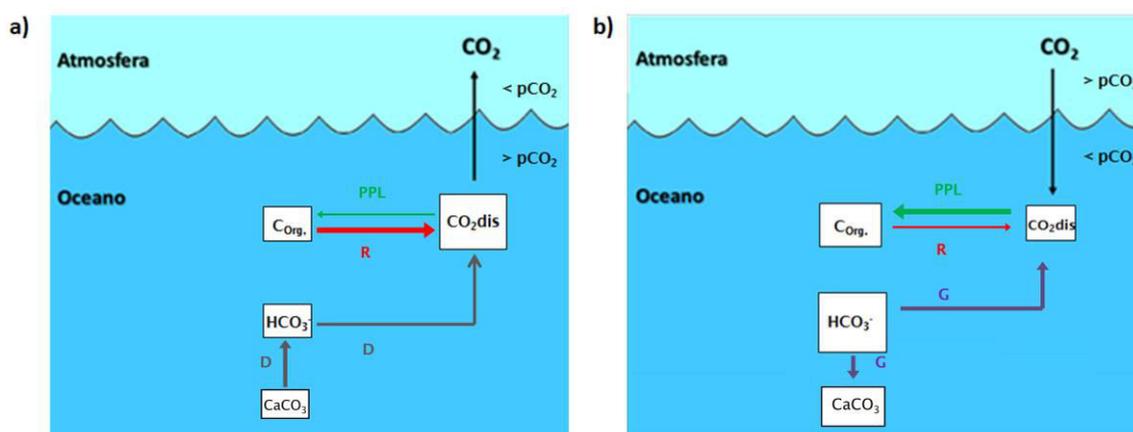


Figura 7. Esquema simplificado da importância dos processos metabólicos em ecossistemas recifais e fluxos de CO_2 através da interface água-atmosfera. a) Sistema em que há predomínio de respiração e calcificação líquidas; b) Sistema em que há predomínio do processo de produção primária, em detrimento da respiração e calcificação. PPL = Produção Primária; R = Respiração; G = Calcificação; D = Dissolução de CaCO_3 . Dimensão dos compartimentos das formas de carbono e das setas aproximadamente proporcional à importância da armazenagem e fluxos

Os ecossistemas de manguezal também desempenham importante função para a dinâmica do carbono em regiões costeiras. Considerando a elevada produção e estoque de carbono orgânico atribuídos à sua vegetação aérea, estes ambientes são caracterizados como um dos mais produtivos do mundo. No entanto, a queda e acúmulo da serapilheira contribuem para o incremento dos processos de decomposição da matéria orgânica, resultando em heterotrofia líquida na coluna d'água e sedimento adjacentes.^{25,26} Esta prevalência dos processos de respiração aeróbica e

anaeróbica da matéria orgânica diminui o pH destas águas de menor salinidade, cuja capacidade de tamponamento é menor que a da água do mar. Com altas concentrações de CID e o deslocamento da especiação em função do pH estas águas normalmente apresentam $p\text{CO}_2$ bastante elevadas. Nesse contexto, as águas circundantes influenciadas por estes ecossistemas apresentam supersaturação em CO_2 , agindo como uma fonte deste gás para a atmosfera.^{27,48} O carbonato biodetrítico e clástico presente nestas áreas tende à dissolução.

Avaliando sob uma perspectiva global, a

estimativa da emissão de CO₂ para a área total de cobertura destes ecossistemas pode alcançar a ordem de 50 x 10⁶ tC ano⁻¹, valor aproximadamente equivalente à estimativa global das taxas de remineralização da serapilheira em manguezais (23 x 10⁶ tC ano⁻¹).⁴⁸ Estes valores podem ainda estar subestimados, uma vez que a integração realizada por estes autores não considera a área de superfície das águas adjacentes influenciadas diretamente por estes ambientes.

Apesar dos ambientes recifais apresentarem uma área de cobertura pouco expressiva na BTS, eles também devem contribuir significativamente para as trocas de CO₂ entre a interface água-atmosfera nesta Baía, em função da intensidade dos processos metabólicos desenvolvidos nestes ecossistemas. No entanto a estrutura e composição das comunidades recifais apresentam grande dinâmica temporal em resposta a mudanças climáticas e antropogênicas, provocando a alternância entre períodos de autotrofia e heterotrofia líquida e, conseqüentemente, variação na direção e magnitude dos fluxos de CO₂ na BTS. A alta intensidade destes processos e modificações resultantes nas características físico-químicas da água podem fazer com que os fluxos de CO₂, através da interface água-atmosfera, sejam maiores que no restante da BTS. A ação de ondas sobre estes ambientes também vai favorecer uma maior intensidade destes fluxos.

O metabolismo das comunidades pelágicas e microfitobênticas devem estabelecer a ocorrência de autotrofia líquida em grande parte do sistema, favorecendo a entrada de CO₂ atmosférico para a BTS. Considerando as elevadas taxas de produção primária estimadas para estes compartimentos, deve haver uma contribuição expressiva destas comunidades para a entrada de CO₂ na baía.

Considerando a heterogeneidade de ambientes encontrados na BTS, os fluxos de CO₂ através da interface água-atmosfera nesta Baía devem apresentar grande variação

temporal e espacial, em função de aspectos meteorológicos, hidrológicos e do balanço trófico resultante destes compartimentos. Dada a elevada representatividade dos ecossistemas de manguezal para a área total da BTS, o predomínio de heterotrofia líquida e a contribuição como exportador de carbono, estes ambientes devem contribuir significativamente para as taxas de emissão de CO₂ da BTS para a atmosfera.

O balanço total do carbono e a contribuição da BTS para os fluxos de CO₂, através da interface água-atmosfera, só poderão ser descritos através de uma avaliação integrada das funções destes compartimentos para o funcionamento da Baía. Deverão ser considerados aspectos como o balanço trófico, os fluxos internos das diferentes formas de carbono, além da influência de processos advectivos para a biogeoquímica do carbono na BTS.

6. Considerações Finais

Estudos sobre os processos envolvendo o carbono em ecossistemas marinhos costeiros são essenciais para compreender o ciclo global deste elemento. As regiões de transição entre os continentes e oceanos são os locais em que estes processos ocorrem com taxas mais elevadas. A intensidade destes processos pode fazer com que sejam importantes a nível global, apesar de compreenderem apenas cerca de 5% da área total dos oceanos. Diante do cenário de aumento das concentrações atmosféricas e emissões antropogênicas de CO₂, são necessárias informações para respaldar modelos preditivos confiáveis, e identificar/quantificar possíveis retroalimentações negativas.

A crescente industrialização, o aumento da densidade demográfica e a ocupação indiscriminada do solo ao redor da BTS geram um incremento dos aportes continentais e redução da biodiversidade e de área de habitat. Manguezais, importantes

componentes no ciclo do carbono nestes sistemas, são especialmente afetados por este último impacto. Estas modificações alteram o funcionamento dos ecossistemas, com implicações em escala local (qualidade da água, pesca, atrativo turístico, etc.), regional (influência da BTS sobre a plataforma continental e região costeira adjacente) e global. As mudanças nas taxas de produção primária líquida e respiração e do metabolismo líquido do ecossistema vão condicionar o seu papel como exportadora/importadora de carbono e demais nutrientes orgânicos e inorgânicos nas frações dissolvida e particulada para as águas da plataforma. A direção e intensidade dos fluxos de CO₂ entre a água e a atmosfera também é dependente deste balanço, além do transporte advectivo.

Uma estimativa da produção primária líquida anual revela que as comunidades bênticas, assim como as pelágicas, são os principais compartimentos produtores de matéria orgânica na BTS. Devido ao seu papel múltiplo, os manguezais e recifes também possuem grande importância dentro da ciclagem do carbono na baía.

A BTS, assim como a grande maioria dos ecossistemas marinhos costeiros tropicais, ainda carece de estudos que quantifiquem a estocagem das diferentes formas de carbono em seus compartimentos bióticos e abióticos, as taxas de processos biogeoquímicos, e sobre o transporte advectivo de carbono. Além do benefício científico, ao ampliar o conhecimento sobre as relações entre estrutura e funcionamento de ecossistemas tropicais, estes trabalhos permitirão avaliar e subsidiar ações referentes aos impactos ambientais nesta região. Estas informações também permitirão futuras atualizações do balanço global do carbono, melhorando a elaboração de cenários sobre mudanças globais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da FAPESB através do projeto Estudo do Ambiente Físico da Baía de Todos os Santos, e do CNPq ao projeto FLUXCARB (Fluxos de Carbono na Plataforma Continental da Bahia).

Referências Bibliográficas

- ¹ Schlesinger, W. H.; *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*, Academic Press: San Diego, 1991.
- ² Pilson, M. E. Q.; *An Introduction to the Chemistry of the Sea*, Prentice Hall: Upper Sadle River, 1998.
- ³ Millero, F. J.; *Chemical Oceanography*, CRC Press: Boca Raton, 2006.
- ⁴ Sabine, C. L.; Feely, R.A. Em *Greenhouse Gas Sinks*, Reay, D.; Hewitt, N.; Grace, J.; Smith, K., eds.; CABI Publishing: Oxfordshire, 2007, cap. 3.
- ⁵ Smith, S. V.; Buddemeier, R. W.; Wulff, F. Swaney, D. P. C., Em *Coastal Fluxes in the Anthropocene*; Crossland, C. J.; Kremer, H. H.; Lindeboom, H. J.; Marshall Crossland, J. I.; Le Tissier, M. D. A., eds.; The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme Series: Global Change - The IGBP Series, 2005. cap. 3.
- ⁶ Sarmiento, J. L.; Gruber, N. *Phys. Today* **2002**, 55, 30. [[CrossRef](#)]
- ⁷ Crossland, C. J.; Baird, D.; Ducrotoy, J. -P.; Lindeboom, H., Em *Coastal Fluxes in the Anthropocene*; Crossland, C.J.; Kremer, H.H.; Lindeboom, H.J.; Marshall Crossland, J.I.; Le Tissier, M.D.A., eds.; The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme Series: Global Change - The IGBP Series, 2005. cap. 1.
- ⁸ Hatje, V.; Andrade, J. B.; *Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos*, EDUFBA: Salvador, 2009.
- ⁹ Genz, F.; Lessa, G. C.; Cirano, M. *Rev. Bras. Rec. Hidr.* **2008**, 13,73. [[Link](#)]

- ¹⁰ Lessa, G.; Dias, K. *Quat. Environ. Geosci.* **2009**, *1*, 84. [Link]
- ¹¹ Lessa, G. C.; Bittencourt, A. C. S. P.; Brichta, A.; Dominguez, J. M. L. *An. Acad. Bras. Ciênc.* **2000**, *72*, 573. [CrossRef]
- ¹² Santos, F. M.; *Monografia de Graduação*. Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2009.
- ¹³ Cirano M.; Lessa G. C. *Rev. Bras. Geof.* **2007**, *25*, 363. [CrossRef]
- ¹⁴ Leão, Z. M. A. N.; Dominguez, J. M. L. *Mar. Pollut. Bull.* **2000**, *41*, 112. [CrossRef]
- ¹⁵ Day, J. W. Jr.; Hall, C. A. S.; Kemp, W. M.; Yañez-Arancibia, A.; *Estuarine Ecology*, John Wiley & Sons: New York, 1989.
- ¹⁶ Valiela, I.; *Marine Ecological Processes*, Springer: New York, 1995.
- ¹⁷ Sítio da Secretaria de Estado da Irrigação, Agricultura e Reforma Agrária, Bahia. Disponível em: <<http://www.seagri.ba.gov.br/noticias.asp?qact=view¬id=10042>>. Acesso em: 10 Julho 2012.
- ¹⁸ Sítio de Estado da Secretaria de Comunicação Social, Bahia. Disponível em: <[http://www.comunicacao.ba.gov.br/noticias/2007/04/04/noticia.2007-09-16.5096053122/print view](http://www.comunicacao.ba.gov.br/noticias/2007/04/04/noticia.2007-09-16.5096053122/print%20view)>. Acesso em: 10 Julho 2012.
- ¹⁹ Lopes, R. M.; Dias, J. F.; Gaeta, S. A. Em *Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos*; Hatje, V.; Andrade, J. B., eds.; EDUFBA: Salvador, 2009, cap. 4.
- ²⁰ Paredes, J. F.; Peixinho, V. M. C.; Brito, R. R. C. *Braz. J. Oceanogr.* **1980**, *29*, 275. [CrossRef]
- ²¹ Carvalho, R. C., Lentini, C. A. D.; *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, Brasil, 2011. [Link]
- ²² Hadlich, G. M.; Ucha, J. M.; Oliveira, T. L.; *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 2009. [Link]
- ²³ Lee, S. Y. *Hydrobiologia* **1995**, *295*, 203. [CrossRef]
- ²⁴ Wafar, S.; Untawale, A. G.; Wafar, M. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **1997**, *44*, 111. [CrossRef]
- ²⁵ Bouillon, S.; Frankignoulle, M.; Dehairs, F.; Velimirov, B.; Eiler, A.; Abril, G.; Etcheber, H.; Borges, A. V. *Global Biogeochem. Cycles* **2003**, *17*, 1114. [CrossRef]
- ²⁶ Mukhopadhyay, S. K.; Biswas, H.; Dea, T. K.; Sen, B. K.; Sen, S.; Jana, T. K. *Atmos. Environ.* **2002**, *36*, 629. [CrossRef]
- ²⁷ Mukhopadhyay, S. K.; Biswas, H.; Dea, T. K.; Jana, T. K. *J. Mar. Syst.* **2006**, *62*, 9. [CrossRef]
- ²⁸ Adame, M. F.; Lovelock, C. E. *Hydrobiologia* **2011**, *663*, 23. [CrossRef]
- ²⁹ Souza, M. F. L.; Gomes, V. R.; Freitas, S. S.; Andrade, R. C. B.; Knoppers, B. *Estuaries and Coasts* **2009**, *32*, 111. [CrossRef]
- ³⁰ Gattuso, J. -P.; Pichon, M.; Delesalle, B.; Frankignoulle, M. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **1993**, *96*, 259. [CrossRef]
- ³¹ Leclercq, N.; Gattuso, J. -P.; Jaubert, J. *Limnol. Oceanogr.* **2002**, *47*, 558. [CrossRef]
- ³² Odum, H. T.; Odum, E. P. *Ecol. Monogr.* **1955**, *35*, 291. [CrossRef]
- ³³ Suzumura, M.; Miyajima, T.; Hata, H.; Umezawa, Y. U.; Kayanne, H.; Koike, I. *Limnol. Oceanogr.* **2002**, *47*, 771. [CrossRef]
- ³⁴ Tribollet, A.; Langdon, C.; Golubic, S.; Atkinson, M. *J. Phycol.* **2006**, *42*, 292. [CrossRef]
- ³⁵ Kraines, S.B.; Suzuki, Y.; Omori, T.; Shitashima, K.; Kanahara, S.; Komiyama, H. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **1997**, *156*, 1. [CrossRef]
- ³⁶ Longhini, C. M. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil, 2010. [Link]
- ³⁷ Souza, M. F. L.; Kjerfve, B.; Knoppers, B.; Souza, W. F. L.; Damasceno, R. N. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2004**, *57*, 843. [CrossRef]
- ³⁸ Chrisholm, J. R. M. *Limnol. Oceanogr.* **2003**, *48*, 1376. [CrossRef]
- ³⁹ Zeebe, R. E.; Wolf-Gladrow, D.; *CO₂ in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*. Elsevier Oceanography Series: Amsterdam, 2001.
- ⁴⁰ Frankignoulle, M.; Gattuso, J. P. Em *Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change.*; Wollanski, R.; Mackenzie, F. T.; Chou, L. eds.; NATO ASI Series. Springer-Verlag, Berlin, 1993, v. 14, p. 233-248.
- ⁴¹ Upstill-Goddard, R. C. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2006**, *70*, 388. [CrossRef]

⁴² Frankignoulle, M.; Canon, C.; Gattuso, J. -P. *Limnol. Oceanogr.* **1994**, *39*, 458. [[CrossRef](#)]

⁴³ Ware R. W.; Smith S. V.; Reaka-Kudla M. L. *Coral Reefs* **1991**, *11*, 127. [[CrossRef](#)]

⁴⁴ Kraines, S.; Suzuki, Y.; Yamada, K.; Komiyama, H. *Limnol. Oceanogr.* **1996**, *41*, 1790. [[CrossRef](#)]

⁴⁵ Crossland, C. J.; Hatcher, B. G.; Smith, S. V. *Coral Reefs* **1991**, *10*, 55. [[CrossRef](#)]

⁴⁶ Smith, S. V.; Marsh Júnior, J. A. *Limnol. Oceanogr.* **1973**, *18*, 953. [[CrossRef](#)]

⁴⁷ Smith, S. V. *Limnol. Oceanogr.* **1973**, *18*, 106. [[CrossRef](#)]

⁴⁸ Borges, A. V.; Djenidi, S.; Lacroix, G.; Théate, J.; Delille, B.; Frankignoulle, M. *Geophys. Res. Lett.* **2003**, *30*, 1558. [[CrossRef](#)]