

## VARIAÇÕES DE CURTO PRAZO DO METABOLISMO E DA $p\text{CO}_2$ NA LAGOA RODRIGO DE FREITAS: ELEVADO DINAMISMO EM UM ECOSISTEMA TROPICAL URBANO

*Humberto Marotta*<sup>1</sup>, *Renata Maria Pereira Ricci*<sup>\*2</sup>, *Pedro Lima Sampaio*<sup>3</sup>, *Pedro Puciarelli de Melo*<sup>4</sup> & *Alex Enrich-Prast*<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Laboratório de Geografia Física (LAGEF/UFF), CEP: 24210-340, Niterói, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Bióloga/Bacharel em Ecologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestre em Ciência Ambiental pela Universidade Federal Fluminense.

<sup>3</sup> Biólogo/Bacharel em Ecologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestre em Biofísica Ambiental pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

<sup>4</sup> Biólogo/Bacharel em Biologia Marinha pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia, Departamento de Ecologia, Laboratório de Biogeoquímica. Ilha do Fundão, Caixa Postal: 68020. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21951-290.

<sup>6</sup> Endereço atual: Linköping University, Water and Environmental Studies Institute, The Department of Thematic Studies. Linköping, Sweden. E-mails: [humbertomarotta@id.uff.br](mailto:humbertomarotta@id.uff.br), [renatamariavp@globo.com](mailto:renatamariavp@globo.com), [plima1@gmail.com](mailto:plima1@gmail.com), [puciarelli@gmail.com](mailto:puciarelli@gmail.com), [aeprast@biologia.uffj.br](mailto:aeprast@biologia.uffj.br)

### RESUMO

O balanço entre fotossíntese e respiração (metabolismo) desempenha um importante papel sobre a pressão parcial de dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) nas águas urbanas de elevada produtividade. As lagoas tropicais costeiras podem apresentar intensos processos metabólicos, consequência de flutuações naturais e antropogênicas nos aportes da bacia de drenagem ou da troca de água marinha. O presente trabalho avaliou a variação de curto prazo do metabolismo aquático e da  $p\text{CO}_2$  nas águas de uma lagoa urbana tropical (Lagoa Rodrigo de Freitas) ao longo de 7 dias consecutivos. A Lagoa Rodrigo de Freitas se localiza em uma área densamente povoada na cidade do Rio de Janeiro - Brasil, sendo submetida ao lançamento de efluentes domésticos, que acarreta recorrentes mortandades de organismos. As concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , os fluxos de  $\text{CO}_2$  na interface água-ar, as estimativas do metabolismo aquático e o índice de respiração (IR) foram determinados nas águas superficiais e de fundo. Nossos resultados revelaram uma relação negativa entre ambos os gases, confirmando o papel do metabolismo aquático sobre a predominância da supersaturação de  $\text{CO}_2$  e da subsaturação de  $\text{O}_2$  na estação de coleta, a qual é descrita para maioria das águas continentais. Além disso, valores de IR próximos do limite crítico à respiração aeróbica (em torno de 0,7) foram observados especialmente nas águas de fundo, que apresentou persistência de supersaturação de  $\text{CO}_2$  ao longo do tempo. Já as águas superficiais foram mais variáveis. A comparação entre os períodos anterior e posterior à chuva e abertura da conexão ao mar (chuva+comporta) sugere a alternância nas águas superficiais entre fontes e sumidouros de  $\text{CO}_2$  à atmosfera (de 3,1 a -1,4  $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). Essas variações da saturação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  nas águas da Lagoa Rodrigo de Freitas não acompanharam as flutuações do metabolismo aquático diário, sugerindo que o balanço dos gases metabólicos também pode ser influenciado por mudanças acumuladas nos dias anteriores. Como conclusão, processos naturais e antropogênicos, incluindo chuvas e aberturas da conexão com o mar, podem contribuir para mudanças drásticas no metabolismo aquático, especialmente devido às altas temperaturas e ao aporte de nutrientes estimulando os processos biológicos nos ecossistemas urbanos tropicais.

**Palavras-chave:** metabolismo aquático;  $p\text{CO}_2$ ; mudanças de curto prazo; Lagoa Rodrigo de Freitas.

### ABSTRACT

**SHORT-TERM CHANGES IN THE METABOLISM AND  $\text{PCO}_2$  IN RODRIGO DE FREITAS LAGOON: STRONG DYNAMISM IN A URBAN TROPICAL ECOSYSTEM.** The balance between photosynthesis and respiration (metabolism) play an important role on the partial pressure of carbon dioxide

( $p\text{CO}_2$ ) in productive urban waters. In this way, tropical coastal lagoons may show intense metabolic processes, influenced by common natural and anthropogenic fluctuations in inputs from the watershed or in the marine water exchange. Here, we assessed short-term changes in the aquatic metabolism and  $p\text{CO}_2$  in waters of an urban tropical lagoon (Rodrigo de Freitas lagoon) over seven consecutive days. The Rodrigo de Freitas Lagoon is located in a high densely populated area in the city of Rio de Janeiro – Brazil, receiving domestic sewage discharges that cause recurrent episodes of organism mortalities. The measurements of  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  concentrations were performed at surface and bottom waters to estimate air-water  $\text{CO}_2$  fluxes, aquatic metabolism and the respiration index (RI). Our results revealed a negative relationship between both gases, confirming the role of the aquatic metabolism on the predominance of  $\text{CO}_2$  supersaturation and  $\text{O}_2$  undersaturation observed here, which is described for most inland waters. Additionally, we observed events of RI near the critical limit to aerobic respiration (around 0.7), especially in bottom waters with persistence of  $\text{CO}_2$  supersaturation over time. In contrast, surface waters were more variable for metabolic variables. Comparing the periods before and during the rain coupled to gate openings to the sea (Rainy+Gate) with that after, surface waters showed shifts from sources to sink of  $\text{CO}_2$  to the atmosphere (from 3.1 to  $-1.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). The decoupling between the daily aquatic metabolism and saturation of  $\text{CO}_2$  or  $\text{O}_2$  in waters of Rodrigo de Freitas Lagoon suggested that metabolic gases may be also influenced by intense changes in the metabolism over previous days. In conclusion, rainfall and the openings of the connection to the sea likely contributed to these drastic changes in the aquatic metabolism. The biological responses after natural and anthropogenic processes might be enhanced in those tropical urban ecosystems showing typical high temperatures and substantial nutrient inputs.

**Keywords:** aquatic metabolism;  $p\text{CO}_2$ ; short-term changes; Rodrigo de Freitas Lagoon.

## RESUMEN

**VARIACIONES DE CORTO PLAZO EN EL METABOLISMO Y LA  $p\text{CO}_2$  EN LA LAGUNA RODRIGO DE FREITAS: ELEVADO DINAMISMO EN UN ECOSISTEMA TROPICAL URBANO.** El balance entre fotosíntesis y respiración (metabolismo) desempeña un papel importante para la presión parcial de dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) en las aguas urbanas de elevada productividad. Las lagunas tropicales costeras pueden presentar intensos procesos metabólicos, consecuencia de fluctuaciones naturales y antropogénicas en los aportes a la cuenca de drenaje o del intercambio de agua marina. El presente trabajo evaluó la variación a corto plazo del metabolismo acuático y de la  $p\text{CO}_2$  en el agua de una laguna urbana tropical (Laguna Rodrigo de Freitas) a lo largo de 7 días consecutivos. La Laguna Rodrigo de Freitas se localiza en un área densamente poblada en la ciudad de Río de Janeiro - Brasil, siendo sometida a descargas de efluentes domésticos, que acarrearán mortandades recurrentes de organismos. Las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ , los flujos de  $\text{CO}_2$  en la interfaz agua-aire, las estimativas del metabolismo acuático y el índice de respiración (IR) fueron determinados en las aguas superficiales y del fondo. Nuestros resultados revelaron una relación negativa entre ambos gases, confirmando el papel del metabolismo acuático sobre la predominancia de la supersaturación de  $\text{CO}_2$  y de la subsaturación de  $\text{O}_2$  en la estación de muestreo, la cual es descrita para la mayoría de aguas continentales. Adicionalmente, valores de IR próximos del límite crítico para la respiración aeróbica (en torno de 0,7) fueron observados, especialmente en las aguas del fondo, que presentaron persistencia de supersaturación de  $\text{CO}_2$  a lo largo del tiempo. En contraste, las aguas superficiales fueron más variables. La comparación entre los períodos antes y después de la lluvia y de abertura de la conexión al mar (lluvia+compuerta) sugiere la alternancia en las aguas superficiales entre fuentes y sumideros de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera (de 3,1 a  $-1,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Estas variaciones en la saturación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  en el agua de la Laguna Rodrigo de Freitas no acompañaron las fluctuaciones del metabolismo acuático diario, lo cual sugiere que el balance de los gases metabólicos también puede ser influenciado por cambios acumulados en los días anteriores. Como conclusión, procesos naturales y antropogénicos, incluyendo lluvias y aberturas de la conexión con el mar, pueden contribuir para cambios drásticos en el metabolismo acuático, especialmente debido a las altas temperaturas y al aporte de nutrientes, estimulando los procesos biológicos en los ecosistemas urbanos tropicales.

**Palabras clave:** metabolismo acuático;  $p\text{CO}_2$ ; cambios a corto plazo; Laguna Rodrigo de Freitas.

## BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA SOBRE O METABOLISMO DOS LAGOS TROPICAIS E SUAS IMPLICAÇÕES AO CLIMA E À MORTANDADE DE ORGANISMOS

No nível dos organismos, o metabolismo pode ser definido como o processamento biológico de energia e materiais (Brown *et al.* 2004), o qual inclui o balanço entre as reações metabólicas que fixam energia, produzindo carbono orgânico, e aquelas que liberam energia, degradando esses mesmos compostos (Clarke & Fraser 2004). Além da importância energética à manutenção da vida, o metabolismo biológico apresenta implicações relevantes ao ciclo do carbono (C) e ao próprio clima do planeta, uma vez que pode resultar na apreensão ou na liberação de gases com a propriedade de intensificar o aquecimento global por efeito estufa (Ahn & Brook 2008, Wohlers *et al.* 2009). O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) envolvido diretamente no metabolismo biológico é dos mais importantes dentre os gases do efeito estufa (IPCC 2007, Solomon *et al.* 2010).

Passando do nível dos organismos à escala dos ecossistemas, existe, portanto, um balanço entre os seres que produzem e aqueles que apenas degradam os compostos orgânicos de outros organismos. É reconhecida a importância dos processos de quimiossíntese (Enrich-Prast *et al.* 2009) e de degradação anaeróbica (Bastviken *et al.* 2003, Bastviken 2009) da matéria orgânica. No entanto, a produção de moléculas orgânicas a partir da conversão da energia solar em química pela fotossíntese (F) bem como sua degradação pela respiração (R) são consideradas as principais vias metabólicas de síntese e decomposição, respectivamente, do carbono orgânico no planeta (Cole *et al.* 2000). Os seres fotossintetizantes são autotróficos que produzem seu próprio alimento pela fotossíntese e o degradam pela respiração, apresentando um balanço líquido de consumo de CO<sub>2</sub> e liberação de oxigênio (O<sub>2</sub>). Já os seres heterotróficos consomem a matéria orgânica de outros organismos, somente absorvendo O<sub>2</sub> e liberando CO<sub>2</sub> pela respiração. O balanço metabólico entre as principais reações de síntese e degradação da matéria orgânica, respectivamente, F e R, reflete a produtividade líquida ecossistêmica,

por isso denominada de metabolismo do ecossistema (Odum 1956, Hanson *et al.* 2003).

As águas naturais são um destino importante aos aportes de matéria orgânica advindos dos ecossistemas adjacentes, a partir do escoamento hídrico superficial e subsuperficial que os interliga (Cole *et al.* 2007). Como consequência, os ecossistemas aquáticos podem apresentar um metabolismo autotrófico (F>R), quando predomina a degradação de carbono orgânico produzido pela fixação de CO<sub>2</sub> por algas e plantas submersas, ou heterotrófico (F<R), quando predomina no meio aquático a mineralização de substratos orgânicos terrestres à CO<sub>2</sub> (Cole *et al.* 2000, Marotta 2006). Esse balanço determina a pressão parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) das águas naturais, cujos valores acima ou abaixo do equilíbrio atmosférico resultam, respectivamente, na evasão ou na apreensão líquidas desse gás (Duarte & Agusti 1998, Duarte & Prairie 2005). Por conseguinte, as emissões de CO<sub>2</sub> à atmosfera podem ter origem tanto pelas atividades humanas, especialmente devido tanto à queima de combustíveis fósseis (IPCC 2007, Solomon *et al.* 2009) quanto pelo balanço biológico natural entre os organismos que apreendem e liberam esse gás (Clarke & Fraser 2004). Na medida em que as atividades humanas alteram comumente as condições ecológicas, os recursos à biota e a própria teia trófica, também podem influenciar esse balanço biológico natural de CO<sub>2</sub> nos ecossistemas (Schindler *et al.* 1997, Marotta *et al.* 2012).

Dentre os ecossistemas aquáticos, os lagos são bem distribuídos na superfície terrestre (Downing *et al.* 2006, Seekell & Pace 2011) e apresentam comumente baixa altitude, tornando-se reconhecidos ecossistemas de destino e acumulação de aportes orgânicos e inorgânicos advindos do meio terrestre (Sobek *et al.* 2003). Esta característica na bacia de drenagem torna os lagos cruciais no ciclo do C no planeta (Cole *et al.* 2007, Tranvik *et al.* 2009). Em escala global, os sedimentos lacustres podem representar um importante estoque de carbono orgânico (Tranvik *et al.* 2009), embora uma significativa parcela também possa ser mineralizada (Gudasz *et al.* 2010). Nesse sentido, as águas lacustres são predominantemente supersaturadas de CO<sub>2</sub> e constituem uma significativa fonte global deste gás à atmosfera (Marotta *et al.* 2009a), a qual é subsidiada

pelo aporte de substratos orgânicos terrestres ao metabolismo heterotrófico (Cole *et al.* 1994, Duarte & Prairie 2005) ou mesmo pela entrada direta de CO<sub>2</sub> via lençol freático (Marotta *et al.* 2010b). O metabolismo lacustre pode apresentar elevadas variações de curto prazo, mesmo quando comparados dias consecutivos, pois mudanças meteorológicas afetam as condições e os recursos tanto à respiração quanto à produção primária (Staeher & Sand-Jensen 2007). Nos lagos, os processos do ciclo do C também podem ser altamente alterados pela ação humana, dinâmicas que podem ser relativamente rápidas (Marotta *et al.* 2009c, Tranvik *et al.* 2009). Mudanças de curto prazo de origem natural ou antropogênica nos processos metabólicos são ainda pouco estudadas, apesar de serem potencialmente relevantes nos ecossistemas (Staeher & Sand-Jensen 2007, Montagnes *et al.* 2008).

Na bacia de drenagem, os aportes de efluentes domésticos que resultam no enriquecimento de nutrientes (eutrofização) nos lagos são ainda muito comuns (Schindler 2006, Marotta *et al.* 2008), especialmente na costa brasileira (Esteves 1998). Esses efluentes são ricos tanto em nutrientes inorgânicos quanto em compostos orgânicos, recursos que influenciam substancialmente o metabolismo dos ecossistemas aquáticos (Schindler *et al.* 1997, Duarte & Agusti 1998, Hanson *et al.* 2003) ao favorecerem ambos os processos de produção primária (Schindler 1978) e de decomposição orgânica (Azam 1998). Mesmo que ambas as atividades autotrófica e heterotrófica sejam favorecidas pela maior disponibilidade de nutrientes, a eutrofização tende a favorecer mais a autotrofia líquida nos lagos (Duarte & Agusti 1998, Biddanda *et al.* 2001). No entanto, a eutrofização em águas ricas de substratos orgânicos terrestres pode resultar, por outro lado, na persistência da heterotrofia líquida e dos altos valores de pCO<sub>2</sub> nos ecossistemas lacustres (Cole *et al.* 2000, Marotta *et al.* 2010a). Nesse sentido, a excessiva carga orgânica dos esgotos é uma causa frequente dos eventos de mortandade massiva de organismos, incluindo peixes, nas águas naturais. A intensa degradação bacteriana dos compostos orgânicos consome grandes quantidades de O<sub>2</sub>, tornando esse recurso escasso à respiração das espécies aquáticas superiores (Diaz & Rosenberg 2008, Vaquer-Sunyer & Duarte 2008). Além disso, os elevados valores de pCO<sub>2</sub> podem prejudicar a absorção de O<sub>2</sub> pela respiração mesmo em águas

com maior disponibilidade deste gás, uma vez que reduzem o denominado índice respiratório, calculado a partir da razão pO<sub>2</sub>:pCO<sub>2</sub> (Brewer & Peltzer 2009). Dessa forma, o lançamento de esgotos e a abertura de vazadouros ao mar constituem dinâmicas muito comuns nos lagos, as quais podem modificar intensamente a qualidade da água, o metabolismo e o subsequente balanço de CO<sub>2</sub> nesses ecossistemas (Marotta *et al.* 2010a).

Nos trópicos, os ecossistemas lacustres são ainda submetidos a temperaturas anuais mais quentes em relação aos de outras latitudes, o que intensifica tanto os processos biológicos (Brown *et al.* 2004, Clarke & Fraser 2004) quanto a evasão por difusão físico-química dos gases à atmosfera (Stumm & Morgan 1996). Apesar do predomínio do metabolismo heterotrófico devido à influência dos aportes orgânicos terrestres (Duarte & Prairie 2005, Cole *et al.* 2007), determinadas condições também podem favorecer intensamente o metabolismo autotrófico e a subsequente apreensão de CO<sub>2</sub> atmosférico em uma parcela minoritária dos lagos tropicais (Marotta *et al.* 2010a, Gu *et al.* 2011). Por conseguinte, as mais altas temperaturas contribuem para intensificar tanto as emissões médias de CO<sub>2</sub> por área quanto a variabilidade dessas taxas nos lagos de baixas latitudes (Marotta *et al.* 2009a). A Lagoa Rodrigo de Freitas, situada na cidade do Rio de Janeiro, é um ecossistema tropical de múltiplos usos que foi submetido, nas últimas décadas, ao intenso processo de eutrofização e alteração da troca de águas com o mar. A eutrofização artificial na bacia de drenagem da Lagoa Rodrigo de Freitas, causada pelo crescimento urbano sem a devida infraestrutura sanitária (Gonzalez *et al.* 2006, Loureiro *et al.* 2009), é um processo muito comum na costa brasileira (Knoppers *et al.* 1991, Esteves 1998). Essa lagoa urbana altamente utilizada e alterada pelo agente antrópico se torna, portanto, um relevante ecossistema de pesquisa sobre taxas tropicais potencialmente intensas e variáveis do metabolismo aquático e dos subsequentes fluxos de CO<sub>2</sub> à atmosfera.

## OBJETIVO

Avaliar a variação de curto prazo do metabolismo aquático e da pCO<sub>2</sub> nas águas de uma lagoa eutrófica tropical (Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro) ao longo de 7 dias consecutivos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A Lagoa Rodrigo de Freitas (Figura 1) é um ecossistema pequeno com área de aproximadamente 2,26km<sup>2</sup> e raso com profundidade média entre 3 e 4m (Loureiro *et al.* 2009), cujas águas são tipicamente salobras pela sua posição na costa (Gonzalez *et al.* 2006). Essa lagoa está situada entre as latitudes 22°57'02" e 22°58'09" Sul e longitude 43°11'09" e 43°13'03" Oeste, sendo circundada por uma das áreas mais densamente povoadas da cidade do Rio de Janeiro. Ao longo das últimas décadas, a Lagoa Rodrigo de Freitas foi submetida ao intenso lançamento de efluentes domésticos na sua bacia de drenagem, tornando suas águas eutróficas e mais susceptível à mortandade de organismos (Lutterbach *et al.* 2001, Gonzalez *et al.* 2006, Loureiro *et al.* 2009).

Uma das medidas mitigadoras mais comumente utilizadas pelo poder público na Lagoa Rodrigo de Freitas é a abertura de uma comporta do canal que a liga ao mar (Jardim de Alah), especialmente nos ciclos de maré alta. A abertura dessa comporta é regulada pelo Instituto de Meio Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (INEA). A entrada de águas marinhas contribui para reduzir as concentrações de nutrientes e de matéria orgânica na lagoa, mesmo que essa troca

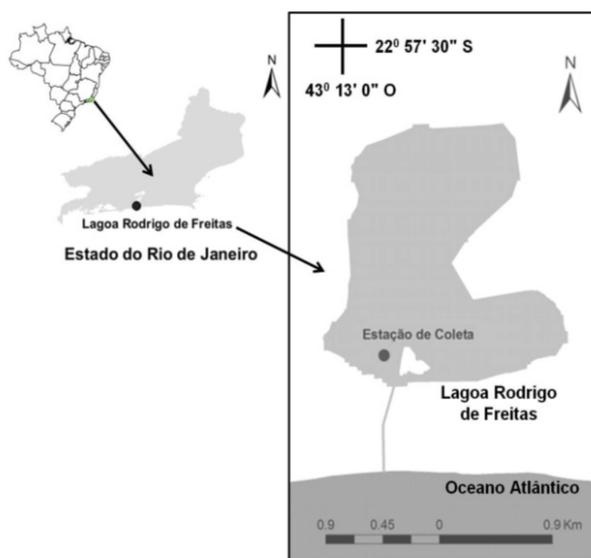
seja atualmente ineficiente pelo assoreamento do canal do Jardim de Alah (Lima 2010).

O clima da área é tropical úmido, apresentando elevadas temperaturas o ano inteiro (variando de 21 a 26°C) e meses mais chuvosos tipicamente observados entre Dezembro e Março (pluviosidade mensal média em torno de 140mm), de acordo com as médias mensais da normal climatológica de 1961-1990 (dados do Instituto Nacional de Meteorologia). No entanto, os eventos de precipitação podem ocorrer em qualquer época, pois mesmo os meses tipicamente menos chuvosos, de Junho a Agosto, apresentam pluviosidade mensal média acima de 40mm (normal climatológica de 1961-1990, dados do Instituto Nacional de Meteorologia).

### ESTAÇÃO DE COLETA E DELINEAMENTO DO ESTUDO

A estação de coleta na Lagoa Rodrigo de Freitas apresentou profundidade em torno de 2,5m durante o estudo e se localiza próximo ao seu canal de comunicação ao mar (Figura 1), onde é esperada uma maior influência da entrada de água marinha durante os momentos de comporta aberta em maré alta. A amostragem foi realizada ao longo de 7 dias consecutivos (6 ciclos completos de 24 horas mais um período de 12 horas) entre 17 e 23 de Julho de 2009. Nesse período, as concentrações totais de nitrogênio e fósforo nas águas foram quantificadas e se mantiveram em torno de 100 e 3,5  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , respectivamente, evidenciando a persistência de um estado mesotrófico de acordo com classificação para lagos tropicais quentes (Salas & Martino 1991).

As coletas de água para as medidas de pH, alcalinidade, temperatura e salinidade, permitindo calcular as concentrações de CO<sub>2</sub> (detalhes na seção abaixo de métodos analíticos), bem como de O<sub>2</sub> foram realizadas em ambas as profundidades de superfície e fundo do amanhecer ao anoitecer (às 6:30, 10:00, 14:00 e 18:00 horas) em cada um dos 7 dias consecutivos. Apesar de curto prazo, o presente estudo abrangeu períodos mais chuvosos (dias 3 e 4) e com aberturas da comporta em maré alta (dias 3, 4 e 5), de forma que não foi possível separar ambos os efeitos na discussão dos resultados. Esses dias de comporta aberta foram obtidos junto ao INEA, enquanto os dados de pluviosidade de uma estação



**Figura 1.** Localização geográfica da estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas.

*Figure 1.* Sampling station location in Rodrigo de Freitas Lagoon.

climatológica próxima (Jardim Botânico), descritos na seção de resultados, a partir do sistema Alerta Rio/Prefeitura do Rio de Janeiro (disponível em [www0.rio.rj.gov.br/alertario/](http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/)). Consequentemente, foram analisados três períodos no presente estudo: I - Antes (dias 1 e 2), II - Durante (dias 3, 4 e 5) e III - Após (dias 6 e 7) o período chuvoso com aberturas da comporta em maré alta (Chuvoso+Comporta).

### MÉTODOS ANALÍTICOS

As concentrações de CO<sub>2</sub> nas águas superficiais foram determinadas pelo método pH-alcalinidade (Stumm & Morgan 1996) com as correções apropriadas para temperatura, altitude e força iônica (Cole *et al.* 1994). O pH foi medido com uma precisão de 0,01 usando um pHmetro Metrohm 826 e a alcalinidade total pela titulação de Gran (APHA 1992). A temperatura e a salinidade foram mensuradas com um termosalinômetro YSI-30 calibrado. Os valores de pCO<sub>2</sub> na água foram calculados a partir da lei de Henry, considerando a divisão entre as concentrações de CO<sub>2</sub> e a constante de Henry para este gás em cada condição de temperatura e salinidade (Weiss 1974). Os fluxos de CO<sub>2</sub> na interface água-ar (FCO<sub>2</sub>) foram estimados a partir do modelo de difusão do filme estagnante entre os meios aquático e atmosférico:

$$FCO_2 = \alpha K ([CO_2]_{\text{água}} - [CO_2]_{\text{sat}})$$

no qual  $\alpha$  é o fator de enriquecimento químico (Wanninkhof & Knox 1996); K é a velocidade pistão (cm h<sup>-1</sup>) calculada como (Cole & Caraco 1998) e assumindo a média global de 3.28 m s<sup>-1</sup> para a velocidade do vento 10m acima do solo (Archer & Jacobson 2005); [CO<sub>2</sub>]<sub>água</sub> é a concentração de CO<sub>2</sub> (μmol L<sup>-1</sup>) na água; e [CO<sub>2</sub>]<sub>sat</sub> é a concentração de CO<sub>2</sub> (μmol L<sup>-1</sup>) na água que representaria o equilíbrio com a atmosfera de acordo com a lei de Henry (Weiss 1974), considerando uma pCO<sub>2</sub> em equilíbrio de 380 μatm.

O metabolismo aquático foi estimado conforme a tradicional metodologia baseada nas mudanças nas concentrações de gases envolvidos em ambos os processos de fotossíntese e de respiração na água (CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) como descrita por Odum (1956). Os preceitos desta metodologia ainda são largamente utilizados na literatura atual (Cole *et al.* 2000, Hanson *et al.* 2003, Hanson *et al.* 2008) e podem ser sumarizados como:

$$(F - R) = (\Delta CO_2 \text{ ou } O_2) + (FCO_2 \text{ ou } O_2) - A \text{ ou } \Delta O_2 + FO_2 - A$$

no qual (F - R) é o metabolismo aquático, representando a diferença entre fotossíntese e respiração, (ΔCO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>) é a taxa de variação das concentrações de CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub> nas águas (valores integrados entre superfície e fundo), (FCO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>) é o fluxo de CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub> na interface água-ar (valores positivos e negativos indicam, respectivamente, emissão e liberação líquidas à atmosfera), e A é a entrada alóctone de CO<sub>2</sub> diretamente da bacia de drenagem. Devido à influência preponderante do balanço entre fotossíntese e respiração para determinar as concentrações de CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub> nas águas lacustres, ao intervalo de poucas horas entre as medições para um possível papel de entradas externas e, até mesmo, aos grandes problemas logísticos para estimar o aporte de CO<sub>2</sub> diretamente da bacia de drenagem, o termo A é considerado insignificante ou nulo nesta fórmula (Odum 1956). Já o índice respiratório foi calculado como descrito em Brewer & Peltzer (2009), pela razão entre as pressões parciais de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> (pO<sub>2</sub>:pCO<sub>2</sub>) logaritimizada em base 10.

### TRATAMENTO ESTATÍSTICO

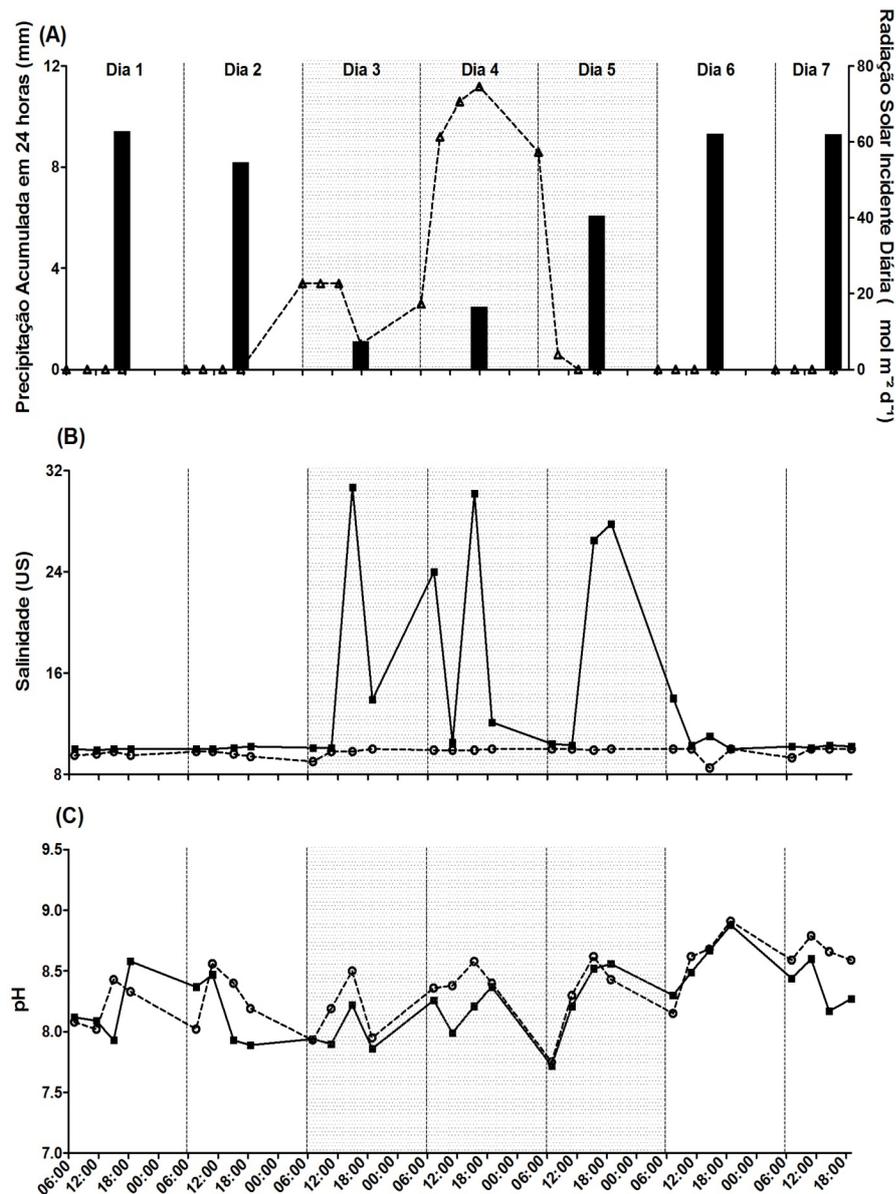
Os dados log-transformados apresentaram os princípios de parametricidade significativos, incluindo distribuição normal (Kolmogorov-Smirnov, p<0,05) e homogeneidade de variâncias (Bartlett, p>0,05). Consequentemente, os dados foram representados por média (± erro padrão; EP) e analisados por testes estatísticos paramétricos (Zar 1996). Os valores médios de cada variável amostrada em mesmos horários (6:00, 10:00, 14:00 ou 18:00 horas) foram comparados entre ambas as profundidades de coleta (superfície e fundo) usando o teste-t pareado (significativo p<0,05). Já as variáveis amostradas em uma mesma profundidade foram comparadas entre os diferentes horários (6:30, 10:00, 14:00 e 18:00 horas) e períodos (antes, durante e após as chuvas com aberturas de comporta com o mar) pela ANOVA *one-way* com medidas repetidas (significativo p<0,05) seguida do pós-teste de Tukey-Kramer (significativo p<0,05). Além disso, testes de correlação de Pearson (significativo

$p < 0,05$ ) foram usados entre pares de variáveis. Todos os testes estatísticos foram calculados no programa GraphpadPrism 5.0.

## RESULTADOS

Ao longo dos 7 dias estudados, um período chuvoso (pico de 11mm de precipitação acumulada nas 24 horas anteriores a cada momento de amostragem) e de substancial queda da radiação solar incidente

(em torno de 80%) foi observado nos dias 3 e 4 na Lagoa Rodrigo de Freitas (Figura 2A). Além disso, aumentos abruptos de salinidade foram detectados nas águas de fundo da estação de coleta durante os dias 3, 4 e 5, quando a comporta que liga a lagoa ao mar foi aberta (Figura 2B). Já o pH se manteve alcalino, mas apresentando elevada variação (entre 7,5 e 9,0) com tendência de aumento especialmente nos dias 6 e 7, após o período de abertura da comporta e subsequente entrada de água salina do mar (Figura 2C).

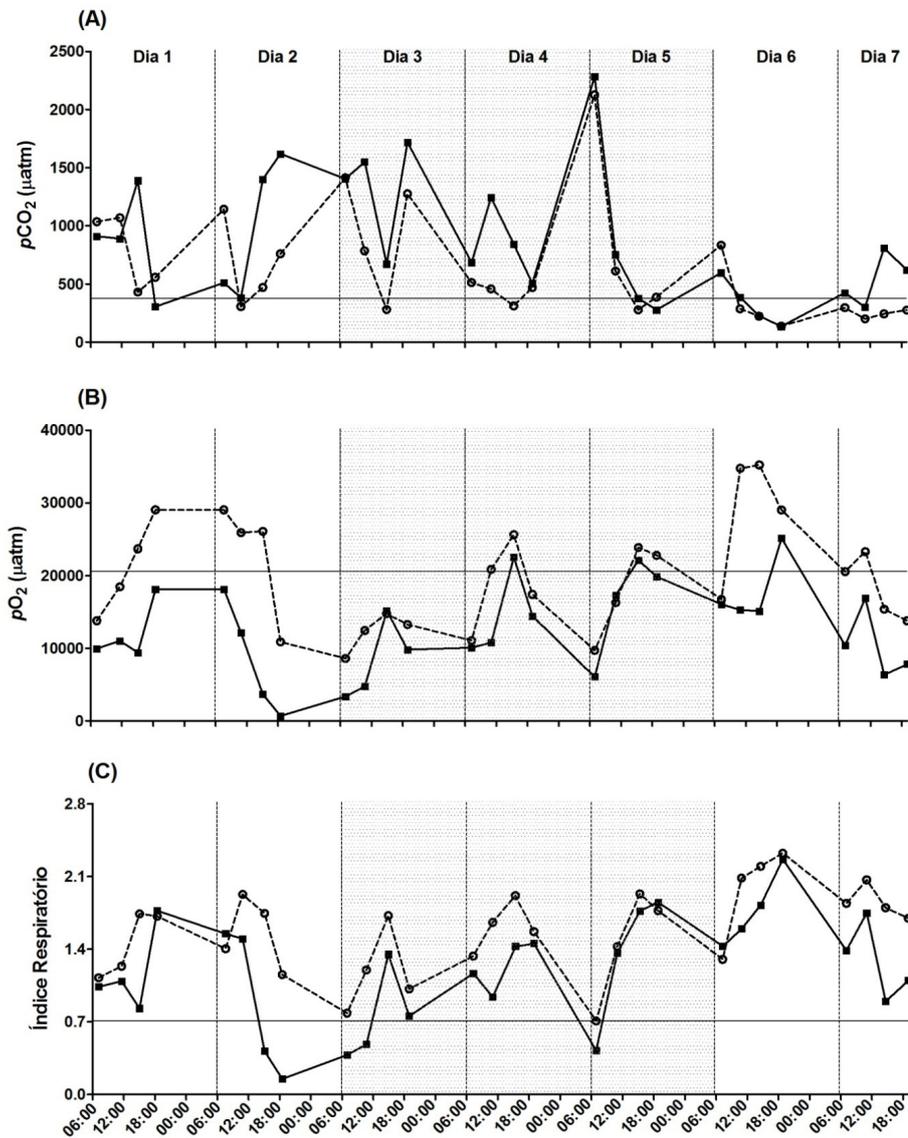


**Figura 2.** Variação de (A) precipitação acumulada nas 24 horas anteriores a cada amostragem (linha tracejada com triângulos abertos) e radiação solar incidente diária (barras pretas) próximas às margens da lagoa, bem como (B) salinidade e (C) pH nas águas de superfície (linhas tracejadas com círculos abertos) e de fundo (linhas contínuas com quadrados pretos) na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas ao longo de 7 dias consecutivos.

**Figure 2.** Changes in (A) Accumulated precipitation in the 24 hours preceding each sampling (dashed line with open triangles) and daily incidence of solar radiation (black bars) next to the lagoon margins. (B) salinity and (C) pH variation on surface (dashed lines with open circles) and bottom (unbroken line with filled squares) waters of Rodrigo de Freitas Lagoon, at the sampling station, over the 7 consecutive days.

As variáveis relacionadas ao metabolismo lacustre ( $p\text{CO}_2$ ,  $p\text{O}_2$  e IR) também apresentaram substanciais flutuações ao longo dos dias e horários em ambas as profundidades de coleta (Figura 3). A  $p\text{CO}_2$  (Figura 3A) e a  $p\text{O}_2$  (Figura 3B) apresentaram uma amplitude total de variação em torno de 15 vezes em cada profundidade, alternando valores acima e abaixo do equilíbrio atmosférico, mas com predomínio tanto na superfície quanto no fundo de supersaturação de  $\text{CO}_2$  (frequência em torno de 60 e 80%, respectivamente) e subsaturação de  $\text{O}_2$

(frequência em torno de 55 e 90% respectivamente). Já o índice respiratório nas águas de fundo (Figura 3C) apresentou uma amplitude total de variação de quase 8 vezes e com predominância de valores abaixo de 1,0 (frequência de 80%), dentre os quais uma parcela representativa era ainda menor do que 0,7 (frequência de 25%). Por outro lado, nas águas de superfície, foram observados valores de IR em uma amplitude mais restrita (de quase 2 vezes), predominantemente acima de 1,0 (frequência de 55%) e não menores que 0,7.



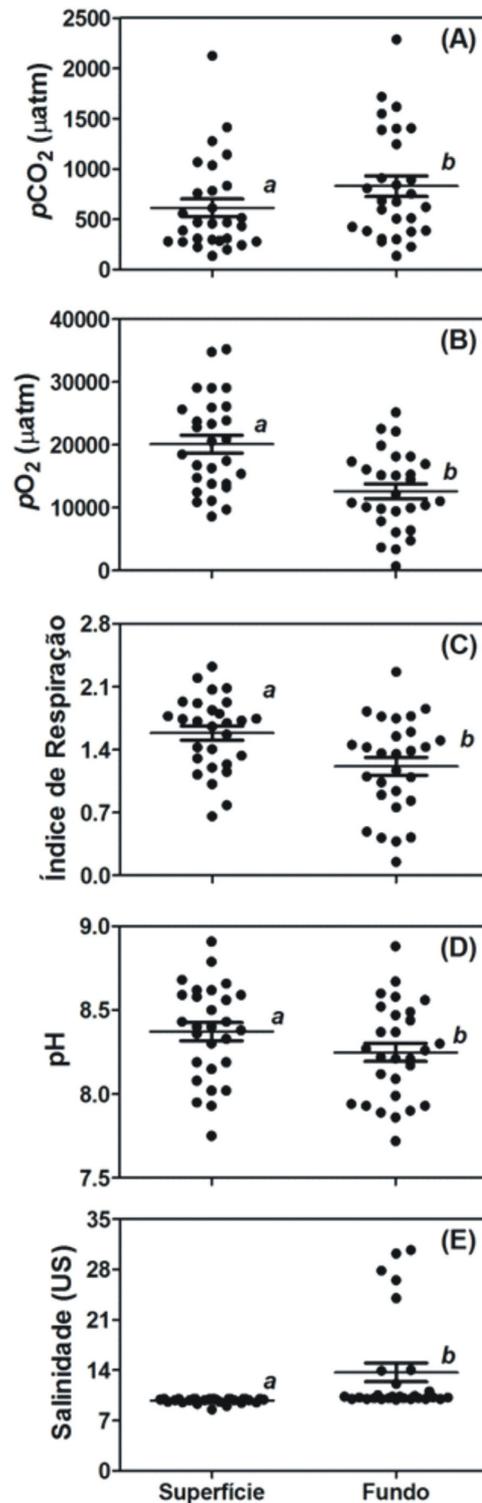
**Figura 3.** Variação de (A)  $p\text{CO}_2$ , (B)  $p\text{O}_2$  e (C) Índice Respiratório nas águas de superfície (linhas tracejadas com círculos abertos) e de fundo (linhas contínuas com quadrados pretos) na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas ao longo de 7 dias consecutivos. As linhas horizontais contínuas representam a  $p\text{CO}_2$  e a  $p\text{O}_2$  em equilíbrio com o meio atmosférico nos quadros A e B, respectivamente, além do limite crítico do Índice Respiratório para a respiração aeróbica marinha (Brewer & Peltzer 2009) no quadro C.

**Figure 3.** Changes in (A)  $p\text{CO}_2$ , (B)  $p\text{O}_2$  and (C) Respiration Index on surface (dashed line with open circles) and bottom (unbroken line with full circle) waters of Rodrigo de Freitas Lagoon, at the sampling station, over 7 consecutive days. Horizontal straight lines indicate the  $p\text{CO}_2$  and  $p\text{O}_2$  atmospheric equilibrium in panels A and B, respectively, and the Respiration Index critical limit for marine aerobic respiration in panel C (Brewer & Peltzer 2009).

Por conseguinte, os valores de  $p\text{CO}_2$ ,  $p\text{O}_2$  e IR foram significativamente diferentes nas águas de fundo do que nas de superfície (teste- $t$  pareado,  $p < 0,05$ ; Figura 4), sendo, em média, 35 % mais altos para  $p\text{CO}_2$  e mais baixos para  $p\text{O}_2$ , além de 25% menores para IR. As águas de fundo também foram mais salinas e levemente mais ácidas, em média, do que as de superfície, mostrando uma diferença significativa de 10 US e 0,12 unidades de pH respectivamente (teste- $t$  pareado,  $p < 0,05$ ; Figura 4).

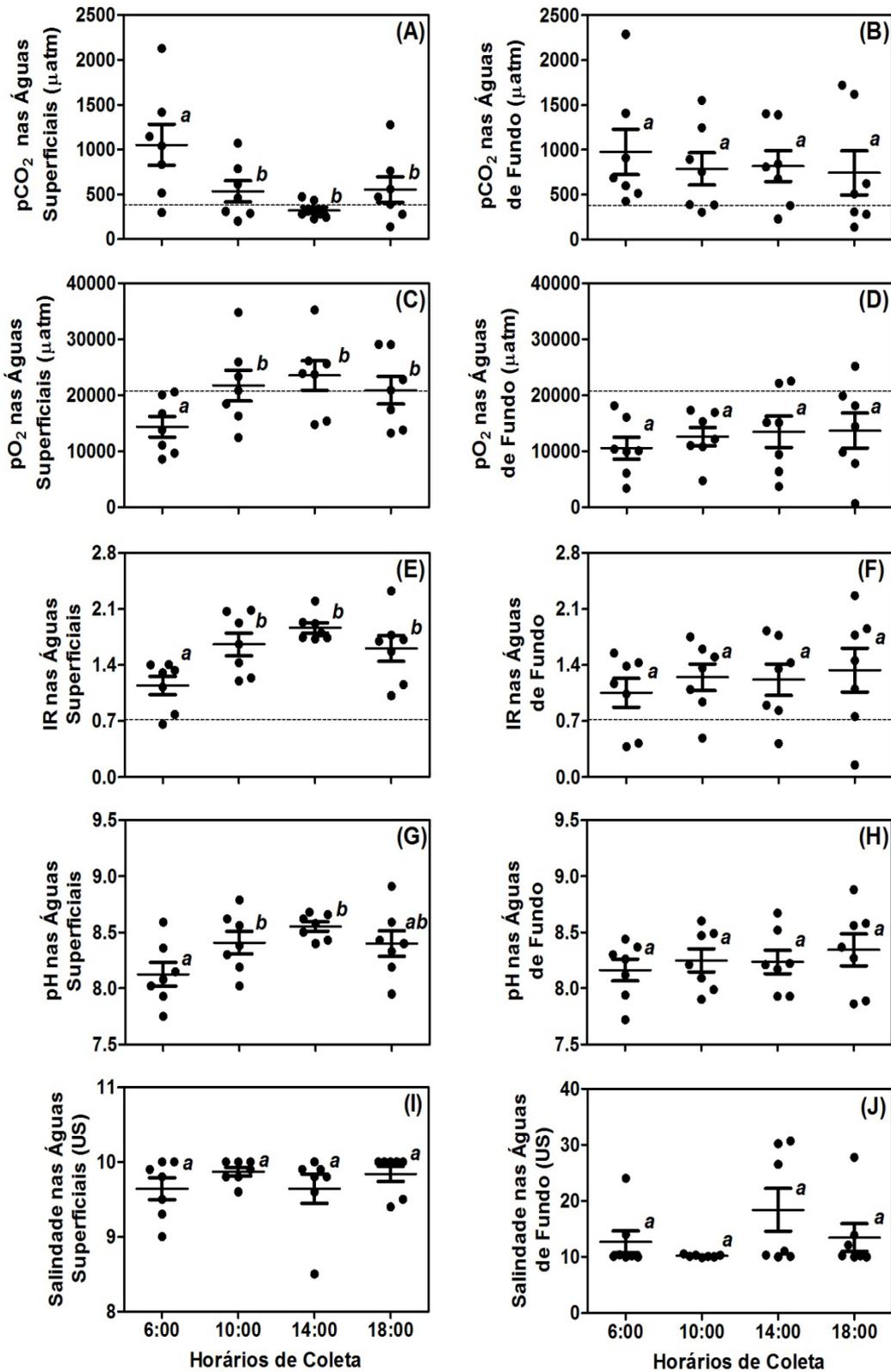
Na comparação entre horários, os valores de  $p\text{CO}_2$  na primeira coleta da manhã (6:30 horas) foram, em média, significativamente mais altos, 55% nas águas de superfície e 20% nas de fundo, em relação aos outros horários do estudados (teste- $t$  pareado,  $p < 0,05$ ; Figura 5). A  $p\text{O}_2$  média nesse primeiro horário, por sua vez, foi significativamente mais baixa em ambas as profundidades de superfície e fundo, 35 e 20% respectivamente, bem como o IR médio, 20 e 10% respectivamente (teste- $t$  pareado,  $p < 0,05$ ; Figura 5). Além disso, o pH foi levemente mais ácido (teste- $t$  pareado,  $p < 0,05$ ; Figura 5), em média 0,3 unidades, enquanto a salinidade não foi significativamente diferente entre os horários de coleta (teste- $t$  pareado,  $p > 0,05$ ).

As estimativas de metabolismo aquático tanto por  $\text{CO}_2$  quanto por  $\text{O}_2$  acompanharam, entre si, as mesmas tendências de alternância entre autotrofia e heterotrofia líquidas nos diferentes dias de coleta (Figura 6). Nesse sentido, as pressões parciais de ambos os gases medidos de forma independente ( $p\text{CO}_2$  e  $p\text{O}_2$ ) em todos os horários e profundidades apresentaram uma relação negativa significativa (regressão linear,  $R^2 = 0,40$ ;  $p < 0,05$ ; Figura 7). Os gases do metabolismo aquático também apresentaram diferenças significativas comparando os períodos antes (dias 1 e 2), durante (dias 3, 4 e 5) e depois (dias 6 e 7) o Chuvoso+Comporta (Tukey-Kramer,  $p < 0,05$ ; Figura 8). As diferenças foram significativas especialmente nas águas de superfície e na comparação do período posterior ao Chuvoso+Comporta com os demais (Tukey-Kramer,  $p < 0,05$ ; Figura 8). Nas águas superficiais, os valores de  $p\text{CO}_2$  foram, em média, quase 2 vezes superiores enquanto os de  $p\text{O}_2$  e IR foram em torno de 30 e 20 %, respectivamente, mais baixos no período posterior ao Chuvoso+Comporta em relação aos demais (Figura 8). No entanto, a intensa mudança do metabolismo aquático por  $\text{CO}_2$  ou  $\text{O}_2$  entre heterotrófico e autotrófico nos dias de coleta não apresentou nenhum padrão de diferença comparando os três períodos estudados (Figura 6).



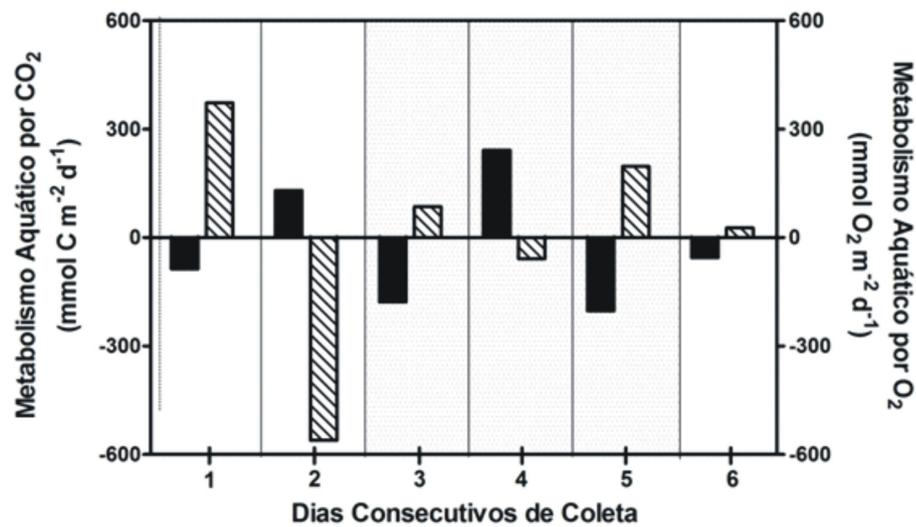
**Figura 4.** (A)  $p\text{CO}_2$ , (B)  $p\text{O}_2$ , (C) Índice Respiratório, (D) pH e (E) salinidade entre as águas de superfície e fundo na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas. Foram utilizados dados de todos os horários. Letras iguais representam diferenças não significativas entre profundidades (teste- $t$  pareado,  $p > 0,05$ ).

**Figure 4.** (A)  $p\text{CO}_2$ , (B)  $p\text{O}_2$ , (C) Respiration Index, (D) pH and (E) salinity in surface and bottom waters of Rodrigo de Freitas Lagoon, at the sampling station, over 7 consecutive days. Data from all samples were used. The same letters indicate non-significant differences between depths (paired  $t$ -test,  $p > 0,05$ ).



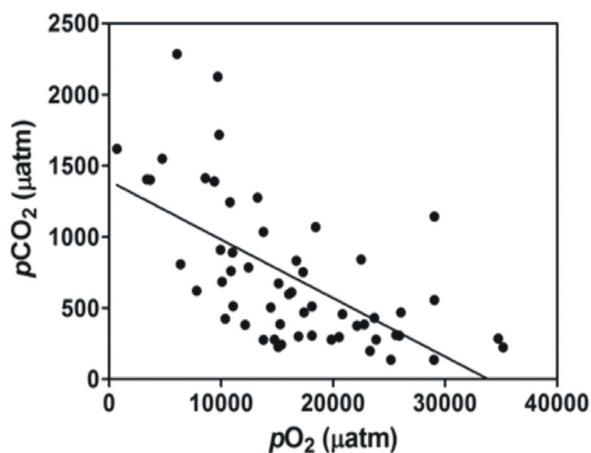
**Figura 5.** pCO<sub>2</sub>, pO<sub>2</sub>, Índice Respiratório, pH e salinidade nas águas superficiais (A, C, E, G e I respectivamente) e de fundo (B, D, F, H e J respectivamente) na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas entre diferentes horários. Foram utilizados dados de todos os dias estudados. Letras iguais representam diferenças não significativas no ciclo diário (Tukey-Kramer, p>0,05).

**Figure 5.** pCO<sub>2</sub>, pO<sub>2</sub>, Respiration Index, pH, and salinity in surface (A, C, E, G and I respectively); and bottom (B, D, F, H and J respectively) waters of Rodrigo de Freitas Lagoon, at the sampling station, among different hours. Data from all samples were used. The same letters indicate non-significant differences in the 24-hour cycle (paired t-test, p>0.05).



**Figura 6.** Metabolismo aquático diário por CO<sub>2</sub> (barras pretas) e O<sub>2</sub> (barras hachuradas) ao longo dos dias estudados na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas. Foram incluídos apenas os 6 ciclos completos de 24 horas (entre os dias 1 e 6). Valores de metabolismo positivos por CO<sub>2</sub> ou negativos por O<sub>2</sub> indicam heterotrofia líquida, enquanto o inverso significa autotrofia líquida.

**Figure 6.** Daily aquatic metabolism on CO<sub>2</sub> (black bars) and O<sub>2</sub> (cross-hatched bars) estimated at the sampling station in Rodrigo de Freitas Lagoon. Data from 6 complete 24-hour cycles were used (between days 1 and 6). Positive CO<sub>2</sub> and negative O<sub>2</sub> metabolic values indicate net heterotrophy, while the inverse indicates net autotrophy.



**Figura 7.** Relação entre pCO<sub>2</sub> e pO<sub>2</sub> nas águas da estação de coleta na Lagoa Rodrigo de Freitas. A linha sólida representa a equação (valores em média ± EP) da regressão linear ajustada  $p\text{CO}_2 (\mu\text{atm}) = -0,041 \pm 0,007 p\text{O}_2 (\mu\text{atm}) + 1393 \pm 126$ ;  $R^2 = 0,40$ ;  $F=34,9$ ;  $p<0,05$ .

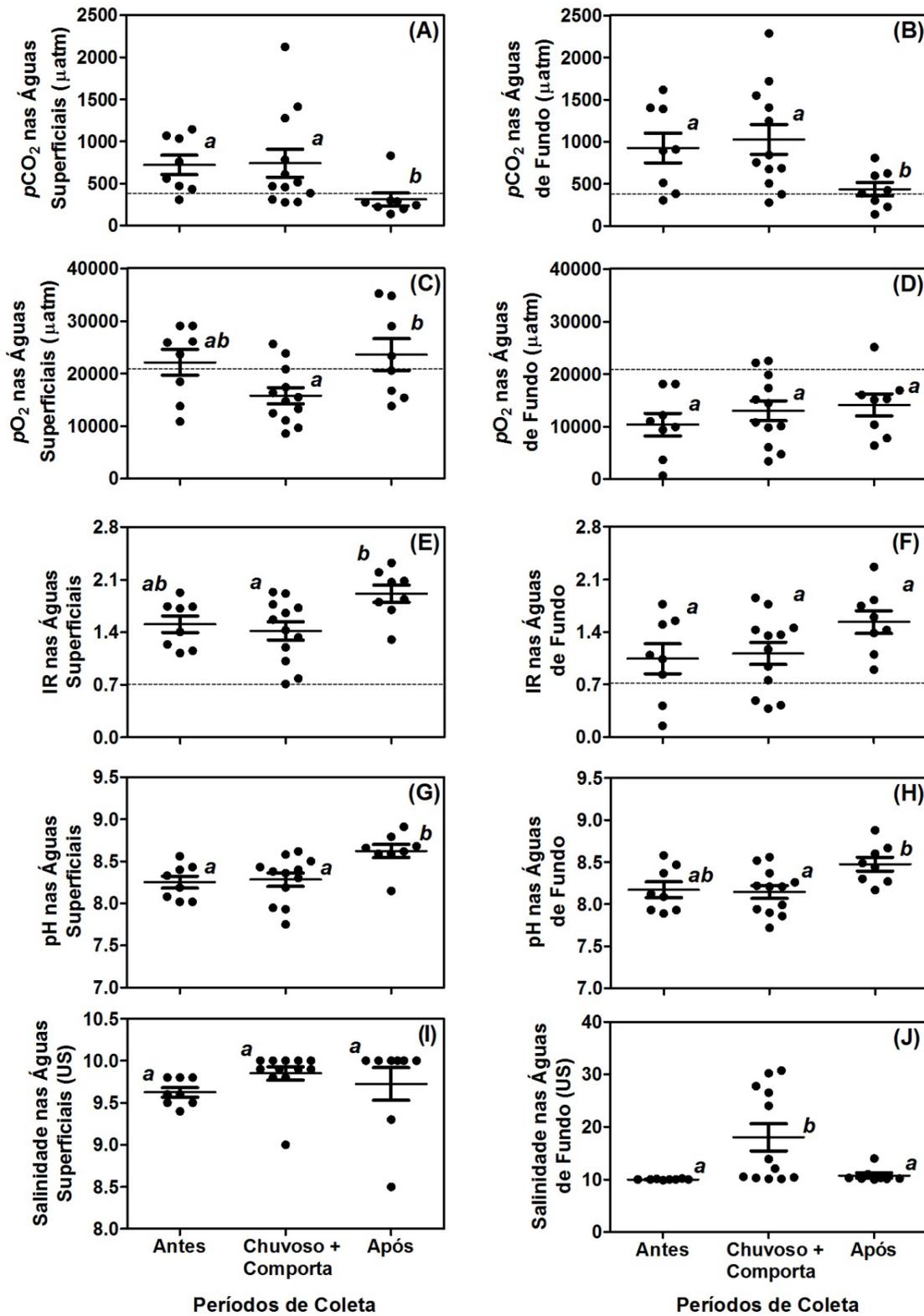
**Figure 7.** Correlation between pCO<sub>2</sub> and pO<sub>2</sub> values measured at the sampling station in Rodrigo de Freitas Lagoon. The solid line represents the fitted linear regression equation (values in average ± SE)  $p\text{CO}_2 (\mu\text{atm}) = -0,041 \pm 0,007 p\text{O}_2 (\mu\text{atm}) + 1393 \pm 126$ ;  $R^2 = 0,40$ ;  $F=34,9$ ;  $p<0,05$ .

## DISCUSSÃO

Nossos resultados revelaram que mesmo uma escala de tempo de curto prazo, restrita a uma semana, pode ser importante ao apresentar drásticas

mudanças dos gases metabólicos CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> nos ecossistemas lacustres urbanos, especialmente aqueles submetidos aos aportes de esgoto e à entrada esporádica de água do mar. O intenso metabolismo na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas também foi evidenciado pela relação negativa significativa aqui observada entre CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, a qual é comumente relacionada ao papel do balanço entre a fotossíntese e a respiração (Clarke & Fraser 2004). Essa ampla variação dos gases envolvidos no metabolismo aquático confirmou estudos prévios realizados em lagos tropicais, tanto na escala espacial global (Marotta *et al.* 2009a) ou intralagunar (Marotta *et al.* 2010a) quanto na escala temporal diária (Marotta *et al.* 2009b), sazonal (Marotta *et al.* 2010b) ou interanual (Marotta *et al.* 2010a). As mais elevadas temperaturas dos trópicos são condições que poderiam intensificar as respostas de ambos os metabolismos autotrófico e heterotrófico a processos naturais ou antropogênicos (Brown *et al.* 2004, Clarke & Fraser 2004), também contribuindo para aumentar essa variabilidade dos gases metabólicos nos ecossistemas aquáticos (Marotta *et al.* 2009a).

Além disso, a elevada disponibilidade de nutrientes é outra característica que influencia



**Figura 8.**  $pCO_2$ ,  $pO_2$ , Índice Respiratório, pH e salinidade nas águas superficiais (A, C, E, G e I respectivamente) e de fundo (B, D, F, H e J respectivamente) na estação de coleta da Lagoa Rodrigo de Freitas antes (dias 1 e 2), durante (dias 3 e 4) e após as chuvas associadas às aberturas da comporta de ligação ao mar (dias 6 e 7 ou período Chuvoso+Comporta). Foram utilizados dados de superfície e fundo. Letras iguais representam diferenças não significativas entre períodos (Tukey-Kramer,  $p>0,05$ ).

**Figure 8.**  $pCO_2$ ,  $pO_2$ , Respiration Index, pH, and salinity in surface (A, C, E, G and I respectively); and bottom (B, D, F, H and J respectively) waters of Rodrigo de Freitas Lagoon, at the sampling station, before (days 1 e 2), during (days 3 e 4) and after the rain coupled to the opening of the gate that connects this lagoon with the sea (days 6 and 7 or rainy+gate). Data from surface and bottom waters were used. The same letters indicate non-significant differences among periods (Tukey-Kramer,  $p>0.05$ ).

a atividade biológica (Schindler *et al.* 1997), sendo frequentemente relacionada ao maior favorecimento do metabolismo autotrófico em relação ao heterotrófico e à subsequente queda da  $p\text{CO}_2$  nas águas lacustres (Duarte & Agusti 1998, Gu *et al.* 2011). Diferentes fatores de regulação ascendente e descendente poderiam explicar essa tendência geral de favorecimento dos produtores primários em relação aos decompositores nas águas eutróficas (Biddanda *et al.* 2001). No entanto, apesar da condição enriquecida de nutrientes da estação de coleta, observamos um predomínio da supersaturação de  $\text{CO}_2$  e da subsaturação de  $\text{O}_2$  nas suas águas. Esse resultado confirmou o potencial papel da disponibilidade de recursos orgânicos, advindos dos esgotos ou da vegetação terrestre, para subsidiar a heterotrofia líquida mesmo em águas com mais alta disponibilidade de nutrientes (Cole *et al.* 2000, Marotta *et al.* 2010a, Marotta *et al.* 2012).

Na coluna d'água, os valores significativamente mais elevados de  $p\text{CO}_2$  e mais baixos de  $p\text{O}_2$  resultaram em um índice respiratório médio em torno de 0,7 nas águas de fundo, que é próximo ao limite crítico para respiração aeróbica marinha (Brewer & Peltzer 2009). As mais altas concentrações de sais marinhos acumulados no fundo, possivelmente devido à sua maior densidade, não se refletiram em um esperado pH mais alcalino em comparação às águas de superfície. O metabolismo aquático heterotrófico poderia ter sido intensificado nas maiores profundidades em razão da proximidade ao conteúdo orgânico do sedimento (Morris & Bradley 1999) e atenuação da radiação solar aos produtores primários (Carignan *et al.* 2000). A liberação de um gás reativo em meio aquoso como o  $\text{CO}_2$  pela heterotrofia poderia contribuir, por sua vez, para acidificar as águas lacustres (Marotta *et al.* 2010a), mesmo no fundo onde houvesse maior quantidade de bases marinhas (inferida pela salinidade) em relação às de superfície na estação de coleta. Adicionalmente, os ácidos orgânicos depositados poderiam reduzir o pH das águas de maior profundidade, incrementando a própria produção físico-química de  $\text{CO}_2$  (Stumm & Morgan 1996). Por conseguinte, o primeiro horário de coleta na manhã apresentou os mais elevados valores de  $p\text{CO}_2$  associados a mais baixos de  $p\text{O}_2$ , índice respiratório

e pH somente nas águas superficiais, sugerindo o papel do heterotrofia noturna em alterar o balanço desses gases na zona fótica, onde o metabolismo autotrófico é favorecido durante o período diurno (Staeher & Sand-Jensen 2007). Já nas águas de fundo, as diferenças não significativas de  $p\text{CO}_2$ ,  $p\text{O}_2$ , IR e pH entre horários de coleta confirmaram que o metabolismo heterotrófico poderia ser mais intenso durante todo o dia, isto porque o período diurno não apresentou flutuações consistentes nessas variáveis tais como as observadas nas águas superficiais. Portanto, evidencia-se que mesmo lagos tropicais rasos (profundidade <3,0 m) podem apresentar uma relevante diferenciação de gases metabólicos ao longo da coluna d'água, especialmente aqueles ecossistemas submetidos a entradas esporádicas de água marinha.

Ao longo da semana estudada na Lagoa Rodrigo de Freitas, o aumento da pluviosidade e as aberturas de comporta, permitindo a subsequente troca de águas com o mar no mesmo período (entre os dias 3 e 5), constituíram importantes dinâmicas que frequentemente alteram os processos metabólicos nas lagoas costeiras (Suzuki *et al.* 1998, dos Santos *et al.* 2006). A chuva é considerada um importante fator direcionador do metabolismo aquático heterotrófico (Rantakari & Kortelainen 2005), podendo resultar em intensos aumentos de  $\text{CO}_2$  nos lagos tropicais ao incrementar o aporte C orgânico e inorgânico nas suas águas (Marotta *et al.* 2010b). Além disso, a abertura da ligação ao mar também pode intensificar a decomposição orgânica pela mortandade de organismos, especialmente em lagoas de baixa salinidade submetidas a drásticos aumentos nessa condição (dos Santos *et al.* 2006). Por outro lado, as águas marinhas são tipicamente mais pobres de compostos orgânicos e de  $\text{CO}_2$ , contribuindo para reduzir as concentrações desse gás (Hung & Hung 2003) e a própria atividade heterotrófica (Ram *et al.* 2003) nos ecossistemas aquáticos costeiros de águas salinas ou salobras como a Lagoa Rodrigo de Freitas. Nessa lagoa, simulações matemáticas preveem redução de nutrientes e aumento de  $\text{O}_2$  nas águas se a conexão com o mar fosse aumentada (Lima 2010). Sendo assim, a combinação entre os aportes de ácidos orgânicos e inorgânicos de C pelas chuvas e a potencial diluição destes mesmos

compostos pela entrada de água do mar, via aberturas de comporta, pode ter contribuído para a ampla variação de curto prazo dos gases envolvidos no metabolismo aquático durante os 7 dias estudados. Essas dinâmicas poderiam explicar os menores valores, em média, de  $p\text{CO}_2$  e maiores de  $p\text{O}_2$  e IR no período posterior (dias 6 e 7) em relação ao Chuvoso+Comporta (entre os dias 3 e 5) nas águas superficiais da estação de coleta. Utilizando as estimativas do fluxo de  $\text{CO}_2$  instantâneo na interface água-ar de lagos tal como Cole *et al.* (1994), mas assumindo a velocidade do vento mensurada *in situ*, os fluxos de  $\text{CO}_2$  poderiam alcançar uma evasão média ( $\pm$  EP) de  $3,1 \pm 0,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  em ambos os períodos antes e durante os dias mais chuvosos e de comporta aberta (Chuvoso+Comporta). Já no período posterior, de uma fonte de emissão a estação de coleta se tornou um sumidouro de apreensão de  $\text{CO}_2$  em relação à atmosfera, em média  $\pm$  EP,  $-1,4 \pm 0,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Essa grande variabilidade nas águas de superfície contrastou com a potencial persistência heterotrófica nas águas de fundo, onde não foram observadas alterações significativas de  $p\text{CO}_2$ ,  $p\text{O}_2$ , IR ou pH entre quaisquer períodos de coleta.

As diferenças significativas apresentadas pelos gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , especialmente comparando os períodos depois do Chuvoso+Comporta com os demais, não se refletiu no mesmo padrão para o metabolismo aquático, apesar da intensa alternância de heterotrofia e autotrofia líquidas entre os dias estudados. As taxas do metabolismo aquático poderiam ser muito mais variáveis e sensíveis às diferenças nas condições e recursos dia a dia (Staehr & Sand-Jensen 2007), enquanto os gases dissolvidos na água poderiam ser mais influenciados por dinâmicas acumuladas ao longo do tempo. Esses resultados sugerem que os potenciais tempos de resposta dos processos metabólicos e de seus efeitos acumulados sobre os gases dissolvidos na água poderiam ser diferenciados.

Como conclusão, o presente estudo evidenciou que as altas temperaturas tropicais associadas a substanciais cargas antropogênicas de nutrientes podem estar relacionadas ao incremento não somente da magnitude do metabolismo e, subsequentemente, do fluxo de  $\text{CO}_2$  nos lagos urbanos muito alterados.

Essas condições estimulam a atividade dos organismos (Vrede 2005) e poderiam intensificar também a complexidade de diferentes respostas metabólicas, especialmente naqueles ecossistemas cujo controle da entrada de água marinha representa um fator adicional de variabilidade. Embora mais frequentes nas águas de fundo, os baixos níveis tanto de  $\text{O}_2$  quanto do índice respiratório, principais causas da mortandade de organismos nas águas naturais (Brewer & Peltzer 2009), também alcançaram níveis críticos, rapidamente e por curtos momentos, em toda a coluna d'água da Lagoa Rodrigo de Freitas. Tais respostas metabólicas altamente dinâmicas frente às alterações humanas nas águas lacustres demandam ser, portanto, melhor compreendidas pelo tomador de decisão. A variabilidade de curto prazo pode ser dotada de potenciais implicações relevantes ao manejo da mortandade de organismos e da própria produção de gases que intensificam o aquecimento global.

**AGRADECIMENTOS:** Os dados deste capítulo foram parcialmente financiados pelo Programa de Pós-Graduação em Ecologia da UFRJ, tendo sido gerados durante a disciplina Biogeoquímica Microbiana. Agradecemos ao CNPq, CAPES e FAPERJ, pelo financiamento complementar desta pesquisa por meio de projetos e bolsas de estudo. Os autores também são muito gratos à fundamental ajuda da bióloga Liane da Cruz Cordeiro Moreira nas análises químicas, ao professor André Megali Amado (UFRN) pelas relevantes discussões científicas durante a preparação do manuscrito, à Fundação Rio Águas por todo o auxílio logístico, ao barqueiro e pescador, Orlando Marins, pelo grande apoio em todas as coletas, aos revisores anônimos pelas valiosas contribuições e à bióloga Brenda da Rocha Alexandre pela confecção do mapa da Figura 1.

## REFERÊNCIAS

- AHN, J. & BROOK, E.J. 2008. Atmospheric  $\text{CO}_2$  and climate on millennial time scales during the last glacial period. *Science*, 322: 83-85, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1160832>
- APHA. 1992. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Eighteenth Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- ARCHER, C.L. & JACOBSON, M.Z. 2005. Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 110: 1-44, <http://dx.doi.org/10.1029/2004JD005462>
- AZAM, F. 1998. Microbial control of oceanic carbon flux: The plot thickens. *Science*, 280: 694-696, <http://dx.doi.org/10.1126/science.280.5364.694>

- BASTVIKEN, D. 2009. Methane. Pp. 783-805. In: G.E. Likens (ed.). Encyclopedia of inland waters. Elsevier, Oxford. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00117-4>
- BASTVIKEN, D.J.; EJLERTSSON, I.; SUNDH, E. & TRANVIK, L. 2003. Methane as a source of carbon and energy for lake pelagic food webs. *Ecology*, 84: 969-981, [http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084](http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084)
- BIDDANDA, B.; OGD AHL, M. & COTNER, J. 2001. Dominance of bacterial metabolism in oligotrophic relative to eutrophic waters. *Limnology and Oceanography*, 46: 730-739, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2001.46.3.0730>
- BREWER, P.G. & PELTZER, E.T. 2009. Oceans: Limits to Marine Life. *Science*, 324: 347-348, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1170756>
- BROWN, J.H.; GILLOOLY, J.F.; ALLEN, A.P.; SAVAGE, V.M. & WEST, G.B. 2004. Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 85: 1771-1789, <http://dx.doi.org/10.1890/03-9000>
- CARIGNAN, R.; PLANAS, D. & VIS, C. 2000. Planktonic production and respiration in oligotrophic Shield lakes. *Limnology and Oceanography*, 45: 189-199, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2000.45.1.0189>
- CLARKE, A. & FRASER, K.P.P. 2004. Why does metabolism scale with temperature? *Functional Ecology*, 18: 243-251, <http://dx.doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00841>
- COLE, J.J. & CARACO, N.F. 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>. *Limnology and Oceanography*, 43: 647-656, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1998.43.4.0647>
- COLE, J.J.; CARACO, N.F.; KLING, G.W. & KRATZ, T.K. 1994. Carbon-Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes. *Science*, 265: 1568-1570, <http://dx.doi.org/10.1126/science.265.5178.1568>
- COLE, J.J.; PACE, M.L.; CARPENTER, S.R. & KITCHELL, J.F. 2000. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations. *Limnology and Oceanography*, 45: 1718-1730, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2000.45.8.1718>
- COLE, J.J.; PRAIRIE, Y.T.; CARACO, N.F.; McDOWELL, W.H.; TRANVIK, L.J.; STRIEGL, R.G.; DUARTE, C.M.; KORTELAJNEN, P.; DOWNING, J.A.; MIDDELBURG, J.J. & MELACK, J. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10: 171-184, <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>
- DIAZ, R.J. & ROSENBERG, R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321: 926-929, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1156401>
- DOS SANTOS, A.M.; AMADO, A.M.; MINELLO, M.; FARJALLA, V.F. & ESTEVES, F.A. 2006. Effects of the sand bar breaching on *Typha domingensis* (PERS.) in a tropical coastal lagoon. *Hydrobiologia*, 556: 61-68, <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-005-1084-6>
- DOWNING, J.A.; PRAIRIE, Y.T.; COLE, J.J.; DUARTE, C.M.; TRANVIK, L.J.; STRIEGL, R.G.; McDOWELL, W.H.; KORTELAJNEN, P.; CARACO, N.F.; MELACK, J.M. & MIDDELBURG, J.J. 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51: 2388-2397, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>
- DUARTE, C.M. & AGUSTI, S. 1998. The CO<sub>2</sub> balance of unproductive aquatic ecosystems. *Science*, 281: 234-236, <http://dx.doi.org/10.1126/science.281.5374.234>
- DUARTE, C.M. & PRAIRIE, Y.T. 2005. Prevalence of heterotrophy and atmospheric CO<sub>2</sub> emissions from aquatic ecosystems. *Ecosystems*, 8: 862-870, <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0177-4>
- ENRICH-PRAST, A.; BASTVIKEN, D. & CRILL, P. 2009. Chemosynthesis. Pp. 211-225. In: G. E. Likens (ed.). Encyclopedia of inland waters. Elsevier, Oxford, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00126-5>
- ESTEVES, F.A. 1998. Lagoas Costeiras: Origem, funcionamento e possibilidades de manejo. Pp. 63-87. In: F.A. Esteves (ed.). Ecologia de Lagoas Costeiras. NUPEM, Macaé, RJ.
- GONZALEZ, A.M.; PARANHOS, R. & LUTTERBACH, M.S. 2006. Heterotrophic bacteria abundances in Rodrigo de Freitas Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil). *Brazilian Journal of Microbiology*, 37: 428-433.
- GU, B.; SCHELSKE, C.L. & COVENEY, M.F. 2011. Low carbon dioxide partial pressure in a productive subtropical lake. *Aquatic Sciences*, 73: 317-330, <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-010-0179-y>
- GUDASZ, C.; BASTVIKEN, D.; STEGER, K.; PREMKE, K.; SOBEK, S. & TRANVIK, L.J. 2010. Temperature-controlled

- organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 466: 478-481, <http://dx.doi.org/10.1038/nature09186>
- HANSON, P.C.; BADE, D.L.; CARPENTER, S.R. & KRATZ, T.K. 2003. Lake metabolism: Relationships with dissolved organic carbon and phosphorus. *Limnology and Oceanography*, 48: 1112-1119, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1112>
- HANSON, P.C.; CARPENTER, S.R.; KIMURA, N.; WU, C.; CORNELIUS, S.P. & KRATZ, T.K. 2008. Evaluation of metabolism models for free-water dissolved oxygen methods in lakes. *Limnology and Oceanography-Methods*, 6: 454-465, <http://dx.doi.org/10.4319/lom.2008.6.454>
- HUNG, J.J. & HUNG, P.Y. 2003. Carbon and nutrient dynamics in a hypertrophic lagoon in southwestern Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 42: 97-114, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963\(03\)00069-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(03)00069-1)
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KNOPPERS, B.; KJERFVE, B. & CARMOUZE, J. P. 1991. Trophic state and water turn-over time in 6 choked coastal lagoons in Brazil. *Biogeochemistry*, 14: 149-166, <http://dx.doi.org/10.1007/BF00002903>
- LIMA, L. S. 2010. Estudos de hidrodinâmica ambiental e mudanças na qualidade das águas da Lagoa Rodrigo de Freitas após ligação com o mar via dutos afogados, Rio de Janeiro. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 133p.
- LOUREIRO, D.D., FERNANDEZ, M.A.; HERMS, F. & LACERDA, L.D. 2009. Heavy metal inputs evolution to an urban hypertrophic coastal lagoon, Rodrigo De Freitas Lagoon, Rio De Janeiro, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159: 577-588, <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-008-0652-4>
- LUTTERBACH, M.T.S.; VAZQUEZ, J.C.; PINET, J.A.; ANDREATA, J.V. & da SILVA, A.C. 2001. Monitoring and spatial distribution of heterotrophic bacteria and fecal coliforms in the Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 44: 7-13.
- MAROTTA, H. 2006. Os fatores reguladores do metabolismo aquático e sua influência sobre o fluxo de dióxido de carbono entre os lagos e a atmosfera. *Oecologia brasiliensis*, 10: 177-185, <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2006.1002.05>
- MAROTTA, H.; DUARTE, C.M.; GUIMARÃES-SOUZA, B. & ENRICH-PRAST, A. 2012. Synergistic control of CO<sub>2</sub> emissions by fish and nutrients in a humic tropical lake. *Oecologia*, 168: 839-847, <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-011-2131-9>
- MAROTTA, H.; DUARTE, C.M.; MEIRELLES-PEREIRA, F.; BENTO, L.; ESTEVES, F.A. & ENRICH-PRAST, A. 2010a. Long-term CO<sub>2</sub> variability in two shallow tropical lakes experiencing episodic eutrophication and acidification events. *Ecosystems*, 13: 382-392, <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-010-9325-6>
- MAROTTA, H.; DUARTE, C.M.; PINHO, L. & ENRICH-PRAST, A. 2010b. Rainfall leads to increased pCO<sub>2</sub> in Brazilian coastal lakes. *Biogeosciences*, 7: 1607-1614, <http://dx.doi.org/10.5194/bg-7-1607-2010>
- MAROTTA, H.; DUARTE, C.M.; SOBEK, S. & ENRICH-PRAST, A. 2009a. Large CO<sub>2</sub> disequilibria in tropical lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 23: 1-4, <http://dx.doi.org/10.1029/2008GB003434>
- MAROTTA, H.; PAIVA, L.T. & PETRUCIO, M.M. 2009b. Changes in thermal and oxygen stratification pattern coupled to persistence of CO<sub>2</sub> outgassing in shallow lakes of the surroundings of Atlantic Tropical Forest, Brazil. *Limnology*, 10: 195-202, <http://dx.doi.org/10.1007/s10201-009-0272-x>
- MAROTTA, H.; SANTOS, R.O. & ENRICH-PRAST, A. 2008. Monitoramento limnológico: um instrumento para a conservação dos recursos hídricos no planejamento e na gestão urbano-ambientais. *Ambiente & Sociedade*, 11: 67-79, <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2008000100006>
- MAROTTA, H.; BENTO, L.; ESTEVES, F.A.; & ENRICH-PRAST, A. 2009c. Whole Ecosystem Evidence of Eutrophication Enhancement by Wetland Dredging in a Shallow Tropical Lake. *Estuaries and Coasts*, 32: 654-660, <http://dx.doi.org/10.1007/s12237-009-9152-1>
- MONTAGNES, D.J.S.; MORGAN, G.; BISSINGER, J.E.; ATKINSON, D. & WEISSE, T.S. 2008. Short-term temperature change may impact freshwater carbon flux: a microbial perspective. *Global Change Biology*, 14: 2823-2838, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01700.x>
- MORRIS, J.T. & BRADLEY, P.M. 1999. Effects of nutrient loading on the carbon balance of coastal wetland sediments. *Limnology and Oceanography*, 44: 699-702, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1999.44.3.0699>
- ODUM, H.T. 1956. Primary Production in Flowing Waters. *Limnology and Oceanography*, 1: 102-117, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1956.1.2.0102>

- RAM, A.S.P.; NAIR, S. & CHANDRAMOHAN, D. 2003. Seasonal shift in net ecosystem production in a tropical estuary. *Limnology and Oceanography*, 48: 1601-1607, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2003.48.4.1601>
- RANTAKARI, M. & KORTELAINEN, P. 2005. Interannual variation and climatic regulation of the CO<sub>2</sub> emission from large boreal lakes. *Global Change Biology*, 11: 1368-1380, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00982.x>
- SALAS, H.J. & MARTINO, P. 1991. A Simplified Phosphorus Trophic State Model for Warm-Water Tropical Lakes. *Water Research*, 25: 341-350, [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90015-1](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(91)90015-1)
- SCHINDLER, D.E.; CARPENTER, S.R.; COLE, J.J.; KITCHELL, J.F. & PACE, M.L. 1997. Influence of food web structure on carbon exchange between lakes and the atmosphere. *Science*, 277: 248-251, <http://dx.doi.org/10.1126/science.277.5323.248>
- SCHINDLER, D.W. 1978. Factors Regulating Phytoplankton Production and Standing Crop in Worlds Freshwaters. *Limnology and Oceanography*, 23: 478-486, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1978.23.3.0478>
- SCHINDLER, D.W. 2006. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 51: 356-363, [http://dx.doi.org/10.4319/lo.2006.51.1\\_part\\_2.0356](http://dx.doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356)
- SEEKELL, D.A. & PACE, M.L. 2011. Does the Pareto distribution adequately describe the size-distribution of lakes? *Limnology and Oceanography*, 56: 350-356, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2011.56.1.0350>
- SOBEK, S.; ALGESTEN, G.; BERGSTROM, A.K.; JANSSON, M. & TRANVIK, L.J. 2003. The catchment and climate regulation of pCO<sub>2</sub> in boreal lakes. *Global Change Biology*, 9: 630-641, <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00619.x>
- SOLOMON, S.; DANIEL, J.S.; SANFORD, T.J.; MURPHY, D.M.; PLATTNER, G.K.; KNUTTI, R. & FRIEDLINGSTEIN, P. 2010. Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107: 18354-18359, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1006282107>
- SOLOMON, S.; PLATTNER, G.K.; KNUTTI, R. & FRIEDLINGSTEIN, P. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106: 1704-1709, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0812721106>
- STAEHR, P.A. & SAND-JENSEN, K. 2007. Temporal dynamics and regulation of lake metabolism. *Limnology and Oceanography*, 52: 108-120, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2007.52.1.0108>
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. 1996. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. Third Edition. Wiley-Interscience, New York. 1040p.
- SUZUKI, M.S.; OVALLE, A.R.C. & PEREIRA, E.A. 1998. Effects of sand bar openings on some limnological variables in a hypertrophic tropical coastal lagoon of Brazil. *Hydrobiologia*, 368: 111-122, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003277512032>
- TRANVIK, L.J.; DOWNING, J.A.; COTNER, J.B.; LOISELLE, S.A.; STRIEGL, R.G.; BALLATORE, T.J.; DILLON, P.; FINLAY, K.; FORTINO, K.; KNOLL, L.B.; KORTELAINEN, P.L.; KUTSER, T.; LARSEN, S.; LAURION, I.; LEECH, D.M.; McCALLISTER, S.L.; McKNIGHT, D.M.; MELACK, J.M.; OVERHOLT, E.; PORTER, J.A.; PRAIRIE, Y.; RENWICK, W.H.; ROLAND, F.; SHERMAN, B.S.; SCHINDLER, D.W.; SOBEK, S.; TREMBLAY, A.; VANNI, M.J.; VERSCHOOR, A.M.; WACHENFELDT, E. von & WEYHENMEYER, G. A. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54: 2298-2314.
- VAQUER-SUNYER, R. & DUARTE, C.M. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105: 15452-15457, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0803833105>
- VREDE, K. 2005. Nutrient and temperature limitation of bacterioplankton growth in temperate lakes. *Microbial Ecology*, 49: 245-256, <http://dx.doi.org/10.1007/s00248-004-0259-4>
- WANNINKHOF, R. & KNOX, M. 1996. Chemical enhancement of CO<sub>2</sub> exchange in natural waters. *Limnology and Oceanography*, 41: 689-697, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1996.41.4.0689>
- WEISS, R.F. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 2: 203-215, [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203\(74\)90015-2](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203(74)90015-2)
- WOHLERS, J.; ENGEL, A.; ZOLLNER, E.; BREITHAUPT, P.; JURGENS, K.; HOPPE, H.G.; SOMMER, U. & RIEBESELL, U. 2009. Changes in biogenic carbon flow in response to sea surface warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106: 7067-7072, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0812743106>
- ZAR, J.H. 1996. *Biostatistical analysis*. Third Edition. Prentice Hall., New Jersey.

Submetido em 02/04/2012

Aceito em 29/05/2012