Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Centro de Energia Nuclear na Agricultura

Dinâmica biogeoquímica do carbono em ambientes fluviais de águas lênticas da Amazônia Oriental (FLONA de Caxiuanã, Pará)

Daniel Marcos Bentes de Melo

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada

Piracicaba
2011

Daniel Marcos Bentes de Melo
Engenheiro Ambiental

Dinâmica biogeoquímica do carbono em ambientes fluviais de águas lênticas da Amazônia Oriental (FLONA de Caxiuanã, Pará)

Orientador:
Prof. Dr. **ALEX VLADIMIR KRUSCHE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada

Piracicaba
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Melo, Daniel Marcos Bentes de
Dinâmica biogeoquímica do carbono em ambientes fluviais de águas lênticas da Amazônia Oriental (FLONA de Caxiuanã, Pará) / Daniel Marcos Bentes de Melo. - - Piracicaba, 2011.
69 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2011.

1. Bacia hidrográfica 2. Carbono 3. Ciclos biogeoquímicos 4. Ecossistemas aquáticos lênticos - Amazônia Oriental 5. Florestas nacionais 6. Rio Curuá I. Título

CDD 634.94
M528d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Para meus pais, Luiz Pedreira e
Conceição Bentes, meus heróis.
Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alex Vladimir Krusche, pela orientação e conselhos para produção desta dissertação, por todo apoio e confiança no início e durante o curso, pela amizade e paciência. Valeu, Alex.

Ao Dr. José Francisco Berredo, por ser um grande amigo e quase um pai, com ensinamentos que levarei sempre comigo.

À Universidade de São Paulo, à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e a todos os Docentes do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ecologia Aplicada, pela formação científica.

Ao Laboratório de Análise Ambiental e Geoprocessamento do Centro de Energia Nuclear na Agricultura e aos técnicos Alexandra Montebello e Gustavo Gobet pela execução das análises químicas.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi, à Estação Científica Ferreira Penna pelo apoio logístico para a execução deste estudo.

Ao Programa LBA, à FAPESP e ao CNPq pelo financiamento das atividades de campo.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Nei Leite e à Giovana Cabianchi, pela amizade e diversos conselhos ao longo desta jornada.

Ao JadsonDezincourt, pela amizade, conselhos e grande apoio nos primeiros dias em Piracicaba.

À Alana Kasahara e à Christiene Matos, por me fazerem perceber a beleza de ensinar.

Ao meus grandes amigos, pois sem eles não teria chegado até aqui: Dimitri Pontes, Edgar Costa, Larissa Brito, Natália Castro, Uibirá Sena e Victor Melo.

Ao meu irmão, Nairo Bentes, por sempre estar ao meu lado, indicando meus acertos e erros.

À AyamyMigiyama, pela paciência e por sempre me fazer buscar o melhor.

Aos meus pais, por todo esforço, sacrifício e, principalmente, pelo amor.

Muito obrigado!

Uma luz no meio do rio
É um caboclo pescador
Não tem roupa não tem frio
Não tem fome nem calor
Só tem olhos para o rio
Só conhece tempo bom
Sabe o segredo dos peixes
A pescaria é seu dom
Pescador de piraíba
Quando sai para pescar
Só sabe a hora da ida
Não tem hora de voltar
Uma luz no meio do rio
De repente se apagou
Mas o povo crê e conta
O caboclo se encantou
No lugar que ele sumiu
Quem passa a noite por lá
Vai ver no fundo do rio
Uma lamparina acesa
Que nunca vai se apagar

Eliaquim Rufino

SUMÁRIO

RESUMO.....11

ABSTRACT 13

LISTA DE FIGURAS.....15

LISTA DE TABELAS 17

1 INTRODUÇÃO 19

2 DESENVOLVIMENTO 23

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....23

2.1.1 Área de Estudo.....23

2.1.2 Pontos Amostrais 23

2.1.3 Clima 24

2.1.4 Ambiente Aquático e Geologia 24

2.1.5 Vegetação 25

2.1.6 Métodos Amostrais e Analíticos 27

2.1.6.1 Medidas de Campo 28

2.1.6.2 Carbono Orgânico e Inorgânico Dissolvido.....28

2.1.6.3 Frações Particuladas de Carbono Orgânico 29

2.1.6.4 Pressões Parciais de CO_2 e CH_4 30

2.1.7 Análise estatística 33

2.2 RESULTADOS 33

2.3 DISCUSSÃO 37

2.3.1 Padrões Hidrológicos e Clima 37

2.3.2 Aspectos físico-químicos e oxigênio dissolvido.....39

2.3.3 Variações Sazonais e Espaciais de Carbono Inorgânico Dissolvido e Carbono Orgânico Particulado e Dissolvido.....45

2.3.4 Pressão Parcial de CO_2 e CH_4 e Fluxos Difusivos 56

3 CONCLUSÕES 61

REFERÊNCIAS 63

RESUMO

Dinâmica biogeoquímica do carbono em rios de escoamento lento na Amazônia Oriental (FLONA de Caxiuanã, Pará)

A dinâmica do carbono, nas fases orgânica, inorgânica e gasosa, foi analisada em um ponto na Baía de Caxiuanã e em três pontos no seu afluente Rio Curuá (porções superior, intermediária e inferior) – um sistema fluvial de escoamento lento na Amazônia Oriental (Brasil – estado do Pará) – durante 31 campanhas, de janeiro de 2007 até dezembro de 2009. O objetivo foi avaliar mudanças intra e inter-anuais como função da hidrologia neste preservado rio de água preta. Medições em diferentes profundidades mostraram a formação de estratos físico-químicos, evidenciando o aspecto lêntico nos setores médio e baixo do rio Curuá, com eventos de concentrações extremamente baixas de oxigênio dissolvido durante o período de cheia, como conseqüência da entrada de insumos e da decomposição da matéria orgânica dos ecossistemas terrestres. Devido a esse aspecto, o DOC foi a forma dominante das fases orgânica e inorgânica do carbono, mostrando positiva e significativa correlação com o nível do rio, como resultado de um grande controle de entrada de insumos laterais. As formas particuladas orgânicas não mostraram as mesmas características em nenhum ponto, provavelmente em função da reduzida corrente de água que permite a rápida deposição desses materiais logo após sua entrada no sistema fluvial. As concentrações mais elevadas de CPOC e FPOC observadas na Baía de Caxiuanã parecem ser um sinal da presença de comunidade de fitoplâncton assim como da influência do vento, que ressuspende os sedimentos de fundo nesse ambiente. A concentração de dióxido de carbono exibiu altos valores comparados com a atmosfera, ratificando a bem conhecida característica heterotrófica dos rios amazônicos. Além disso, os baixos níveis de oxigênio observados induziram o consumo de matéria orgânica por bactérias anaeróbias, resultando em altas concentrações de metano, como observado no setor médio do rio Curuá. Assim como ocorreu com as formas particuladas orgânicas, os aspectos ecológicos e geológicos singulares da Baía de Caxiuanã distinguem seu habitat pelos baixos valores de dióxido de carbono quando comparados com a atmosfera, revelando um ambiente com diferente dinâmica biogeoquímica.

Palavras-chave: Ciclo do carbono em ambientes aquáticos, Bacias hidrográficas preservadas

ABSTRACT

Biogeochemical dynamic of carbon in slow flowing rivers of Eastern Amazonia (FLONA de Caxiuanã, Pará)

Dynamic of carbon, at organic, inorganic, and gas phases, was analyzed in one station at Caxiuanã Bay and three stations on its tributary Curuá River (upper, middle and lower sections) – a slow flowing river system in Eastern Amazon (Brazil – Pará State) – during 31 campaigns, from January 2007 through December 2009. The objective was to evaluate intra and interannual changes as function of hydrology in this undisturbed blackwater river. Measures on different depths showed formation of physicochemical strata, evidencing the lentic aspect on middle and lower sections of Curuá River, with events of extremely low concentrations of dissolved oxygen during high water level, as a consequence of inputs and decomposition of organic matter from terrestrial ecosystems. Due to this aspect, DOC was the dominant form of organic and inorganic carbon phases, showed positive and significant correlation with river stage level for all sites, as result of a large control by lateral inputs. Particulate organic forms did not show the same characteristics in any station, probably as function of reduced water current which enable rapid deposition of these materials soon after their entrance on river system. The higher concentrations of CPOC and FPOC observed at Caxiuanã Bay seem to be a signal of presence of phytoplankton community as well as wind influence which resuspend bottom sediments in this environment. Carbon dioxide concentration on river exhibited higher values compared to atmosphere, ratifying the well-known heterotrophic characteristic of Amazon rivers. Furthermore, observed low levels of oxygen induced organic matter consumption by anaerobic bacteria, resulting in high concentrations of methane, as observed in the middle section of Curuá River. As occurred with particulate organic forms, the singular geologic and ecologic aspects of Caxiuanã Bay distinguish its habitat by low values of carbon dioxide when compared to atmosphere, revealing an environment with different biogeochemical dynamic.

Keywords: Aquatic carbon cycle, Undisturbedcatchment

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da região de estudo e pontos amostrados. 24
Figura 2 - Vegetação ribeirinha nos pontos de amostragem. 27
Figura 3 - Procedimento de coleta de sedimento particulado grosso em suspensão para análise de carbono orgânico particulado grosso. 29
Figura 4 - Sequência de procedimentos para a análise de pCO_2 e pCH_4. 30
Figura 5 - Estrutura utilizada para o cálculo do coeficiente de troca gasosa de CO2 (A) e representação de três leituras consecutivas no software LiCor 820 (B).....31
Figura 6 - Cotas diárias, em cm (ANA, n. 19980000) e precipitação, em (LBA), na bacia hidrográfica em estudo. 38
Figura 7 - Diagrama climático de Walter e Lieth para a região de Caxiuanã.....39
Figura 8 - Variação temporal da condutividade elétrica nos trechos do rio Curuá e na baía de Caxiuanã. 40
Figura 9 - Variação temporal do pH nos trechos do rio Curuá e na baía de Caxiuanã. .42
Figura 10 - Variação temporal da concentração de oxigênio dissolvido nos trechos do rio Curuá na e baía de Caxiuanã.....43
Figura 11 - Variação temporal da temperatura da água nos trechos do rio Curuá e na baía de Caxiuanã. 44
Figura 12 - Variações Temporais e Sazonais de CID nos ambientes estudados.....48
Figura 13 - Variações Temporais e Sazonais de COD nos ambientes estudados. 51
Figura 14 - Variações Temporais e Sazonais de COPG nos ambientes estudados. 53
Figura 15 - Variações Temporais e Sazonais de COPF nos ambientes estudados.....54
Figura 16 - Relação entre COD e pH nos ambientes estudados.....56
Figura 17 - Variações Temporais e Sazonais de pCO_2 nos ambientes estudados. 58
Figura 18 - Variações Temporais e Sazonais de pCH_4 nos ambientes estudados. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas geográficas dos pontos amostrados. 24
Tabela 2 - Variáveis físico-químicas dos corpos d'água estudados. 34
Tabela 3 - Valores mínimos, máximos e medianas de espécies de carbono e pressão parcial de gases. 35
Tabela 4 - Correlações de CE com a cota do rio (Spearman) para os pontos amostrados. Valores em negrito indicam valores significativos ($p < 0,05$). 41
Tabela 5 - Correlações de pH com a cota do rio (Spearman) para os pontos amostrados. Valores em negrito indicam valores significativos ($p < 0,05$). 42
Tabela 6 - Resultados da aplicação do teste estatístico de Wilcoxon, para verificação de estratos físico-químicos. Valores em negrito indicam diferenças significativas ($p < 0,05$). 45
Tabela 7 - Comparações das concentrações de CID, COD, COPG e COPF em ambientes aquáticos da Amazônia e da América do Sul. Todos os valores em $mg.l^{-1}$...46
Tabela 8 - Resultado do teste estatístico de Wilcoxon para comparação entre períodos sazonais para cada ambiente estudado. Em negrito os resultados que indicam diferenças sazonais.....49
Tabela 9 - Coeficiente de difusividade (k) e fluxos de CO2 e CH4. Valores mínimos e máximos em parenteses. 60

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio Amazonas compreende uma área de 6 869 000 km² (BARTHEM et al., 2004), apresentando como principais tributários: Tocantins, Xingu, Tapajós, Madeira, Purus, Juruá, Jutaí, Içá, Japurá e Negro.

Ao longo dos anos, essa bacia vem sofrendo intervenções a partir de programas de incentivos dos Estados nacionais que buscavam a “ocupação eutilização desse imenso espaço vazio”, a fim de garantir a soberania nacional sobre a região diante da comunidade internacional (BECKER, 2001).

Esses incentivos governamentais deram início ao processo de desmatamento, sendo este posteriormente impulsionado em sobretudo pelo(a): pecuária extensiva, responsável por 70% (SOARES FILHO et al., 2008; MARGULIS, 2003); aumento da demanda mundial por alimentos, combinado com a degradação e escassez de solos adequados ao cultivo nos países do hemisfério norte (NEPSTAD, 2007); e elevação dos investimentos para abertura e pavimentação de estradas, interligando a região com as demais do país, buscando reduzir custos com transporte, considerado um dos maiores embargos para a ocupação efetiva da região (FEARNSIDE, 2005).

Essas ações passaram a alterar os ciclos biogeoquímicos locais da Amazônia, como pelo aumento da quantidade da emissão de CO_2 (HOUGHTON et al., 2000) e do aporte de solutos aos ecossistemas aquáticos (MARKEWITZ et al., 2001), alterando também os ciclos globais, visto sua importância como agente reguladora do clima terrestre (MALHI et al., 2008; MARENGO; NOBRE, 2001).

Paralelamente, as pesquisas quanto à biogeoquímica dos ambientes aquáticos amazônicos iniciaram-se a partir de 1896 com os estudos de Friedrich Katzer (1861-1925) sobre a química das águas (SIOLI, 2006) e de Joseph Reindl que estudou a natureza dos rios de água preta, com base na comparação da composição química entre o curso principal do rio Amazonas e o rio Negro, cujo trabalho foi publicado em 1903 (MCCLAIN; ELSENBEER, 2001).

Esses estudos não tiveram continuidade por um longo período, sendo retomados apenas em 1940, com a chegada de Harald Sioli (1910-2004) à Amazônia, o

qual desenvolveu uma série de estudos em convênio com Museu Paraense Emílio Goeldi, Instituto Agronômico do Norte (atual Embrapa) e Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, que culminaram em mais de 150 publicações (livros e artigos científicos), dos quais se destacam as dos anos de 1950 e 1957 pelo pioneirismo na classificação dos corpos d'água amazônicos de acordo com a coloração de suas águas.

Devido às limitações dessa classificação, baseada na coloração das águas, houve críticas e formulações de novas classificações com base em critérios geoquímicos mais específicos, como as propostas por Gibbs (1970) e Stallard e Edmond (1983).

Ao longo das décadas, os estudos objetivaram inicialmente a compreensão da estrutura ecológica de comunidades lacustres e fluviais e sua relação com as características geológicas locais e, posteriormente, a descoberta de mecanismos de controle da biogeoquímica aquática, pelo estudo das demais etapas e estoques do ciclo hidrológico (precipitação, escoamento superficial e água subterrânea) e suas relações com a comunidade florestal (escoamento pelo tronco e plúvio-lixiviado) (MCCLAIN; ELSENBEER, 2001).

As pesquisas sobre os ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrogênio e fósforo e suas respostas às alterações provocadas por atividade antrópicas foram implementadas de modo mais sistemático a partir da década de 80, pela criação do projeto CAMREX (Carbon in theAmazon River Experiment), cuja área de estudo abrangeu um setor de 1 800 Km do rio Amazonas, incluindo principais tributários e corpos d’água da planície de inundação, com a realização de treze expedições durante os anos de 1982 a 1991, e que originou diversas publicações, como os trabalhos de Hedges et al. (1986), Mayorga et al. (2005) e Richey (1982) e Richey et al. (1990; 2002).

Na Floresta Nacional de Caxiuanã, desde 1993, ano de inauguração da Estação Científica Ferreira Penna, são realizadas pesquisas nas áreas de ciências sociais, climatologia, geologia, botânica, zoologia, ecologia de ecossistemas, ecologia vegetal e animal. Atualmente, a estação é área de estudo de três programas de grande escala: TEAM (Tropical EcologyAssessmentandMonitoring) e LBA (Programa de Grande Escala na Biosfera-Atmosfera na Amazônia), baseados sob a temática de

pesquisas ecológicas de longa duração; e PPBio (Programa de Pesquisas em Biodiversidade), que tem como um dos objetivos fornecer informações que propiciem o uso sustentável da biodiversidade brasileira.

Ademais, ressalta-se que desde a data de sua criação (BRASIL, 1961 – Decreto-Lei n. 239 de 28 de novembro de 1961), esta unidade de conservação não possui instituído um Plano de Manejo que dite as regulamentações quanto às atividades que podem ser desenvolvidas na área da mesma.

O presente trabalho é fruto dos primeiros anos de estudo sobre a biogeoquímica aquática em Caxiuanã, que se iniciaram em 2006, com a participação de pesquisadores do Museu Goeldi na rede integrada de amostragem na Amazônia (Rede Beija-Rio) coordenada pela Universidade de São Paulo e elaborada a partir dos projetos “O papel dos sistemas fluviais amazônicos no balanço regional e global de carbono: evasão de CO2 e interações entre os ambientes terrestres e aquáticos” e “The role ofriversonthe regional carboncycle”, ambos financiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (procs. 03/13172-2 e 08/58089-9), pelo CNPq (proc. 420199/05-5) e pelo Programa LBA.

Neste contexto, o objetivo principal deste estudo foi:

Analisar o padrão biogeoquímico do carbono na bacia hidrográfica do rio Curuá e na baía de Caxiuanã (municípios de Melgaço e Portel – PA) ao longo de diversos anos hidrológicos.

E, como objetivos específicos:

Avaliar as variações espaciais e temporais do carbono em suas frações orgânicas e inorgânicas no ambiente em estudo, em função do regime hidrológico;

Comparar a evolução ao longo do rio das formas de carbono, processos metabólicos e distribuição de gases biogênicos (O_2, CO_2 e CH_4);

Identificar possíveis consequências ecológicas dos padrões observados.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

2.1.1 Área de Estudo

A pesquisa foi realizada na área da Floresta Nacional de Caxiuanã, situada nos municípios de Melgaço e Portel (Pará), instituída pelo decreto n°. 239/1961 (Brasil, 1961), atualmente gerenciada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) com o auxílio do Museu Paraense Emílio Goeldi, que desde 1993 possui instalada na unidade de conservação a Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn) (Lisboa, 2002).

2.1.2 Pontos Amostrais

Para este estudo foram amostrados o rio Curuá e a baía de Caxiuanã, cujos pontos foram definidos em função de suas características biológicas e físicas, com a premissa de avaliar a ciclagem de carbono ao longo de um sistema fluvial de corrente reduzida, à medida que o mesmo evolui para ordens maiores. Desta maneira, sendo adotados 3 pontos no rio Curuá (RC1, RC2 e RC3) e 1 ponto na baía de Caxiuanã (BC) (Figura 1;Tabela 1). As campanhas de amostragem iniciaram-se em janeiro de 2007 e extenderam-se até dezembro de 2009, com periodicidade mensal, durante 3 anos.

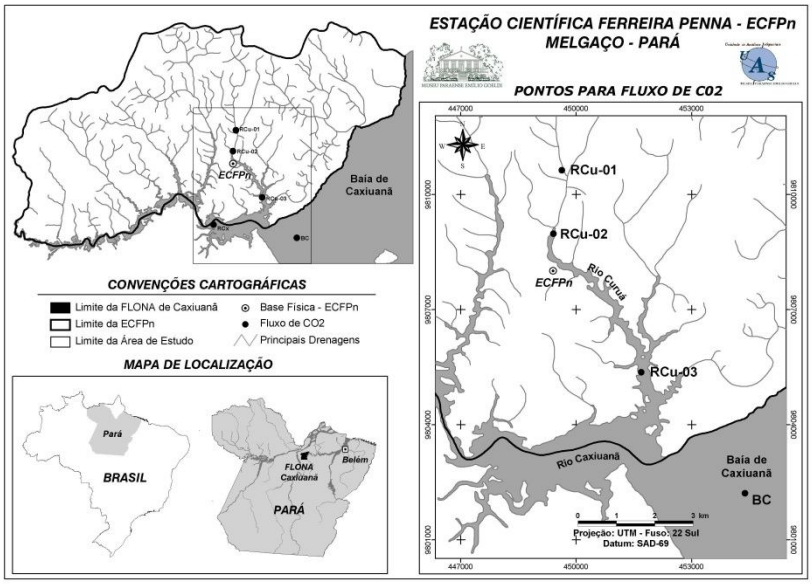

Figura 1 - Mapa da região de estudo e pontos amostrados.

Tabela 1 - Coordenadas geográficas dos pontos amostrados.

Ponto de Amostragem	Coordenada Geográfica
RC1	51º27’12’’W1º42’48’’S
RC2	51º27’19’’W 1º43’42’’S
RC3	51º26’06’’W 1º45’40’’S
BC	51º24’38’’W 1º47’22’’S

2.1.3 Clima

O clima, na região de Caxiuanã, é do tipo tropical úmido, enquadrado no tipo Am na classificação de Koppen-Geiger (Peel, Finlayson e McMahon, 2007). Dados climatológicos serão discutidos na seção 2.3.1, pág. 37.

2.1.4 Ambiente Aquático e Geologia

A região de Caxiuanã encontra-se situada no compartimento morfotectônico Gurupá, da calha do rio Amazonas, limitando-se a leste com o compartimento Marajoara e, a oeste com o Baixo-Tapajós (COSTA et al., 2002).A bacia hidrográfica em estudo localiza-se entre os rios Xingu e Tocantins, possuindo conexão direta com o

rio Pará a partir do rio Anapu, corpo d'água em que se localiza a baía de Caxiuanã e apresenta como tributários os rios Caxiuanã e Curuá.

Os terrenos de Caxiuanã desenvolveram-se sobre sedimentos cretáceos da Formação Alter do Chão, estando expostos no entorno da baía e no rio Caxiuanã (bacia do rio Curuá), ocorrendo geralmente em relevos mais altos, onde se desenvolveram LateritosMaturos, truncados pela erosão, e Lateritos Imaturos, representados pelos Latossolos Amarelos (COSTA et al, 2002).

Segundo Costa et al. (2002) a baía de Caxiuanã e seus tributários caracterizam-se pela ausência ou pouco material em suspensão, exceto pela presença de matéria orgânica algal e espículas de cauixi. Apresenta como consequência água límpida e transparente, sendo classificada como água preta (ionicamente pobre – baixo teor de sedimentos em suspensão), havendo variação em sua coloração de preto a verde.

2.1.5 Vegetação

A cobertura vegetal da região é bem diversificada, apresentando áreas de floresta densa de terra firme, florestas de inundação (várzea e igapó), vegetação savanóide (campo hidromórfico), vegetação secundária (capoeira) e vegetação residual em sítios de pomares.

A floresta densa de terra firme é o ambiente mais extenso, ocupando cerca de 85% da área e área basal maior que $20m^2$/ha segundo o inventário realizado por Lisboa, Silva e Almeida (1997).

As florestas de inundação ocupam cerca de 10% da área, sendo caracterizadas por estarem expostas à alagação em função das oscilações do nível do rio, apresentando solos hidromórficos e quimicamente pobres em nutrientes, e cuja vegetação possui biomassa inferior à da floresta de terra firme Lisboa, Silva e Almeida (1997). Segundo Ferreira, Almeida e Rosário (1997), estas florestas podem ser divididas em dois grandes habitats: a) Floresta de igapó, constantemente alagada por rios de água preta; e b) Floresta de várzea, periodicamente alagada em função das oscilações diárias de marés e das flutuações sazonais do nível do rio.No entanto, na região de estudo não são encontradas várzeas típicas, como as descritas por

Sioli(1984), uma vez que os rios que drenam a região apresentam baixo teor de nutrientes e sedimentos, características estas distintas das várzeas do rio Amazonas.

Dos pontos amostrados, os situados no rio Curuá apresentam grande influência dos ecossistemas que os margeiam (Figura 2). O ponto RC1, localizado mais próximo à nascente apresenta-se margeado por vegetação de igapó, cujo dossel denso reduz a incidência de radiação fotossinteticamente ativa no ecossistema aquático. O ponto RC2 apresenta habitat aberto e diversificado, margeado por vegetação de igapó e várzea, além da presença de macrófitas aquáticas (emergentes, flutuantes fixas e livres, submersas fixas e livres) que possuem grande importância para a biogeoquímica desta seção do rio, uma vez que atuam como fonte de matéria orgânica para o metabolismo da comunidade aquática. O ponto RC3, localizado próximo à foz do rio Curuá, apresenta habitat mais aberto cuja margem possui uma faixa estreita de várzea local e maior influência de floresta densa de terra firme.

O ponto localizado na baía de Caxiuanã, denominado BC, possui menor influência de ecossistemas terrestres ribeirinhos, por encontrar-se muito distante das margens, sendo a dinâmica biogeoquímica mais dependente dos processos autóctones do ambiente aquático (Figura 2).

Figura 2 - Vegetação ribeirinha nos pontos de amostragem.

2.1.6 Métodos Amostrais e Analíticos

As amostras de água foram coletadas a 60% da profundidade total a partir do uso de uma bomba submergível (HAUER; LAMBERTI, 1996). Da água emergente,foram retiradas alíquotas distintas para cada uma das análises posteriores e efetuadas as medidas de campo descritas a seguir.

2.1.6.1 Medidas de Campo

Os parâmetros físico-químicos,potencial hidrogeniônico (pH), temperatura da água, oxigênio dissolvido, e condutividade elétrica, foram mensurados,em alíquota separada para evitar contaminação, com emprego, respectivo, depeagômetro Orion modelo 290 A+, medidor de oxigênioYSI modelo 55 e condutivímetro VWR International modelo 2052. No caso destas medidas, além da profundidade de 60% do total, foram também obtidas amostras de superfície, a 0,5 m de profundidade, a fim de avaliar a possível formação de estratos nos setores RC2, RC3 e BC.

2.1.6.2 Carbono Orgânico e Inorgânico Dissolvido

As amostras para as frações orgânicas e inorgânicas de carbono dissolvido foram coletadas separadamente a partir de:

- 1 alíquota de 60 ml, filtrada através de membrana de nitrato de celulose (porosidade nominal de 0,47 µm), acondicionada em frasco de polietileno de alta densidade e preservada com 6 mg de thymol (razão preservante/amostra = 1mg/10ml), para determinar as concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID);
- 3 alíquotas de 25 ml, filtradas através de membrana de fibra de vidro pré-calcinada (tipo GF/F, porosidade nominal de 0,7 µm), acondicionada em frasco de vidro pré-calcinado e preservada com $HgCl_2$ a uma concentração final de Hg de 300 µM, para determinar as concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD).

As concentrações de carbono orgânico e inorgânico dissolvidos totais foram determinadas pela técnica de detecção por infra-vermelho do CO_2 gerado, respectivamente, a partir da queima e da acidificação em equipamento da marca Shimadzu, modelo TOC-VCPH. As concentrações das espécies do sistema de carbonatos foram calculadas a partir da concentração de carbono inorgânico dissolvido total, do pH e da temperatura (STUMM; MORGAN, 1981).

2.1.6.3 Frações Particuladas de Carbono Orgânico

O material particulado foi dividido em duas frações, grossa (> 63µm) e fina (< 63µm e > 0,45 µm), em função das distintas características biogeoquímicas que apresentam (DEVOL; HEDGES, 2001). A fração particulada grossa destinada às análises qualitativas foi obtida pela imersão diretamente no rio de uma rede de fitoplâncton (Figura 3). As demais frações foram separadas em laboratório a partir de alíquotas de uma amostra de 20 litros.

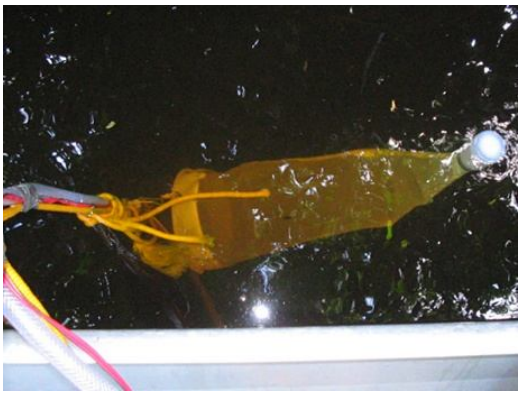

Figura 3 - Procedimento de coleta de sedimento particulado grosso em suspensão para análise de carbono orgânico particulado grosso.

O volume total da amostra foi inicialmente peneirado através de uma malha de 63 µm. O material retido na peneira foi então transferido para um suporte de filtração contendo um filtro de nitrato de celulose pré-pesado (porosidade de 0,45 µm). Este filtro foi então seco e pesado novamente e a diferença de peso corresponde à concentração de sedimentos grossos em suspensão. O mesmo procedimento foi executado, em triplicata, a partir de alíquotas (de 0,3 a 1 L) da amostra já peneirada, para permitir a quantificação dos sedimentos finos em suspensão.

O restante da amostra peneirada foi então filtrado em filtro de quartzo pré-pesado e pré-calcinado (500°C por 5 horas) até o entupimento. Após secagem, pedaços do filtro foram retirados, pesados e analisados para determinar a composição elementar e isotópica de C e N da fração particulada fina, por espectrometria de massas acoplada a analisador elementar Finnigan Delta Plus. O mesmo procedimento analítico foi adotado para a fração grossa obtida no campo.

2.1.6.4 Pressões Parciais de CO_2 e CH_4

A medição da pressão parcial de CO_2 (pCO_2) e CH_4 (pCH_4) da água do rio foi efetuada em triplicata com garrafas de 1000ml por meio do equilíbrio de fases entre a água e um gás inerte(nitrogênio). Após o transbordamento de 3 vezes o seu volume, a garrafa de 1 L foi fechada e 60ml de gás foram injetados na garrafa, simultaneamente com a retirada de mesmo volume de água (por meio de seringas), sendo em seguida agitadas por 3 minutos e incubadas por 15 minutos para o equilíbrio das fases. Após o este tempo, as seringas foram recolocadas para a extração do gás da garrafa. Paralelamente, foram coletadas 3 seringas com ar atmosférico. As amostras foram então transferidas para frascos de vidro previamente evacuados e fechados com tampa de teflon (Figura 4).

Figura 4 - Sequência de procedimentos para a análise de pCO_2 e pCH_4.

As concentrações CO_2 e CH_4foram determinadas por cromatografia gasosa, em equipamento Shimadzu, modelo GC17A, equipado com metanizador e detector de ionização de chama.

Para o cálculo dos fluxos entre a água e a atmosfera, no período de Julho de 2007 a Janeiro de 2008, utilizou-se um analisador de gás CO_2 por infra-vermelho (IRGA) modelo LiCor 820, acoplado a uma câmara flutuante, com o suporte de um computador portátil.Os dados gerados mensuram a concentração de CO_2 na câmara de acordo com o tempo, informando a variação deste gás na atmosfera como consequência do metabolismo aquático (Figura 5), sendo ainda utilizado um anemômetro portátil (Kestrel/3000) para mensuração da temperatura do ar. A partir dos dados gerados por essa estrutura foi possível o cálculo do coeficiente de troca gasosa de CO2 na interface água atmosfera (k_{CO2}).

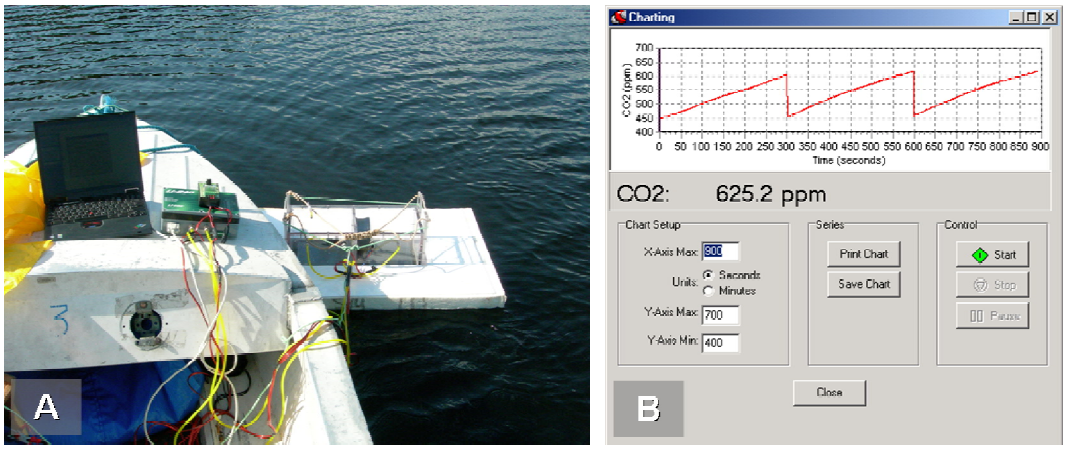

Figura 5 - Estrutura utilizada para o cálculo do coeficiente de troca gasosa de CO2 (A) e representação de três leituras consecutivas no software LiCor 820 (B).

Os valores de k_{CO2} obtidos para cada ponto estudado foram aplicados na equação abaixo para a estimativa do fluxo de CO_2:

$$F_{CO_2} = k_{CO_2} \times \alpha_{CO_2} \times \left(pCO_2^{H_2O} - pCO_2^{atm}\right)$$

$$k_{CO_2} = \frac{h_{cam}}{\Delta T} \times ln\left[\frac{\left(pCO_2^{H_2O} - pCO_2^{inicial}\right)}{\left(pCO_2^{H_2O} - pCO_2^{final}\right)}\right]$$

$$\ln\left(\alpha_{CO_2}\right) = \left[-60{,}2409 + 93{,}4517 \times \left(\frac{100}{\theta + 273{,}15}\right) + 23{,}3585 \times ln\left(\frac{\theta + 273{,}15}{100}\right)\right]$$

Onde,

F_{CO_2}: fluxo (mol CO_2.m^{-2}.s^{-1});

k_{CO_2}: coeficiente de troca gasosa de CO_2 água/atmosfera (cm.h^{-1});

α_{CO_2}: coeficiente de solubilidade de Henry do gás CO_2 (mol.l^{-1}.atm^{-1});

$\left(pCO_2^{H_2O} - pCO_2^{atm}\right)$: diferença entre pressões parciais de CO_2 medidas na água e na atmosfera (atm).

h_{cam}: é a altura da câmara (cm);

ΔT: variação do tempo durante a leitura com a câmara (h);

$pCO_2^{H_2O}$, $pCO_2^{inicial}$ e pCO_2^{final}: pressões parciais de CO_2 na água e no interior da câmara no tempo inicial final, respectivamente;

θ: temperatura da água (° C).

E para a estimativa do fluxo de CH_4:

$$F_{CH_4} = k_{CH_4} \times \alpha_{CH_4} \times \left(pCH_4^{H_2O} - pCH_4^{atm}\right)$$

$$k_{CH_4} = k_{CO_2} \times \left(\frac{Sc_{CH_4}}{Sc_{CO_2}}\right)^{-0,5}$$

$$Sc_{CH_4} = 1897,8 - 114,28 \times \theta^2 - 0,039061 \times \theta^3$$

$$Sc_{CO_2} = 1911,1 - 118,11 \times \theta^2 - 0,04132 \times \theta^3$$

$$\alpha_{CH_4} = \frac{\beta_{CH_4}}{22,414}$$

$$\ln\left(\beta_{CH_4}\right) = \left[-68,8862 + 101,4956 \times \left(\frac{100}{\theta + 273,15}\right) + 28,7314 \times ln\left(\frac{\theta + 273,15}{100}\right)\right]$$

Onde:

F_{CH_4}:fluxo (mol CH_4.m^{-2}.s^{-1});

k_{CH_4}: coeficiente de troca gasosa de CH_4 água/atmosfera (cm.h^{-1});

α_{CH_4}: coeficiente de solubilidade de Henry do gás CH_4 (mol.l^{-1}.atm^{-1});

$\left(pCH_4^{H_2O} - pCH_4^{atm}\right)$: diferença entre pressões parciais de CH_4 medidas na água e na atmosfera (atm);

Sc_{CH_4} e Sc_{CO_2}: números de Schmidt de CH_4 e CO_2;

β_{CH_4}: coeficiente de solubilidade de Bunsen do gás CH_4 (atm^{-1}).

2.1.7 Análise estatística

Inicialmente os dados foram testados para distribuição normal e homogeneidade das variâncias empregando-se testes estatísticos de Shapiro-Wilk e F. Como os resultados não satisfizeram estas exigências, foram empregados testes não paramétricos. Deste modo, os dados são apresentados em medianas e desvios interquartílicos (apresentados pelo símbolo ±); o teste U de Wilcoxon foi utilizado para avaliar as diferenças sazonal para cada ponto amostral; o teste H de Kruskal-Wallis foi utilizado para verificar diferenças entre os pontos amostrais; e para as análises de correlação entre duas variáveis, foi utilizado o teste rs de Spearman. Para todas as análises foram adotados os níveis de significância de $p<0,05$. Estas ferramentas são integrantes do software livre “R” (R Development Core Team, 2011).

2.2 Resultados

Os dados de precipitação pluviométrica e cota do rio para os três anos de estudo adquiridos a partir da estação meteorológica do Programa LBA e do sistema HidroWeb da ANA apresentaram, respectivamente, valores máximos diários de 149 mm em 31 de março de 2008 e 179 cm em 28 de maio de 2009 (data da campanha n°. 23).

No total, 31 campanhas, nos pontos amostrais adotados, foram realizadas de janeiro de 2007 a dezembro de 2009. Os resultados dos parâmetros analisados são apresentados nas Tabela 2e Tabela 3.

Tabela 2–Medianas, valores mínimos e máximos (↔) da variáveis físico-químicas e do oxigênio dissolvido dos corpos d'água estudados. CE – Condutividade elétrica; OD – Oxigênio dissolvido; T H_2O = Temperatura da água. RC1 a RC3 – Pontos de coleta no rio Curuá. BC – Baía de Caxiuanã.

	RC1		RC2		RC3		BC	
	superfície	fundo	superfície	fundo	superfície	fundo	superfície	fundo
CE ($\mu S.cm^{-1}$)	--	19,3 16,6 ↔ 24,7	14,8 13,1 ↔ 17,7	18,7 13,8 ↔ 24,8	13,0 11,5 ↔ 15,2	16,7 12,6 ↔ 24,9	14,7 11,9 ↔ 21,7	14,3 11,8 ↔ 20,4
pH	--	4,1 3,4 ↔ 4,6	4,5 3,6 ↔ 6,8	4,3 3,6 ↔ 6,9	4,6 3,7 ↔ 5,5	4,4 3,9 ↔ 6,3	6,3 4,1 ↔ 8,0	6,3 4,1 ↔ 8,2
OD ($mg.l^{-1}$)	--	2,3 0,9 ↔ 4,1	3,7 1,4 ↔ 6,7	2,0 0,5 ↔ 6,4	4,9 0,6 ↔ 5,9	0,4 0,03 ↔ 5,3	6,7 3,7 ↔ 7,4	6,2 3,8 ↔ 7,4
T H_2O (°C)	--	25,1 24,1 ↔ 29,1	30,1 24,7 ↔ 32,3	28,0 25,0 ↔ 31,2	31,2 27,0 ↔ 32,9	28,6 25,8 ↔ 32,6	30,9 28,8 ↔ 33,3	30,0 28,2 ↔ 33,3

Tabela 3 - Medianas, valores mínimos e máximos (↔) de espécies de carbono e pressão parcial de gases. CID – Carbono inorgânico dissolvido; COD – Carbono orgânico dissolvido; COPG – Carbono orgânico particulado grosso; COPF – Carbono orgânico particulado fino; pCO_2 – Pressão parcial de CO2; pCH4 – Pressão parcial de CH_4.

	RC1	RC2	RC3	BC
CID ($mg.l^{-1}$)	0,5 0,1 ↔ 1,8	0,6 0,1 ↔ 1,6	0,7 0,2 ↔ 2,5	0,5 0,2 ↔ 1,1
COD ($mg.l^{-1}$)	5,2 3,0 ↔ 12,9	4,9 3,1 ↔ 12,1	4,8 2,6 ↔ 7,7	4,1 2,3 ↔ 8,6
COPG ($mg.l^{-1}$)	0,0185 0,0001 ↔ 0,4046	0,0123 0,0001 ↔ 0,2718	0,0073 0,013 ↔ 0,246	0,0396 0,0023 ↔ 0,6737
COPF ($mg.l^{-1}$)	0,7 0,1 ↔ 1,7	0,8 0,3 ↔ 2,0	0,6 0,1 ↔ 2,6	0,8 0,1 ↔ 2,2
pCO_2 ($mg.l^{-1}$)	6591,0 3086,0 ↔ 11193,0	4644,0 1857,0 ↔ 10627,0	2587,0 767,0 ↔ 6461,0	584,5 49,2 ↔ 4309,6
pCH_4 ($mg.l^{-1}$)	160,6 78,9 ↔ 765,6	221,0 100,2 ↔ 942,6	34,2 11,8 ↔ 136,3	12,2 2,8 ↔ 39,8

A condutividade elétrica (CE) apresentou em geral valores muito baixos com mediana 16,14 ± 3,93 $\mu S.cm^{-1}$. O valor máximo de 24,90 $\mu S.cm^{-1}$ foi obtido em Novembro de 2009 no fundo no ponto RC3, que se localiza próximo à foz do rio Curuá e possui a maior profundidade entre os pontos amostrados. Tais resultados indicam águas muito pobres em sais e, consequentemente, nutrientes. No setor médio do rio Curuá (RC2) foi obtida correlação mais significativa entre CE e a cota do rio (Spearman, $r_s^{superfície} = 0,46$; $p = 0,0114$; $r_s^{fundo} = 0,52$; $p = 0,0029$).

O potencial hidrogeniônico (pH) apresentou padrão distinto entre o rio Curuá e a baía de Caxiuanã, sendo observados valores médios abaixo de 4,5 para os pontos situados neste rio e acima de 6,0 para a baía.De modo contrário à condutividade elétrica, o pH apresentou relação inversa com o nível do rio, com valores maiores durante os períodos de seca.

As maiores concentrações de oxigênio dissolvido foram observadas na baía de Caxiuanã com valor máximo de 7,45 $mg.L^{-1}$ (98,6%) para o mês de Julho de 2009 e mínimo de 3,67 $mg.L^{-1}$ (77,4%) em Maio de 2008. Para os pontos localizados no rio Curuá foram constatados períodos frequentes de déficit de oxigênio, sendo comuns valores próximos ou menores que 1,0 $mg.L^{-1}$ (≈14%) durante todo o ciclo hidrológico, com mínima de 0,05 $mg.L^{-1}$ (0,7%) no ponto RC3.

A temperatura da água apresentou variação de 24,7 a 33,3 °C, com os valores mais elevados frequentemente observados no ponto RC3, como consequência do aspecto lêntico deste rio que confere elevado tempo de residência da água.

Dentre os compostos de carbono analisados, o carbono orgânico dissolvido (COD) caracterizou-se como forma dominante em todos os pontos estudados, ao mesmo tempo que foi a única forma com correlação significativamente positiva com a cota do rio: RC1 ($r_s = 0,43$; $p = 0,02$); RC2 ($r_s = 0,65$; $p = 0,0002$); RC3 ($r_s = 0,63$; $p = 0,0002$); e BC ($r_s = 0,62$; $p = 0,0003$).

O carbono inorgânico dissolvido (CID), formado pelos compostos do sistema de carbonatos ($CO_{2\ livre}$, H_2CO_3, HCO_3^- e CO_3^{2-}), apresentou concentrações medianas de 0,53 (RC1), 0,58 (RC2), 0,69 (RC3), e 0,47 (BC) $mg.l^{-1}$, respectivamente, com mínima de 0,06$mg.l^{-1}$ no médio curso do rio Curuá em Março de 2009 e máxima de 2,52$mg.l^{-1}$ no baixo curso deste rio em Setembro de 2008.

As concentrações de COD variaram de 2,31 a 12,91mg.l^{-1}, com a mínima obtida na baía de Caxiuanã emDezembro de 2008 e a máxima no curso superior do rio Curuá (RC1) em Fevereiro de 2009.

As frações particuladas grossa e fina apresentaram concentrações medianas de 0,018 e 0,69 (RC1), 0,012 e 0,75 (RC2), 0,007 e 0,55 (RC3), e 0,040 e 0,78 (BC) mg.l^{-1}, respectivamente. Para a fração grossa, o valor máximo foi obtido na baía de Caxiuanã (0,67 mg.l^{-1}), em Janeiro de 2009, e o valor mínimo foi observado no médio curso do rio (0,0001 mg.l^{-1}), em Julho de 2009. Na fração fina, os valores, mínimo e máximo, respectivamente, foram observados no baixo curso do rio (0,05mg.l^{-1}) em Setembro de 2008 e (2,56 mg.l^{-1}) em Dezembro de 2007. A aplicação do teste estatístico não-paramétrico de Kruskal-Wallis indicou diferença significativa entre os pontos do rio Curuá e a baía de Caxiuanã apenas para carbono orgânico particulado fino(COPF; $p = 0,002$).

As concentrações de CO_2 e CH_4 nas águas do rio Curuá e da baía de Caxiuanã apresentaram em geral valores acima dos registrados na atmosfera local (CO_2≈346µatm; CH_4≈2µatm), com valores máximos de pCO_2 e pCH_4, respectivamente, de 11193 µatm, no curso superior do rio em Novembro de 2009, e 942,6 µatm, no médio curso do rio em Fevereiro de 2007. Na baía de Caxiuanã foram registrados os menores valores, compCO_2de 49,2 µatm, em Dezembro de 2008 e pCH_4de 2,8 µatm, em Fevereiro de 2008.

2.3 Discussão

2.3.1 Padrões Hidrológicos e Clima

Os dados de precipitação pluviométrica e cota do rio de Janeiro de 2007 a Dezembro de 2009 são mostrados na Figura 6, com os dias de coleta representados por pontos triangulares e a escala de tempo (eixo das abcissas) em dias juliano, iniciando em 31 de dezembro de 2006. Os dados hidrológicos da região foram adquiridos a partir da estação fluviométrica localizada na confluência dos rios Curua e Caxiuanã (Código ANA N. 19980000), de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (http://hidroweb.ana.gov.br/) e os dados de precipitação a partir da estação

meteorológica automática instalada na torre micrometeorológica do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), localizada na área da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn).

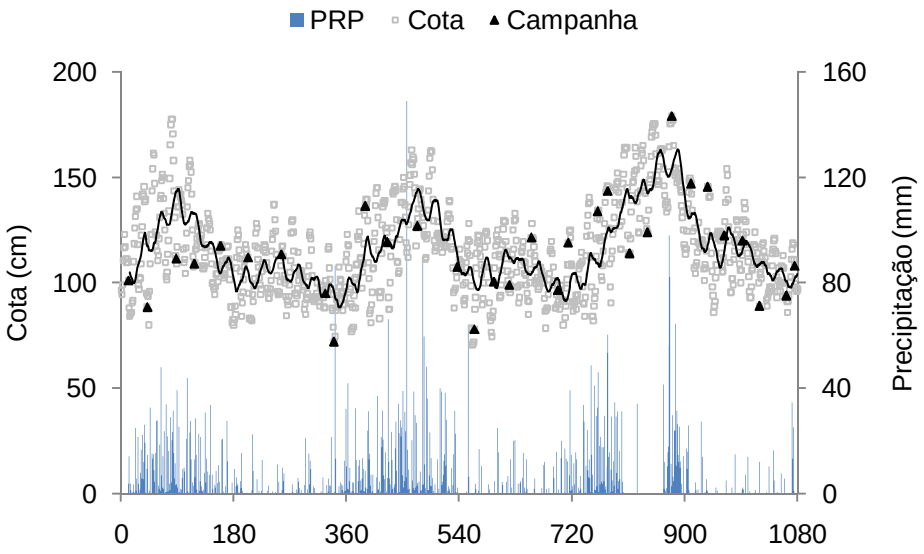

Figura 6 - Cotas diárias, em cm (ANA, n. 19980000) e precipitação, em (LBA), na bacia hidrográfica em estudo.

A cota do rio mostrou-se muito oscilante, entre dias consecutivos, e até entre dados registrados para um mesmo dia, em horas diferentes, como consequência do tamanho da área da bacia de drenagem, que responde rapidamente a eventos de chuva mais intensa, e devido à influência dos regimes de marés (preamar e baixamar), os quais são observados na região, apesar de estar situada a aproximadamente 440 km de distância da foz do rio Amazonas. Essas oscilações diárias estão de acordo com os dados publicados por Hidaet al. (2002), que descreveram oscilações diárias de 17 a 21 cm entre níveis consecutivos de preamar e baixamar em Caxiuanã.

Para eliminar essa dispersão dos dados, ocasionada pela ação da maré na região, a qual é muito significativa, considerando que a cota máxima não atinge 200 cm, optou-se por utilizar a média da cota dos 15 dias anteriores de cada campanha de campo para comparar com as variações nos parâmetros estudados.

A região é caracterizada como clima tropical úmido recebendo código Am com base na classificação de Köppen, devido à temperatura constante ao longo do ano

e precipitação anual maior que 2000 mm. A partir dos dados gerados entre os anos de 2006 e 2009, foi possível visualizar de melhor forma o padrão climático local pelo diagrama de Walter-Lieth (Figura 7), apesar do mesmo solicitar uma série temporal mais longa. Assim, definiram-se as estações seca e chuvosa nos meses de Julho a Novembro e Dezembro a Junho, respectivamente, com os meses de Agosto a Outubro apresentando seca mais intensa.

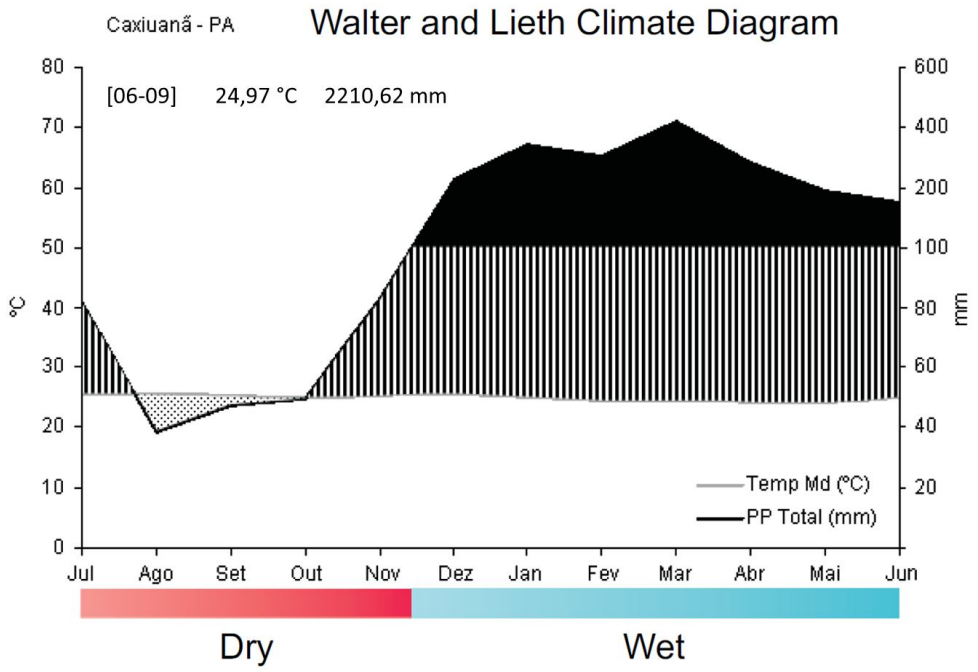

Figura 7 - Diagrama climático de Walter e Lieth para a região de Caxiuanã.

Desta forma, ressalta-se a eficiência na realização das campanhas de campo, que abrangeram adequadamente os períodos sazonais ocorrentes, uma vez que, durante os 36 meses de estudo, foram realizadas 31 campanhas, sendo 18 no período chuvoso e 13 no período seco.

2.3.2 Aspectos físico-químicos e oxigênio dissolvido

A condutividade elétrica (CE) apresentou em geral valores muito baixos, indicam águas muito pobres em sais e, consequentemente, nutrientes.No rio houve uma tendência geral dos habitats profundos exibirem valores maiores de CE em relação

à superfície. Na baía de Caxiuanã foi observado o padrão oposto, com valores de superfície e fundo muito próximo, mas geralmente mais elevados na superfície (Figura 8). Nesta baía de águas claras, observa-se uma extensa comunidade de algas planctônicas e bentônicas, que possivelmente permitem a ciclagem dos nutrientes de forma mais rápida, sendo continuamente absorvidos e remineralizados.

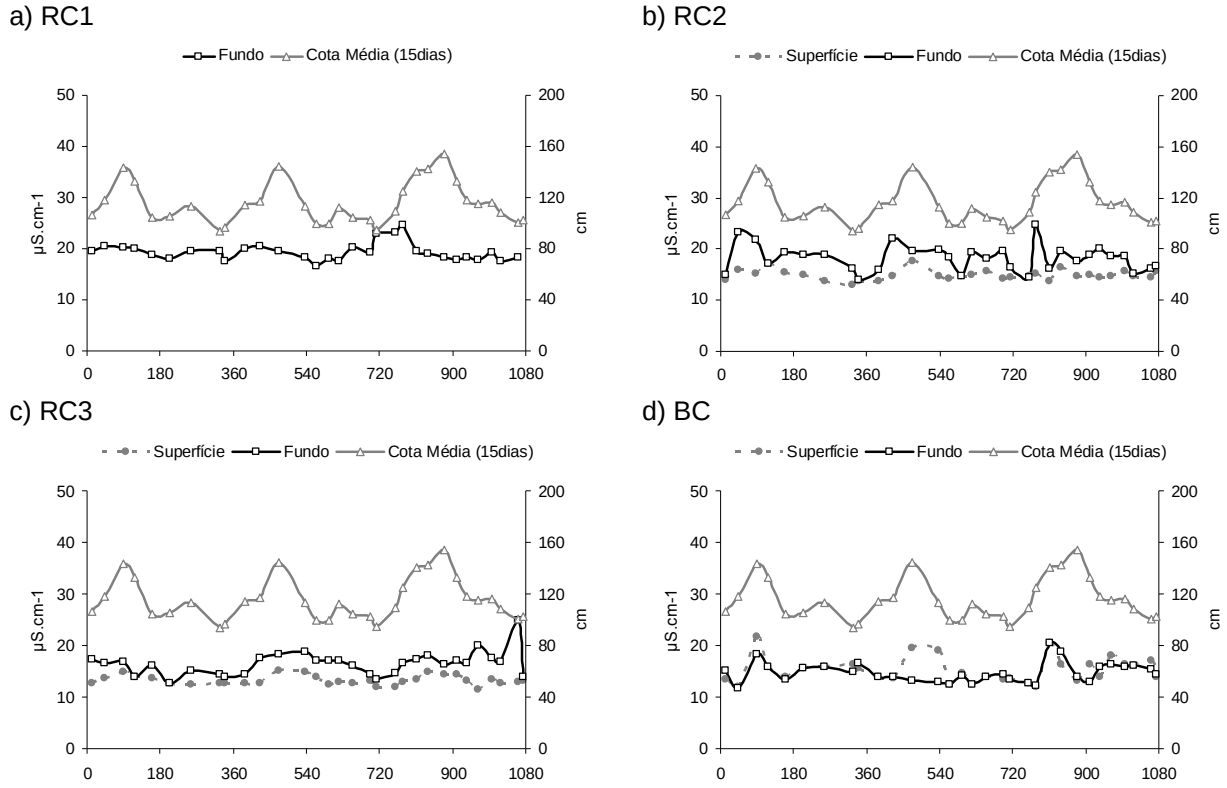

Figura 8 - Variação temporal da condutividade elétrica nos trechos do rio Curuá e na baía de Caxiuanã.

As melhores correlações entre CE e cota do rio (Tabela 4),obtidas no curso médio do rio Curuá,indicam que neste setor do rio a sazonalidade da hidrógrafa atua de modo mais expressivo como fator de controle químico. Para o ponto situado na baía de Caxiuanã, a fraca correlação (r_s< 0,40) pode ser consequência das características relativamente mais lênticas do sistema (COSTA et al., 1997;2002) e também a um papel mais relevante da comunidade de algas.

Tabela 4 - Correlações de CE com a cota do rio (Spearman) para os pontos amostrados. Valores em negrito indicam valores significativos ($p < 0,05$).

		R	p
RC1		0,2344	0,2124
RC2	topo	**0,4631**	**0,0114**
	fundo	**0,5174**	**0,0029**
RC3	topo	**0,5354**	**0,0033**
	fundo	**0,3806**	**0,0347**
BC	topo	0,2097	0,2750
	fundo	0,0851	0,6489

O padrão distinto observado, entre os ambientes do rio Curuá e a baía de Caxiuanã quanto ao pH (Figura 9), salienta a diferença entre estes corpos d'água.O rio apresenta habitats de caráter mais heterotrófico e provável predominância de matéria orgânica de origem terrestre, com teores mais elevados de ácidos orgânicos provenientes da decomposição e consequente redução do pH, enquanto a baía, cuja geologia difere dos rios analisados, apresentou valores que se assemelham a outros corpos d'água originários do Brasil Central, tais como Tapajós (6,5; DUNCAN; FERNANDES, 2010) e Tocantins (7,3; KRUSCHE et al., dados não publicados[1]). Ao mesmo tempo, a atuação da comunidade fitoplanctônica pode representar um fator de controle biogeoquímico, a partir do consumo de CO_2 dissolvido observado. (seção 2.3.4, pág. 56), alterando o sistema de carbonatos e, consequentemente, o pH (ALLAN; CASTILLO, 2007).

De modo contrário à condutividade elétrica, o pH apresentou relação inversa com o nível do rio, com valores maiores durante os períodos de seca (menor cota) (Figura 9), verificado para os pontos RCu2 (fundo), RCu3 (fundo) e BC (ambos) (Tabela 5). Este padrão opõe-se ao modelo comum observado para vários rios de diferentes continentes (HEM, 1989; MEYBECK, 2003), no qual o aumento do nível do rio está associado à redução conjunta dos valores de CE e pH. Esta distinção deve-se provavelmente à geologia local, marcada por solos muito intemperizados, tipicamente

[1]Kruscheet al., dados não publicados originários do Projeto ROCA – River OceanContinuumoftheAmazon, campanha realizada no rio Tocantins em Junho de 2011.

cauliníticos (COSTA et al., 2005; 2009; RUIVO et al., 2002) e à presença abundante de compostos húmicos, que conferem a coloração preta às águas da região, cujos ácidos e ânions orgânicos (ainda não mensurados nos corpos d'água da região) afetam pH e CE (ALLAN; CASTILLO, 2007; PERDUE; RITCHIE, 2003).

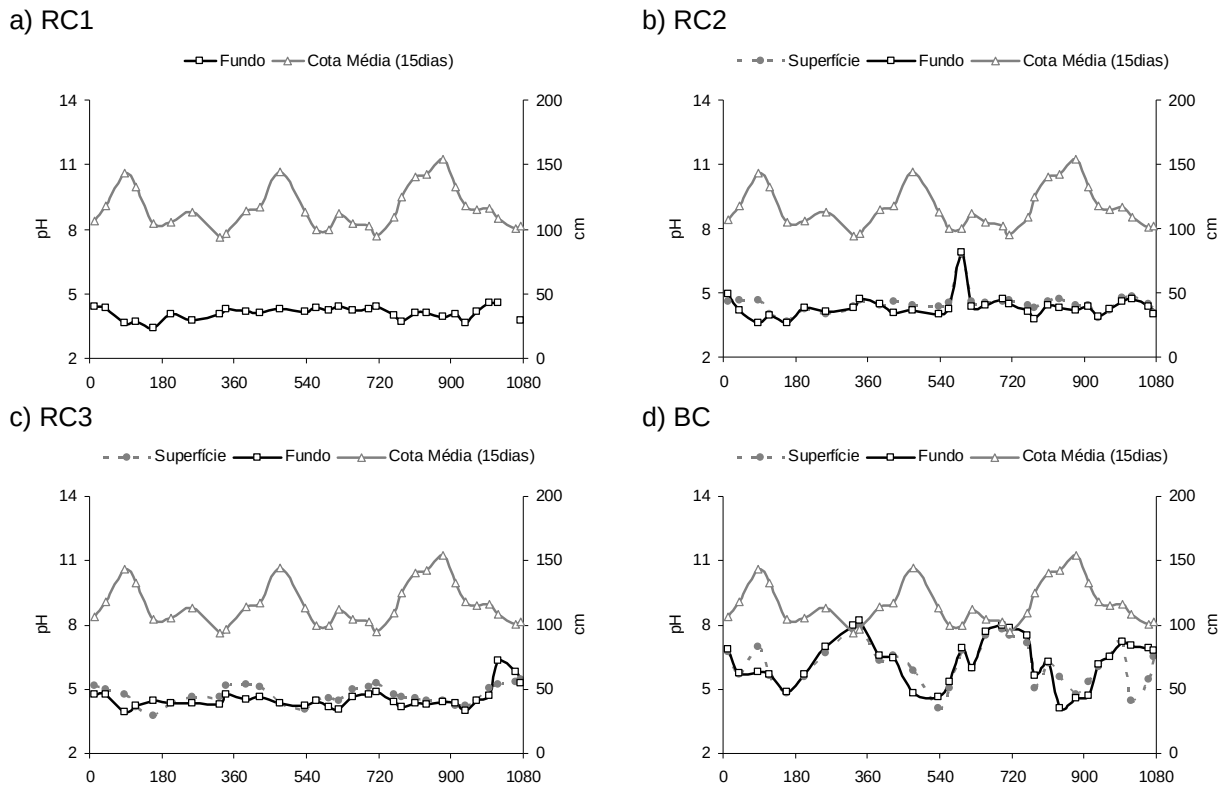

Figura 9 - Variação temporal do pH nos trechos do rio Curuá e na baía de Caxiuanã.

Tabela 5 - Correlações de pH com a cota do rio (Spearman) para os pontos amostrados. Valores em negrito indicam valores significativos ($p < 0,05$).

		R	p
RC1		-0,2948	0,1138
RC2	topo	-0,0389	0,8380
	fundo	**-0,4229**	**0,0207**
RC3	topo	**-0,3691**	**0,0455**
	fundo	**-0,4078**	**0,0261**
BC	topo	**-0,4452**	**0,0145**
	fundo	**-0,6472**	**0,0002**

Nos setores de médio e baixo curso do rio Curuá foram constatados períodos freqüentes de déficit de oxigênio, sendo comuns valores próximos ou menores que 1,0 $mg.L^{-1}$ (≈14%) (Figura 10). Estes resultados indicam que as espécies, que habitam esses setores, devem ser adaptadas a condições de hipoxia e anoxia.

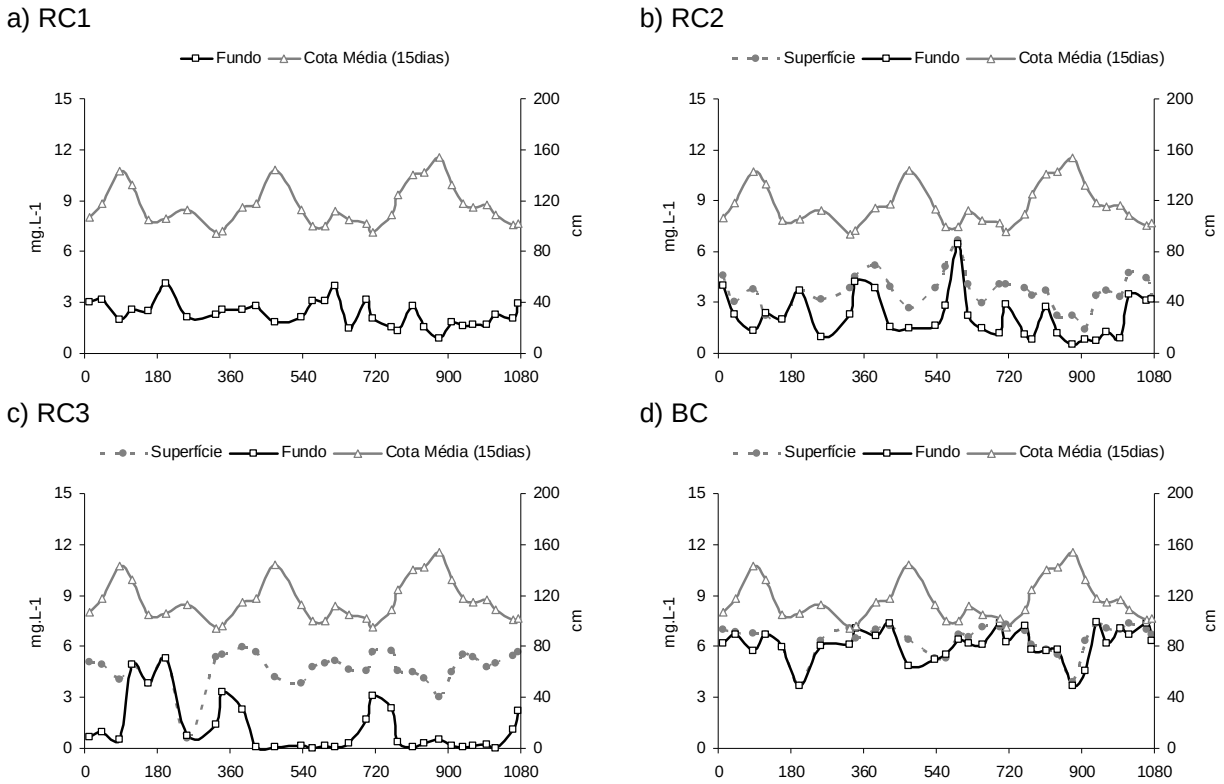

Figura 10 - Variação temporal da concentração de oxigênio dissolvido nos trechos do rio Curuá na e baía de Caxiuanã.

Junket al. (1997) comentam sobre essas adaptações de algumas espécies da ictiofauna amazônica presentes no lago Camaleão (Amazonas), onde das 20 espécies listadas 5 foram verificadas em Caxiuanã a partir do levantamento ictiofaunístico de Montag et al. (2008, 2009). Este número pode ser ainda maior, em virtude da grande quantidade de espécies associadas a bancos de macrófitas flutuantes (fixas ao substrato ou livres), que estão presentes em locais do rio como no ponto RC2 e que tendem a formar habitats com déficit de oxigênio devido à respiração e decomposição de raízes (WETZEL, 1975).

Em função da ocorrência desses bancos de macrófitas, e do sombreamento sobre o corpo d'água provocado pelos mesmos, os menores valores de temperatura da água entre os ambientes abertosforam obtidos no ponto RC2, com distinção estatística significativa (Kruskal-Wallis, topo: H(3) = 20,258; p = 0,0001 – fundo: H(3) = 39,984; p < 0,0001) (Figura 11).Neste trecho,o rio é menos largo, e, dessa forma, sofre maior influência da floresta ribeirinha que contribui com a redução do período de incidência direta de radiação solar.

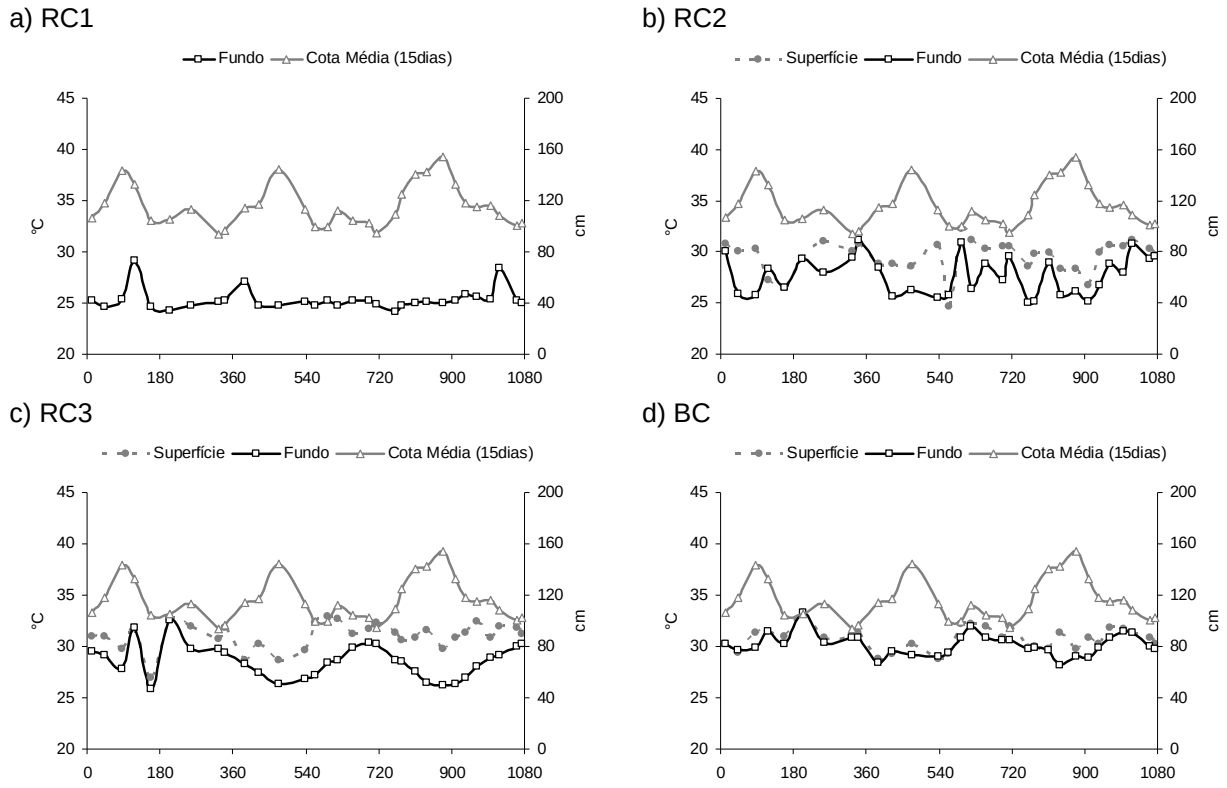

Figura 11 - Variação temporal da temperatura da água nos trechos do rio Curuá e na baía de Caxiuanã.

Conforme pode ser observado nas Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11, existe uma tendência geraldas variáveis apresentarem diferenças com a profundidade para os pontos localizados no rio Curuá, sendo este padrão estatisticamente significativo (p < 0,05) para todas as variáveis físico-químicas (Tabela 6). Estas diferenças entre as camadas de água de um mesmo perfil refletem a fraca

homogeneidade da massa de água, com a formação de estratos distintos quanto aos parâmetros físico-químicos.

Tabela 6 - Resultados da aplicação do teste estatístico de Wilcoxon, para verificação de estratos físico-químicos. Valores em negrito indicam diferenças significativas (p < 0,05).

	W	P		W	P
CE			pH		
RC2	**99,5**	**< 0,0001**	**RC2**	**596,5**	**0,0309**
Ru3	**70,5**	**< 0,0001**	**RC3**	**591,5**	**0,0371**
BC	505,5	0,5638	BC	428	0,7506
OD			T°C		
RC2	**778,5**	**< 0,0001**	**RC2**	**743**	**0,0002**
RC3	**880**	**< 0,0001**	**RC3**	**809.5**	**< 0,0001**
BC	591	0,1214	**BC**	**629**	**0,0370**

2.3.3 Variações Sazonais e Espaciais de Carbono Inorgânico Dissolvido e Carbono Orgânico Particulado e Dissolvido

A Tabela 7 apresenta uma comparação das concentrações de CID, COD, COPG, e COPF, obtidas para a região de Caxiuanã, com vários outros estudos realizados em ambientes aquáticos da Amazônia e da América do Sul. Desta forma, é possível verificar que os valores obtidos no presente estudos estão dentro da faixa ou próximos aos obtidos em outros corpos d’água da região.

Tabela 7 - Comparações das concentrações de CID, COD, COPG e COPF em ambientes aquáticos da Amazônia e da América do Sul. Todos os valores em $mg.l^{-1}$.

	CID	COD	COPG	COPF	
Rio Curuá - RC1	0,5	5,2	0,02	0,7	Este estudo
Rio Curuá - RC2	0,6	4,9	0,01	0,8	Este estudo
Rio Curuá - RC3	0,7	4,8	0,01	0,6	Este estudo
Baía de Caxiuanã - BC	0,5	4,1	0,04	0,8	Este estudo
Lago Calado	--	8,8	--	--	Waichman, 1996
LagoTupé	--	11,3	--	--	Junk, 1997
Rio Uatumã (após a UHE Balbina)		2,7 - 7,1	--	--	Kemeneset al., 2011
Rio Negro	1,6	8,4	0,02	0,5	Tardyet al., 2005
Rio Madeira	9,1	4,2	--	--	Leite et al., 2010
Rio Solimões	13,1	3,6	0,82	3,8	Tardyet al., 2005
Rio Purus	7,1	4,7	0,08	1,0	Tardyet al., 2005
Rio Tapajós	--	7,0	1,6		Richeyet al., 1980
Rio Orinoco	2,0	6,5	8,7		Lewis Jr., 1988; Jaffé et al., 1995
Rio Paraná	3,4	10,2	1,3		Depetris; Kempe, 1993
Rios Tropicais	--	2 - 15	--	--	Martins; Probst, 1991
Média Mundial	--	5,0	--	4,5	Meybeck, 1988

Para as águas do rio Amazonas, o CID é composto majoritariamente por bicarbonato e CO_2 dissolvido ($CO_{2\ livre}$ e H_2CO_3), uma vez que na faixa de pH, comumente observada nestas águas (≈ 6,2-7,2), o carbonato(CO_3^{2-}) se encontra em concentrações muito pequenas (DEVOL et al., 1987). Em função da ausência desse íon, a alcalinidade é determinada pela concentração de bicarbonato, sendo este predominante na composição de CID para o curso principal do rio Amazonas (DEVOL; HEDGES, 2001).

Em Caxiuanã, os baixos valores de pH observados tendem a limitar a ocorrência de bicarbonato e elevar a concentração de CO_2 livre dissolvido (STUMM; MORGAN, 1981). A presença e distribuição deste gás na água estão relacionadas à

dinâmica biogeoquímica local, em função dos processos de fotossíntese e respiração, uma vez que em um ambiente heterotrófico, como em geral são os rios da Amazônia (RICHEY et al., 1988; 1990; 2002), a decomposição da matéria orgânica dá origem à ácidos orgânicos, e as elevadas taxas respiratórias resultam na produção de CO_2, ocasionando a redução do pH e, consequentemente, de bicarbonato.

Desta forma, o CID apresentou baixas concentrações, sem a observação de correlação com os dados hidrológicos (Figura 12), porém havendo uma tendência de diferenciação entre os habitats de acordo com o período sazonal, com exceção do ponto mais a montante do rio Curuá (Tabela 8).

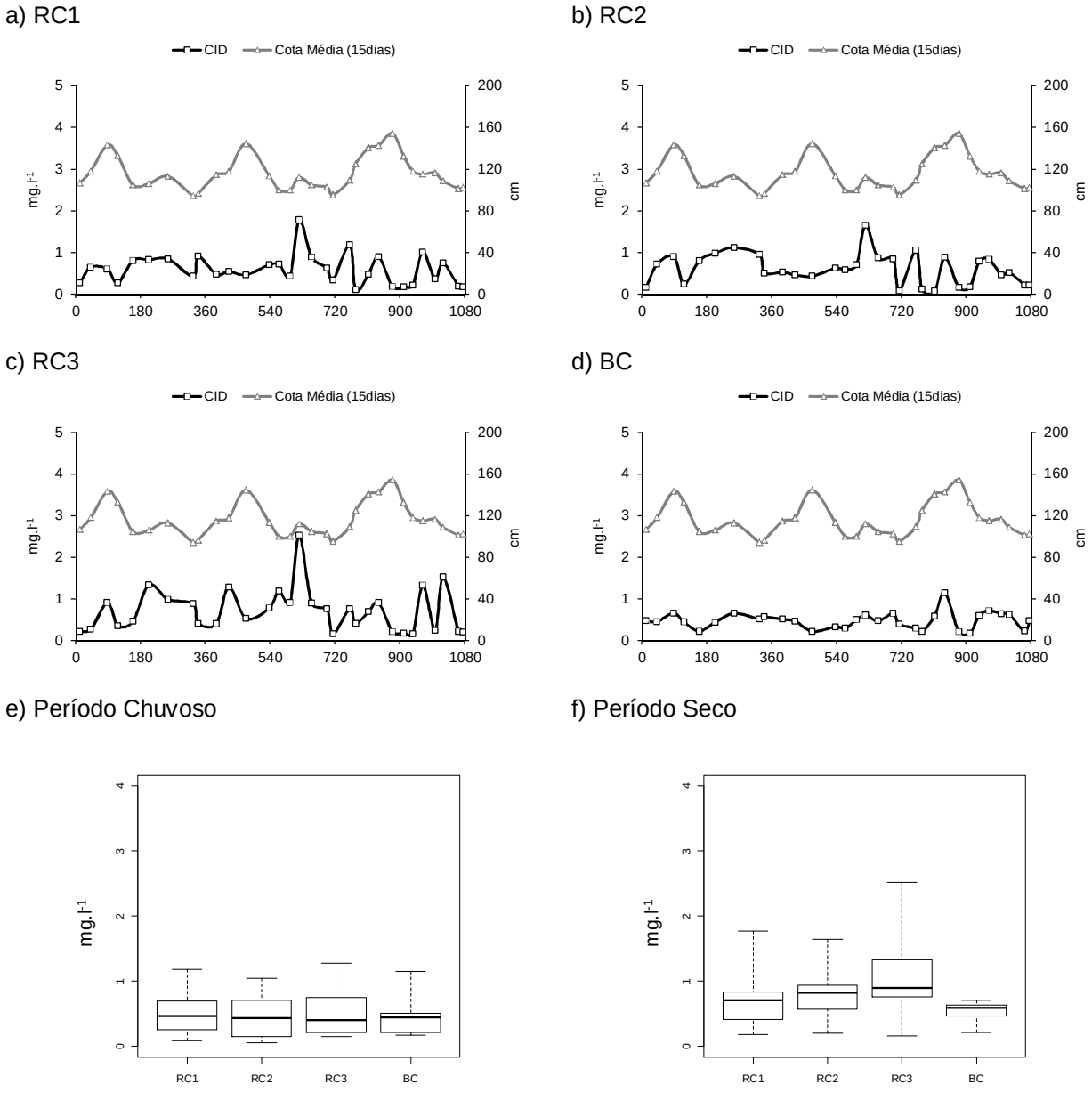

Figura 12 - Variações Temporais e Sazonais de CID nos ambientes estudados.

Tabela 8 - Resultado do teste estatístico de Wilcoxon para comparação entre períodos sazonais para cada ambiente estudado. Em negrito os resultados que indicam diferenças sazonais.

	W	p
RC1	149	0,2107
RC2	**182**	**0,008352**
RC3	**176**	**0,01755**
BC	**170,5**	**0,03385**

No período seco, a tendência verificada da baía de Caxiuanã em apresentar os menores valores de CID em relação aos demais pontos pode estar associada à presença abundante de fitoplâncton observada visualmente, cujas espécies ainda não foram alvo de estudos científicos. A atividade fotossintética realizada por esses organismos reduz a concentração de CO_2 na baía de Caxiuanã, o que, consequentemente, aumenta o valor do pH e possibilita o aumento na concentração de bicarbonato. O oposto ocorre no rio Curuá, uma vez que organismos fotossintetizantes não se encontram em abundância neste rio.

Para a região, essas concentrações de CID são dependentes da decomposição da matéria orgânica (neste estudo tratada como carbono orgânico), que pode apresentar diversas vias de entrada nos ecossistemas aquáticos continentais, cujas principais são (DEVOL; HEDGES, 2001; MCCLAIN; ELSENBEER., 2001; WARD, 1989):

- Aporte direto sobre o canal (queda de serapilheira, precipitação, plúvio-lixiviado e erosão de margens);
- Fluxos laterais superficiais e subsuperficiais;
- Fluxos subterrâneos (afloramento e trocas verticais) e;
- Produção autóctone.

Dentre as formas orgânicas, o carbono orgânico dissolvido é em geral o maior reservatório do ciclo do carbono nos ambientes fluviais e lacustres (FINDLAY; SINSABAUGH, 2002; DEVOL; HEDGES, 2001; SALONEN et al., 1992), sendo uma

importante variável para o estudo e identificação de alterações na dinâmica aquática por agentes estressantes, como as mudanças climáticas (WILLIAMSON et al., 1999).

Em Caxiuanã, em todos os pontos estudados, o COD caracterizou-se como forma de carbono dominante, em função do reduzido reservatório de CID, salientando a importância desses compostos orgânicos na biogeoquímica local. A significante correlação com a cota do rio (Figura 13) indica um forte controle pelos aportes laterais originários dos ecossistemas terrestres para a manutenção do metabolismo aquático heterotrófico, seja pelo aporte direto de COD ou de nutrientes para a fotossíntese.

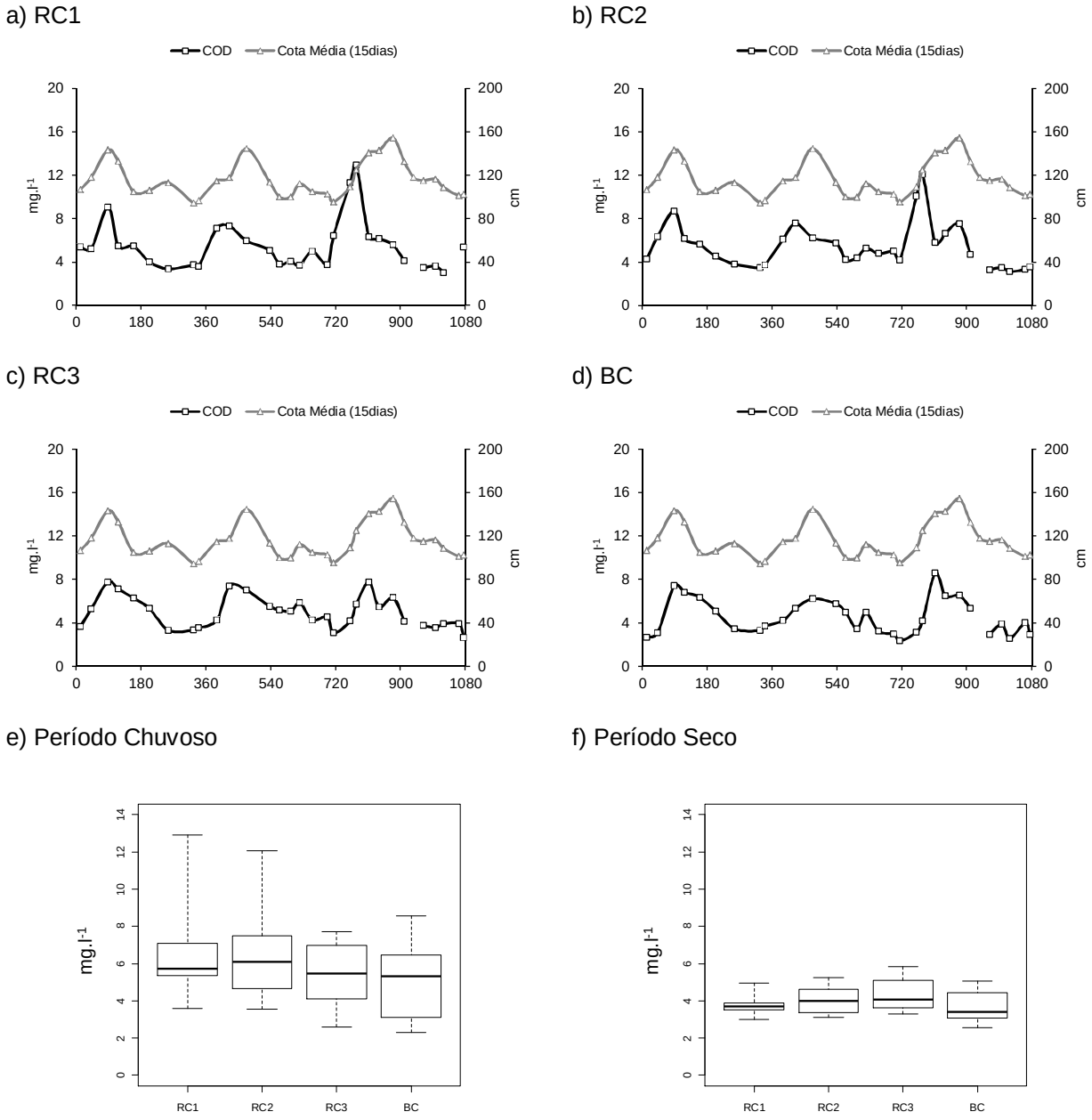

Figura 13 - Variações Temporais e Sazonais de COD nos ambientes estudados.

Na baía de Caxiuanã, o COD é provavelmente fruto da dinâmica metabólica de algas presentes em suspensão e no leito deste corpo d'água, a partir da liberação de exudatos, produzidos durante o processo de fotossíntese destes organismos, que representam um material lábil de alta qualidade (WILCZEK et al., 2005), facilmente consumidos pela comunidade heterotrófica.

No rio Curuá, durante o período de estiagem, as concentrações de COD foram caracterizadas por um leve aumento dos valores de montante à jusante, em consequência das distintas fontes de carbono orgânico observadas para cada trecho selecionado. O ponto RC1 é marcado pela influência de vegetação de igapó, recebendo grande quantidade de aporte alóctone pela produção de serapilheira, que atinge diretamente a superfície. O ponto RC2 apresenta habitat aberto e diversificado, margeado por vegetação de igapó e com a presença de macrófitas aquáticas (LINS et al., 1997). Por outro lado, o ponto RC3 se distingue dos demais por apresentar habitat mais aberto, cuja margem possui estreita faixa de igapó e maior influência de floresta densa de terra firme, entretanto recebendo maior quantidade de compostos orgânicos oriundos à montante.

Apesar de não serem observadas diferenças significativas entre os dados da baía e do rio (Figura 13), é possível que o COD do último apresente menor qualidade energética e nutricional, por ser formado, provavelmente, por compostos orgânicos mais recalcitrantes, originados da decomposição da matéria orgânica. Além disso, é possível que também existam diferenças qualitativas entre os setores do rio Curuá, dados seus distintos habitats.

Embora representem um reservatório menor, as formas particuladas de carbono constituem um importante estoque para a manutenção do metabolismo da comunidade, pois podem ser compostas de material mais recente (folhas e outros detritos florestais, por exemplo) e, portanto, de melhor qualidade, apresentando características distintas dos compostos dissolvidos, ainda que possuam a mesma fonte de origem (ALLAN; CASTILLO, 2007; DEVOL; HEDGES, 2001; HEDGES et al., 1994).

As fases orgânicas particuladas de carbono apresentaram valores menores que a fase orgânica dissolvida e também sem obtida correlação significativa com o nível do rio (Figura 14 e Figura 15). Entre as fases particuladas, o sedimento fino apresentou maior conteúdo de C em comparação ao sedimento grosso em suspensão.

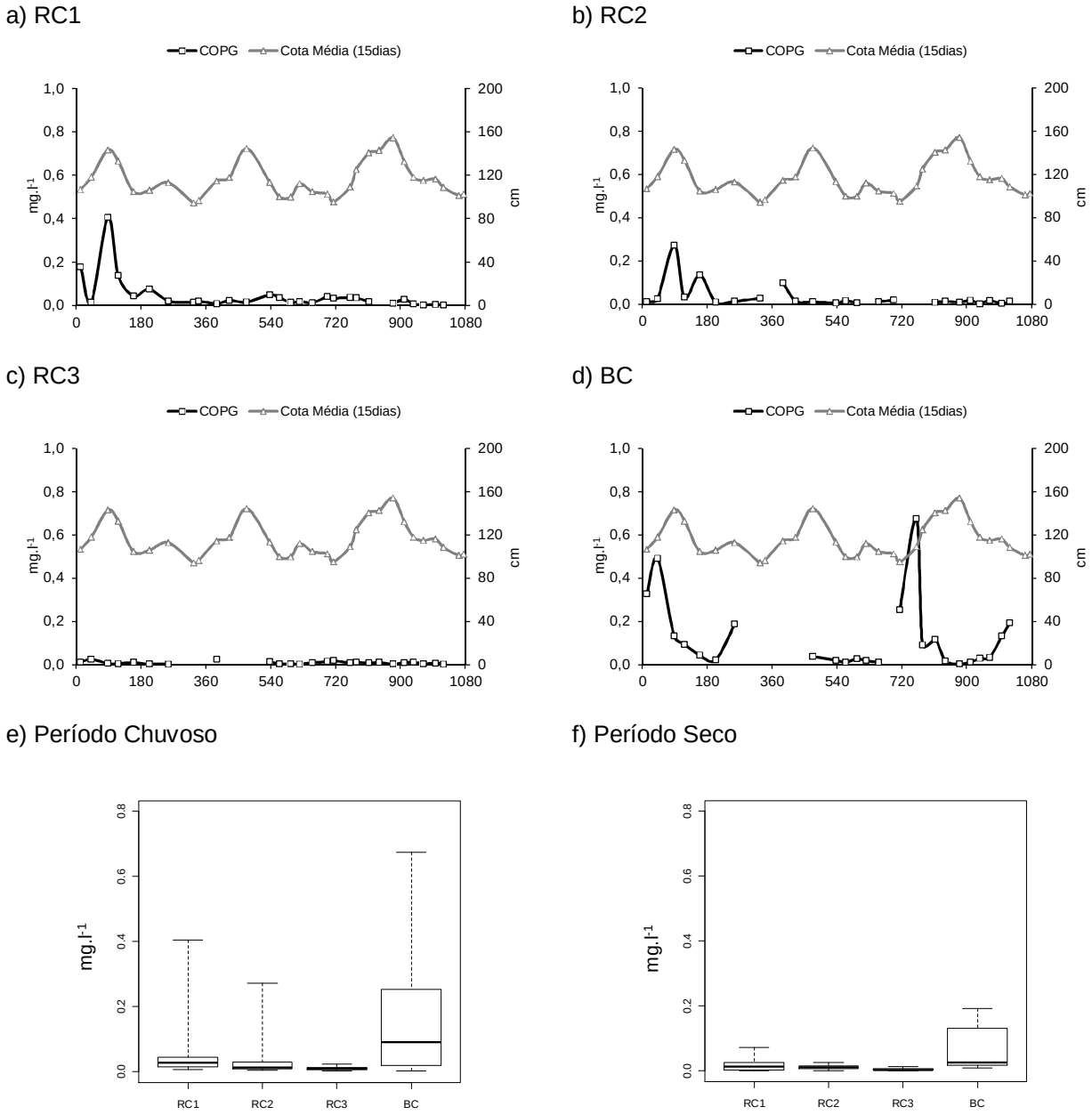

Figura 14 - Variações Temporais e Sazonais de COPG nos ambientes estudados.

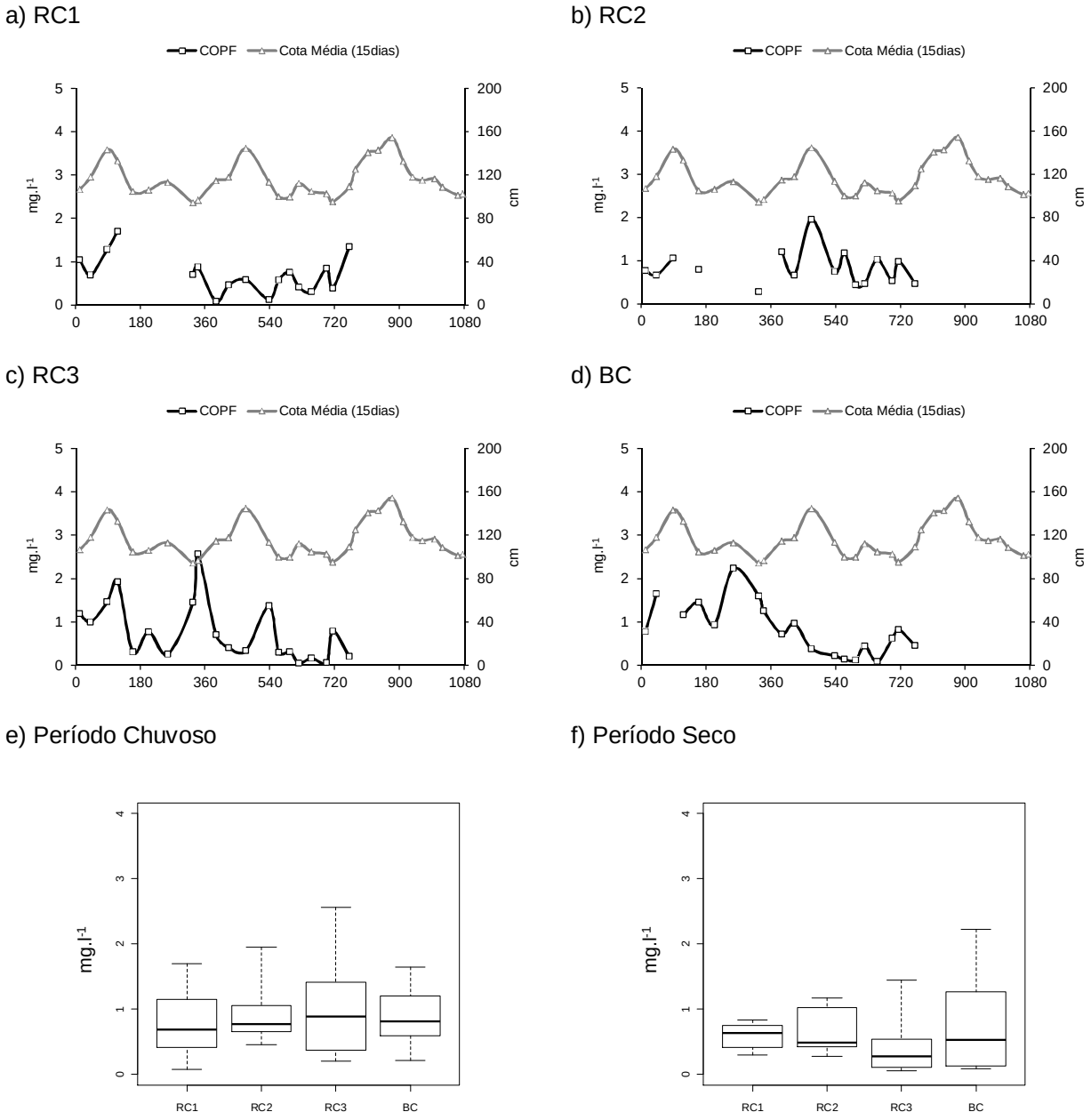

Figura 15 - Variações Temporais e Sazonais de COPF nos ambientes estudados

A aplicação do teste estatístico não-paramétrico de Kruskal-Wallis indicou diferença significativa entre os pontos do rio Curuá e a baía de Caxiuanã apenas para COPG (H (3) = 30,90; p = 0,0009). Assim, apesar das diferenças geomorfológicas e paisagísticas existentes entre os setores do rio Curuá, não há diferenças quantitativas quanto ao aporte de carbono orgânico particulado. Considerando as dimensões destes ambientes, é provável que o carbono particulado seja oriundo de uma fonte similar, via

fluxos laterais derivados da produção de serapilheira da floresta de terra-firme e igapó (DEVOL; HEDGES, 2001; MCCLAIN; ELSENBEER, 2001). Esses resultados compilados com os dados de COD indicam que, para o período de estudo, estes habitats apresentaram-se fortemente conectados.

Na baía de Caxiuanã, o aporte autóctone efetuado pela comunidade de algas caracteriza-se como um importante agente regulador na biogeoquímica local, representados pelos valores elevados de COPG, refletindo o padrão autotrófico de sua comunidade aquática. Neste local, o ambiente aberto e raso (profundidade média de 2 m) favorece a contínua movimentação e homogeneização da coluna d'água, o que disponibiliza nutrientes para o afloramento de fitoplâncton.

A correlação positiva significante da cota do rio apenas com o COD para todos os habitats estudados enfatiza a característica lêntica dos corpos d'água da região, onde os materiais orgânicos particulados estão sujeitos à deposição no leito, logo após a entrada no sistema, devido à baixa velocidade de corrente. Assim, as variações nas concentrações desses materiais são reflexos dos padrões geomorfológicos locais que distinguem esses ambientes em zonas de diferentes metabolismos, embora estejam conectados.

Além disto, em todos os pontos, o COD apresentou correlação inversa com o pH (RC1: rs = – 0,40; p = 0,03; RC2: rs = – 0,51; p = 0,005; RC3: rs = – 0,52; p = 0,004; BC: rs = – 0,70; p = 0,00003) (Figura 16), indicando que ácidos orgânicos que compõem a análise de COD apresentam grande influência na biogeoquímica local, seja a partir da liberação de exudatos por macrófitas e algas (MALINSKY-RUSHANSKY; LEGRAND, 1996), da decomposição de matéria orgânica alóctone (ALLAN; CASTILLO, 2007) ou do aporte de substâncias oriundas dos solos da região (McCLAIN et al., 1997).

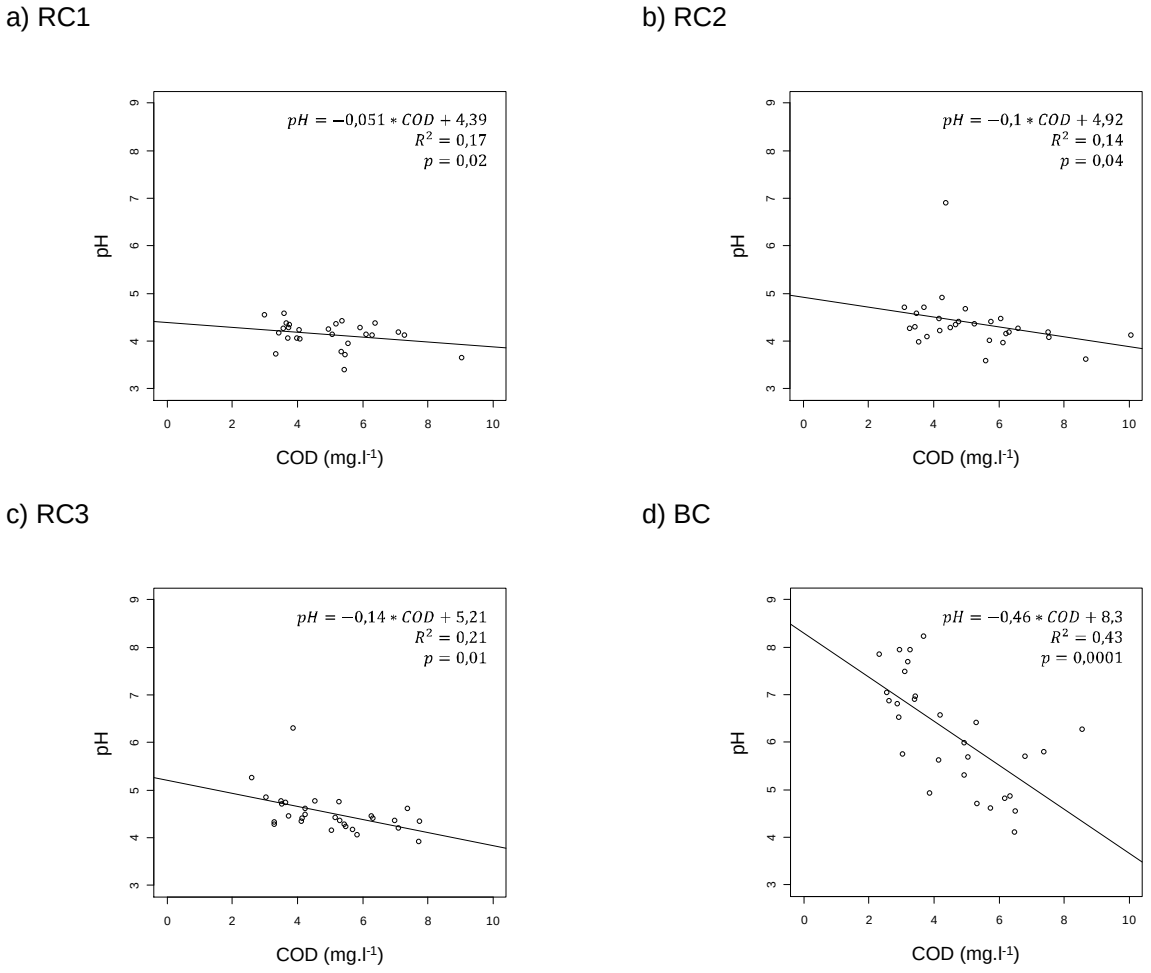

Figura 16 - Relação entre COD e pH nos ambientes estudados.

2.3.4 Pressão Parcial de CO_2 e CH_4 e Fluxos Difusivos

Do mesmo modo que outros corpos d'água amazônicos (JOHNSON et al., 2008; RASERA et al., 2008; 2010; ROSA, 2007; RICHEY et al., 1990), o rio Curuá caracterizou-se por elevados valores de pCO_2 e pCH_4, superiores ao registrado na atmosfera local (pCO_2^{atm} = µatm; pCH_4^{atm} =2 µatm).

Conforme pode ser observado na Figura 17, as pressões parciais de CO_2 nos setores de médio e baixo curso do rio apresentaram correlação positiva com o nível do rio (RC2: rs = 0,69; p = 0,0001; RC3: rs = 0,54; p = 0,004), em concordância com os estudos de Richey et al. (2002) e Rasera (2010) em corpos aquáticos amazônicos de

diferentes características geomorfológicas, indicando um padrão comum provável de acontecer em todos os ecossistemas fluviais amazônicos.

Estes gases apresentam duas origens principais, ecossistema terrestre e solução do solo. No primeiro caso, as diversas formas orgânicas de carbono adentram o ambiente aquático e são sucessivamente processadas, originando gases CO_2 e CH_4 a partir da atividade de respiração aeróbica e anaeróbica (DEVOL et al., 1994). No segundo, o aporte ocorre via solução do solo e fluxos subterrâneos que carreiam, principalmente, CO_2 originário da respiração de raízes e da decomposição de matéria orgânica (JOHNSON et al., 2006).

O fato de não ter sido verificada correlação de pCO_2 com o perfil hidrológicono curso superior do rio Curuá deve-se provavelmente ao aporte via solução do solo, uma vez que Neu (2009) estudando um igarapé da bacia do rio Xingu encontrou correlação significativa de pCO_2 entre rio e solo. Outra possível fonte seria o aporte direto de carbono orgânico a partir da floresta ribeirinha presente neste setor, uma vez que o canal do rio é completamente sombreado pelo dossel florestal.

Diferentemente do CO_2, que apresenta grande difusividade na água (STUMM; MORGAN, 1981), o metano, oriundo de processos anaeróbicos, tende a acumular-se no substrato e, assim, formar bolhas (YAMAMOTO et al., 1976) que esporadicamente podem ascender à superfície. Consequentemente, o método de amostragem empregado neste estudo possui a limitação de avaliar apenas a disponibilidade desse gás difuso no meio. A despeito dessa deficiência, ressalta-se que esse fator é comum a todos os estudos que fazem uso desse método, o que possibilita a comparação entre diversos ambientes e avaliar, ainda que de modo limitado, o metabolismo da comunidade local.

A inexistência de correlação entre os dados de pCH_4 e a hidrógrafa (Figura 18) possui duas possíveis causas: a limitação no método empregado, que não permitiu a quantificação adequada do conteúdo de metano presente nos pontos amostrados; e/ou a produção contínua de metano nos sedimentos.

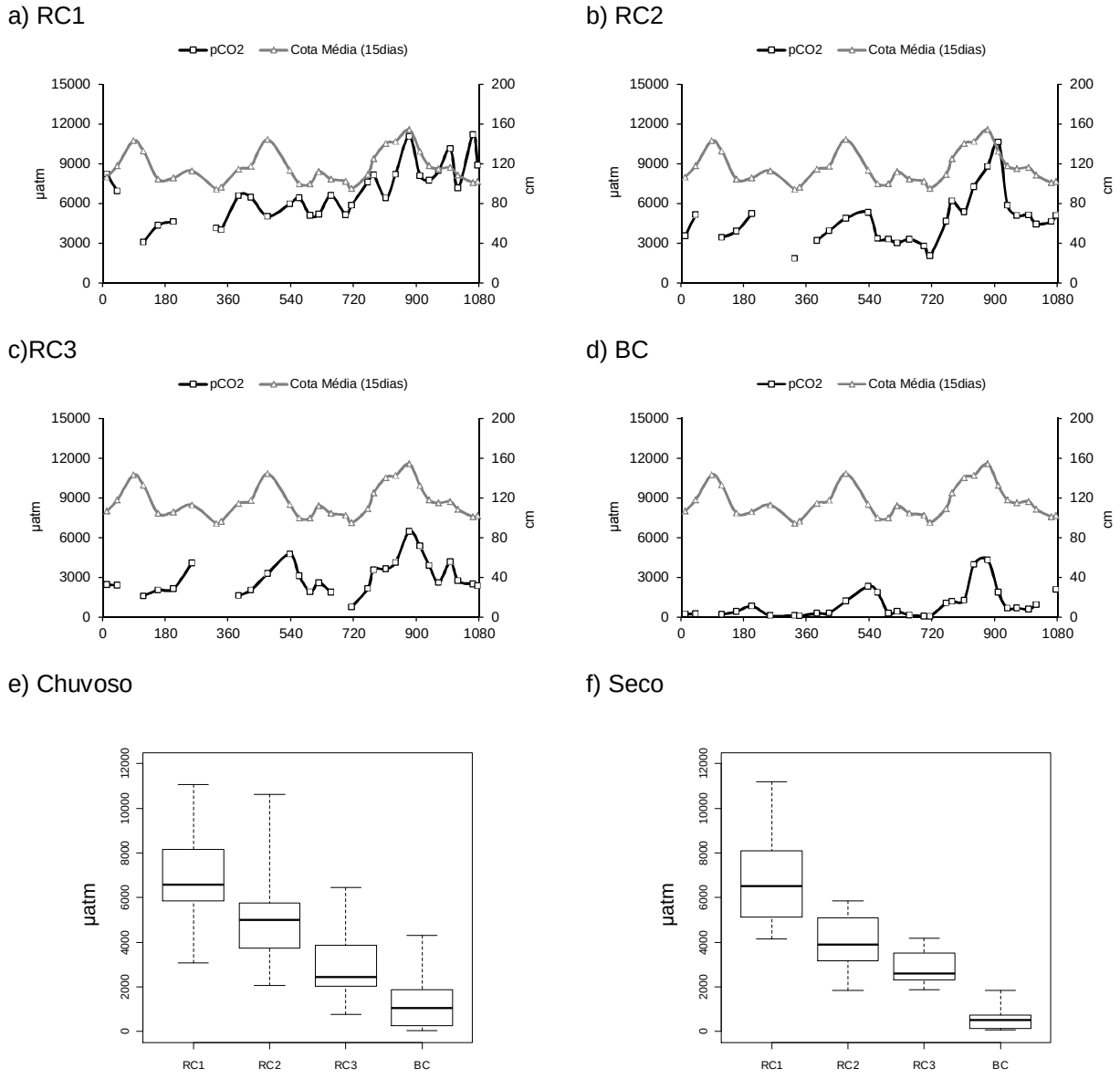

Figura 17 - Variações Temporais e Sazonais de pCO_2 nos ambientes estudados.

Apesar disso, foram verificados valores elevados de pCH_4 para os pontos localizados no rio Curuá (Figura 18), em função do acúmulo de material orgânico que adentra o sistema e deposita-se no leito do mesmo, formando um sedimento rico e cuja condição de anoxia favorece a produção desse gás por bactérias anaeróbicas (NEU, 2009; SCHLESINGER, 1991).

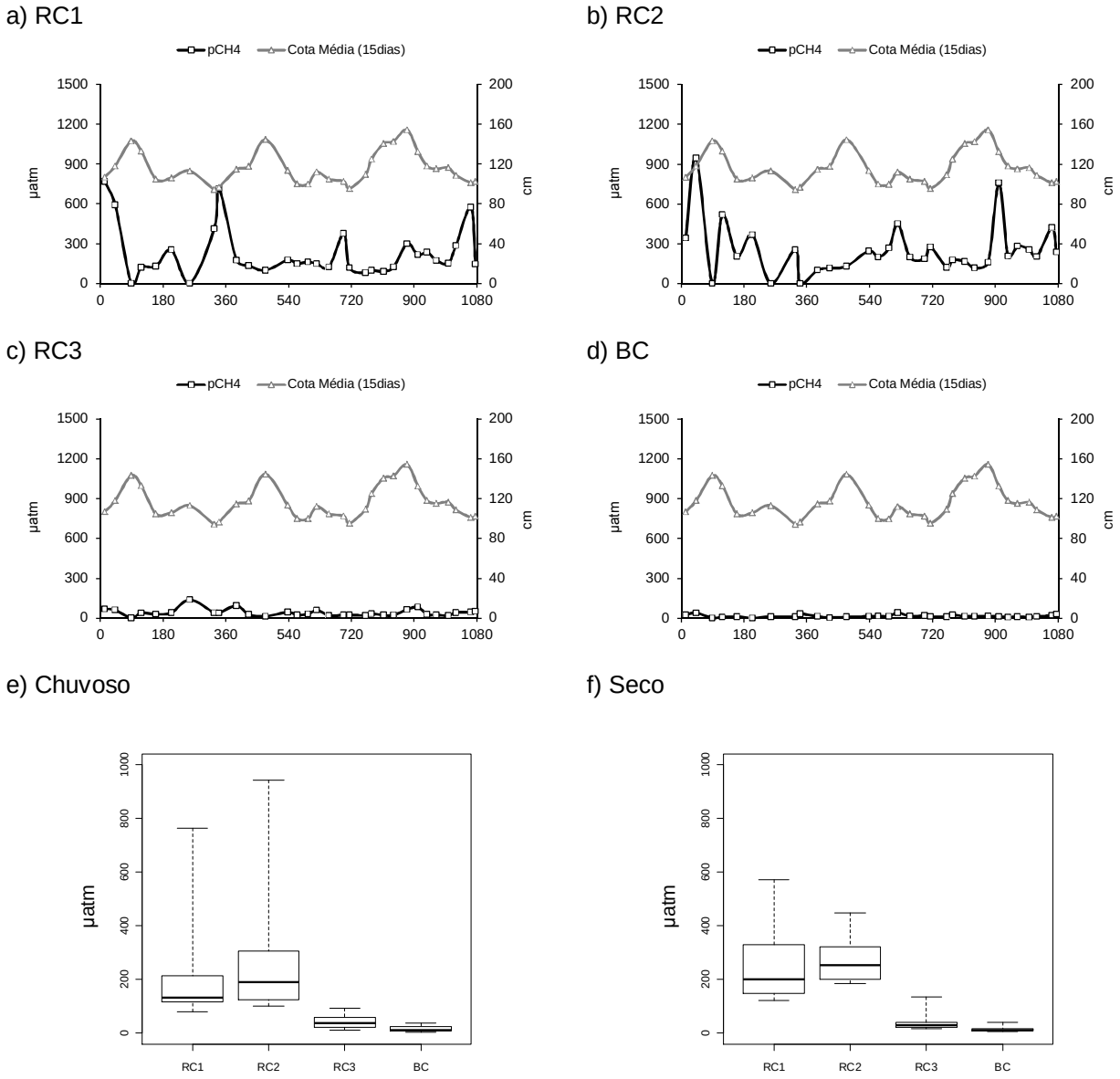

Figura 18 - Variações Temporais e Sazonais de pCH_4 nos ambientes estudados.

Observa-se também que os ambientes do curso superior e médio do rio contêm concentrações de pCH_4 mais elevadas em relação ao curso inferior (Kruskal-Wallis, $H(3) = 78,60$; $p < 0,00001$) (Figura 18).Esta tendência deve-se provavelmente a dimensão morfológica desses ambientes, uma vez que o curso inferior é mais profundo ($RC3_{prof}$ = 10 m) em comparação aos outros ($RC1_{prof}$< 1 m; $RC2_{prof}$ = 2 m). No ponto RC3, conforme visto anteriormente, foram encontrados valores de saturação de

O_2menores que 1%, além da formação de estratos físico-químicos, logo o maior conteúdo de CH_4 deve ficar armazenado mais próximo ao fundo (considerando que a coleta foi realizada a 60% da profundidade total (HAUER; LAMBERTI, 1996)).

A baía de Caxiuanã, novamente, caracterizou-se como um ecossistema singular (Kruskal-Wallis, $p < 0,00001$) (Figura 17 e Figura 18), exibindo baixos valores de pCO_2, comumente inferiores ao obtido para a atmosfera local, consequência da atividade fotossintética efetuada pela comunidade de algas, que distinguem esse habitat dos demais também quanto a pH, O_2 e COPG, conforme visto anteriormente.

Os baixo valores de pCH_4 nesse corpo d'água são em virtude da boa aeração e circulação da coluna d'água, em conjunto com a ação da comunidade autotrófica que mantem elevada a disponibilidade de O_2.

Portanto, esses organismos possuem papel fundamental na dinâmica biogeoquímica local, cuja comunidade aquática é sustentada pela fixação autóctone de CO_2. Padrão que diverge do modelo geral existente que considera os corpos d'água amazônicos como ambientes heterotróficos (DEVOL et al., 1995; WISSMAR et al., 1981; RICHEY et al., 1988; 1990; 2002).

O uso da câmara flutuante no período de Julho de 2007 a Janeiro de 2008 permitiu o cálculo dos coeficientes de difusividade de CO_2 e CH_4 (k_{CO2} e k_{CH4}) para a estimativa dos fluxos ocorrentes na região (Tabela 9), que exibiram valores próximos aos obtidos em outros corpos d'água da Amazônia (RASERA et al., 2008; RICHEY et al., 1990;2002).

Tabela 9 - Coeficiente de difusividade (k) e fluxos de CO2 e CH4. Valores mínimos e máximos em parenteses.

	k_{CO2}	F_{CO2}	k_{CH4}	F_{CH4}
RC1	11,14	6,4 (2,6 ↔ 11,3)	10,95	0,007 (0,003 ↔ 0,032)
RC2	12,18	4,6 (1,6 ↔ 11,8)	11,95	0,01 (0,004 ↔ 0,043)
RC3	8,36	1,6 (0,3 ↔ 5,7)	8,20	0,001 (0,0003 ↔ 0,004)
BC	21,65	0,3 (- 0,6 ↔ 7,2)	21,18	0,0008 (0,0001 ↔ 0,003)

3 CONCLUSÕES

Por se tratar de um ecossistema preservado, os resultados gerados possuem grande relevância para comparação com outros estudos que sejam desenvolvidos em locais que sofram alterações em virtude de ações antrópicas. Além disso, destaca-se a importância de alguns desses dados como subsídios para a elaboração do Plano de Manejo da unidade.

Os corpos d'água integrantes da área da FLONA Caxiuanã caracterizam-se como ambientes flúvio-lacustres, nos quais as variações da hidrógrafa condicionam as variáveis físico-químicas, sendo ao mesmo tempo observadas diferenças estatisticamente significativas dessas variáveis entre as profundidades, reflexo da estratificação que ocorre nesses ambientes.

As formas de carbono estudadas apresentaram diferenças espaciais, marcadas principalmente entre os pontos amostrados no rio Curuá e a baía de Caxiuanã.

No rio foram em geral observados baixos valores de formas orgânicas de carbono e elevadas concentrações e fluxos de gases CO_2 e CH_4, fruto de um ambiente composto por comunidade heterotrófica que depende fortemente do aporte de material orgânico terrestre para a manutenção do seu metabolismo.

A baía de Caxiuanã configurou-se como um ambiente distinto, dada suas características geológicas e em função dos eventos neotectônicos do Pleistoceno que alteraram sua dinâmica de fluvial para lacustre, propiciando o desenvolvimento de uma densa comunidade fitoplanctônica, a qual aparenta influenciar a biogeoquímica local, uma vez que a sua dinâmica não apresentou correlação significativa com os dados de cota do rio. Neste corpo d'água, foram obtidos valores elevados das frações orgânicas de carbono e baixas concentrações e fluxos de gases, em função da dinâmica biogeoquímica singular que ocorre neste ambiente, consequência da pequena profundidade média, elevada transparência e das florações de fitoplâncton, que disponibilizam grande quantidade material orgânico para a comunidade aquática e consomem CO_2 das águas, promovendo assim a absorção de CO_2 atmosférico. Desta forma, este corpo hídrico pode representar um importante sorvedouro natural de CO_2.

As emissões de metano verificadas representam um fator interessante para a região e ratificam a característica flúvio-lacustres dos corpos d'água da região de Caxiuanã. Os valores de fluxo de CH_4 apesar de inferiores ao obtidos para CO_2 são muito significantes quando comparados com as concentrações atmosféricas.

É provável que a baía de Caxiuanã apresente frequentemente fluxos negativos de CO_2 durante o período de incidência solar, mas o aspecto pontual da amostragem impossibilitou uma observação mais adequada.

Para a região, as pesquisas futuras devem ser orientadas para:

- O estudo nictemeral da biogeoquímica das águas do rio Curuá e da baía de Caxiuanã, uma vez que o modelo atual de amostragem apesar de representativo, não possibilita o estudo de variações mais rápidas na dinâmica metabólica destes ambientes que ocorrem nesta escala de tempo dioturna;
- O estudo de identificação das espécies de fito e zooplancton ocorrentes dos corpos aquáticos e sua função na biogeoquímica local;
- Execução de estudos integrados de biogeoquímica e ictiologia sobre comportamento e dinâmica das comunidades aquáticas.

REFERÊNCIAS

ALLAN, J.D.; CASTILLO, M.M. **Stream ecology**, 2nded. New York: Springer, 2007. 436p.

ANJOS, M.B.; OLIVEIRA, R.R.; ZUANON, J. Hypoxic environments as refuge againstpredatory fish in the Amazonian floodplains.**Brazilian Journal of Biology,** São Carlos, v. 68, n. 1, p. 45-50, 2008.

BARTHEM, R.B.; CHARVET-ALMEIDA, O.; MONTAG, L.F.A.; LANNA, A.E. **Amazon Basin, GIWA Regional assessment 40b**.Kalmar: UniversityofKalmar, 2004. 76 p.

BECKER, B.K. Revisão das políticas de ocupação da Amazônia: é possível identificar modelos para projetar cenários? **Parcerias Estratégicas,** Belém, v. 12, p. 135-159, 2001.

BRASIL. Leis, Decretos, etc. Decreto n.º 239 de 28 de novembro de 1961. Cria a Floresta Nacional de Caxiuanã e dá outras providências. **Diário Oficial da União,** Brasília, 30 nov. 1961.

COSTA, A.C.L.; ALMEIDA, S.S.; CARVALHO, C.R.; MEIR, P.; MALHI, Y.; COSTA, R.F.; SILVA, J.A.; COSTA, M.C.; TANAKA, B.T.; FISHER, R.A.; SOTTA, E.D.; OLIVEIRA, L.L.; GONÇALVES, P.H.L.; BRAGA, A.; BARRETO, P.N. Experimento Esecaflor-LBA em Caxiuanã. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**: desafios para a conservação de uma floresta nacional na Amazônia. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi. 2009. p. 45-90.

COSTA, J.A.; RODRIGUES, T.E.; KERN, D.C.; SILVA, J.M.L. Classificação e distribuição dos padrões pedogeomórficos da Estação Científica Ferreira Penna, na região de Caxiuanã, no estado do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ser. Ciên. Nat., Belém, v. 1, n. 3, p. 117-128, 2005.

COSTA, M.L.; KERN, D.C.; BEHLING, H.; BORGES, M.S. Geologia In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**: populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002. v. 2, p. 179-205.

COSTA, M.L.; MORAES, E.; BEHLING, H.; MELO, J.; SIQUEIRA, N.; KERN, D. Os sedimentos de fundo da baía de Caxiuanã. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 1997. p. 121-137.

DEPETRIS, P.J.; KEMPE, S. Carbon dynamics and sources in the Paraná River.**Limnology and Oceanography,** Galveston, v. 38, n. 2, p. 382-395, 1993.

DEVOL, A.H.; HEDGES, J.I. Organic matter and nutrients in mainstem Amazon River. In: MCCLAIN, M.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.R. **The biogeochemistry of the Amazon Basin**. New York: Oxford University Press, 2001. p. 209-234.

DEVOL, A.H.; FORSBERG, B.R.; RICHEY, J.E.; PIMENTEL, T.P. Seasonal variation in chemical distributions in the Amazon (Solimões) River: a multiyear time series. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 9, n. 3, p. 307-328, 1995.

DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; FORSBERG, B.R.; MARTINELLI, L.A. Environmental methane in the Amazon River floodplain. In: MITSCH, W.J. (Ed.). **Global wetlands**: old world and new. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p. 151-165.

DUNCAN, W.P.; FERNANDES, M.N. Physicochemical characterization of the white, black and clearwater rivers of the Amazon Basin and its implications on the distribution of freshwater stingrays (Chondrichthyes, Potamotrygonidae). **PANAMJAS,** Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 454-464, 2010.

FEARNSIDE, P.M. Desmatamento na Amazônia brasileira. **Megadiversidade,** Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 113-123, 2005.

FERREIRA, L.V.; ALMEIDA, S.S.; ROSÁRIO, C.S. As áreas de inundação. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 1997.p. 195-212.

FINDLAY, S.E.G.; SINSANBAIGH, R.L. **Aquatic ecosystems:** interactivity of dissolved organic matter. San Diego: Academic Press, 2002. 512 p.

GIBBS, R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. **Science,** Washington, v. 170, n. 3962, p 1088-1090, 1970.

HAUER, F.R.; LAMBERTI, G.A. **Methods in stream ecology**. San Diego: Academic Press, 1996. 674 p.

HEDGES, J.; CLARK, W.A.; QUAY, P.D.; RICEY, J.E.; DEVOL, A.H.; SANTOS, U.M. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River.**Limnology and Oceanography**, Galveston, v. 31, p. 717-738, 1986.

HEDGES, J.I.; COWIE, G.L.; RICHEY, J.E.; QUAY, P. Origins and processing of organic matter in the Amazon River as indicated by carbohydrates and amino acids. **Limnology and Oceanography,** Galveston, v. 39, p. 743-761, 1994.

HEM, J.D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. 3rd ed. Washington: U. S. Geological Survey Water-Supply, 1989. 263 p.

HIDA, N.; MAIA, J.M.; HIRAOKA, M.; SHIMI, O.; MIZUTANI, N. Notes on annual and daily water levels changes at Breves and Caxiuanã, Amazon estuary. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 1997. p. 97-104.

HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L.; NOBRE, C.A.; HACKLER, J.L.; LAWRENCE, K.T.; CHOMENTOWSKI, W.H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature,** London, v. 403, p. 301-304, 2000.

JAFFÉ, R.; WOLFF, G.A.; CABRERA, A.C.; CHITTY, H.C.The biogeochemistry of lipids in rivers of the Orinoco Basin.**GeochimicaetCosmochimicaActa**, Saint Louis, v. 59, n. 21, p. 4507-4522, 1995.

JOHNSON, M.S.; LEHMANN, J.; COUTO, E.G.; NOVAES FILHO, J.P.; RIHA, S.J. DOC and DIC in flowpaths of Amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils.**Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 81, p. 45-57, 2006.

JOHNSON, M.S.; LEHMANN, J.; RIHA, S.; KRUSCHE, A.V.; RICHEY, J.E.; OMETTO, J.P.H.B.; COUTO, E.G. CO_2 flux from Amazonian headwater streams represents a significant fate for deep soil respiration. **Geophysical Research Letters,** Washington, v. 35, p. L17401, 2008.

JUNK, W. **The central Amazon floodplain:** ecology of a pulsing system. Berlin: Springer, 1997. 525 p.

JUNK, W.J.; SOARES, M.G.M.; SAINT-PAUL, U.The fish. In: JUNK, W.J. (Ed.). **The central Amazon floodplain**: ecology of a pulsing system. Berlin: Springer, 1997. p. 685-408.

KEMENES, A.; FORSBER, B. R.; MELACK, J. M. CO2 emissions from a tropical hydroeletric reservoir (Balbina, Brazil).**Journal of Geophysical Research,** Wanshinton, v. 116, G03004, p. 1-11, 2011.

LEITE, N.K.; KRUSCHE, A.V.; BALLESTER, M.V.R.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.E.; GOMES, M.B. Intra and interannual variability in the Madeira River water chemistry and sediment load. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 105, p. 35-51, 2011.

LEWIS JR., W.M. Primary production in Orinoco River. **Ecology,** Washington, v. 69, n. 3, p. 679-692, 1988.

LINS, A.L.F.; TOSTES, L.C.L.;VILHENA-POTIGUARA, R.C.; LOBATO, L.C. MacrófitasAquáticas. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**: populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002. v. 2, p. 369-377.

LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**: populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002. 734 p.

LISBOA, P.L.B.; SILVA, A.S.L.; ALMEIDA, S.S. Florística e estrutura dos ambientes. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 1997. p. 163-194.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R.A.; KILLEEN, T.J.; LI, W.; NOBRE, A.C. Climate change, deforestation and the fate of the Amazon.**Science,** Washington, v. 319, p. 169-172, 2008.

MALINSKY-RUSHANSKY; N.Z.; LEGRAND, C. Excretion of dissolved organic carbon by phytoplankton of different sizes and subsequent bacterial uptake.**Marine Ecology Progress Series,** Morehead City, v. 132, p. 249-255, 1996.

MARENGO; J.A.; NOBRE, C.A. General characteristics and variability of climate in Amazon Basin and its links to the global climate system. In: McCLAIN, M.E.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.E. **The biogeochemistry of the Amazon** Basin. New York: Oxford, 2001. p. 17-41.

MARGULIS, S. **Causas do desmatamento na Amazônia brasileira**. Brasília: Banco Mundial, 2003. 100 p.

MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E.A.; FIGUEIREDO, R.D.O.; VICTORIA, R.L.; KRUSCHE, A.V. Control of cation concentrations in stream Waters by surface soil processes in an Amazonian watershed. **Nature,** London, v. 410, n. 6830, p. 802-805, 2001.

MARTINS, O.; PROBST, J.L. Biogeochemistry of major African rivers: Carbon and mineral transport. In: DEGENS, E.T.; KEMPE, S.; RICHEY, J.E. **Biogeochemistry of Major world rivers**. Chichester: John Wiley, 1991. Disponível em: <http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope42/chapter06.html> Acesso em: 01 abr. 2009.

MAYORGA, E.; AUFDENKAMPE, A.K.; MASIELLO, C.A.; KRUSCHE, A.V.; HEDGES, J.I.; QUAY, P.D.; RICHEY, J.E.; BROWN, T.A. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing form Amazonian rivers. **Nature,** London, v. 436, p. 538-541, 2005.

MCCLAIN, M.; ELSENBEER, H. Terrestrial inputs to Amazon Streams and internal biogeochemical processing. In: MCCLAIN, M.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.R. **The biogeochemistry of the Amazon Basin**. New York: Oxford University Press, 2001. p. 185-208.

MCCLAIN, M.E.; RICHEY, J.E.; BRANDES, J.A.; PIMENTAL, T.P. Dissolved organic matter and terrestrial linkages in the central Amazon basin of Brazil.**Global Biogeochemical Cycles,** Washington, v. 11, p. 295-311, 1997.

MEYBECK, M. How to establish and use world budgets of river material. In: LERMAN, A.; MEYBECK, M. (Ed.). **Physical and chemical weathering in geochemical cycles**. Norwell: Kluwer Acad. Publ., 1988. p. 247-272.

_____. Global occurrence of major elements in rivers. In: DREVER, J.I. (Ed.). **Treatise in geochemistry**. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. v. 5, p. 207-223.

MONTAG, L.F.A.; FREITAS, T.M.S.; WOSIACKI, W.B.; BARTHEM, R.B. Peixes da Floresta Nacional de Caxiuanã (municípios de Melgaço e Portel, Pará-Brasil). **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ser. Ciên. Nat., Belém, v. 3, n. 1, p. 11-34, 2008.

MONTAG, L.F.A.; FREITAS, T.M.S.; CASTRO, N.C.; WOLMAR, B.W.; BARTHEM, R.B. Ictiofauna: diversidade e conservação. In: LISBOA, P.L.B. (Org.). **Caxiuanã**: desafios para a conservação de uma floresta nacional na Amazônia. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi. 2009. p. 605-626.

NEPSTAD, D.C. **The Amazon's vicious cycles**. Brasília: World Wid Fund for Nature, 2007. 23 p.

NEU, V. **O ciclo do carbono na bacia do Alto Xingu:** interação entre ambientes terrestre, aquático e atmosférico. 2009. 113 p. Tese (Doutorado Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PERDUE, E.M.; RITCHIE, J.D. Dissolved organic matter in fresh waters. In: DREVER, J.I. (Ed.). **Treatise in geochemistry**. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. v. 5, p. 273-318.

R DEVELOPMENT CORE TEAM.**R**: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2011.Disponívelem: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: Janeiro de 2011.

RASERA, M.F.F.L. **Determinação dos fluxos de CO_2 e parâmetros físicos envolvidos neste processo em diferentes ambientes fluviais da Amazônia**. 2010. 125 p. Tese (Doutorado em Química do Meio Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

RASERA, M.F.F.L.; BALLESTER; M.V.R.; KRUSCHE, A.V. Estimating the surface area of small rivers in the southwestern Amazon and their role in CO_2 outgassing.**Earth Interactions,** Washington, v. 12, p. 1-16, 2008.

RICHEY, J.E. The Amazon River system.In: DEGENS, E.T. (Ed.) **Transport of Carbon and minerals in major world rivers**. Hamburg: SCOPE/UNEP, 1982. pt. 1: p. 365-378.

RICHEY, J.E.; BROCK, J.T.; NAIMAN, R.J.; WISSMAR, R.C.; STALLARD, R.F. Organic carbon: transport and oxidation in the Amazon River. **Science**, Washington, v. 207, n. 4437, p. 1348-1351, 1980.

RICHEY, J.E.; HEDGES, J.I.; DEVOL, A.H.; QUAY, P.D.; VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.; FORSBERG, B.R. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, Galveston, v. 35, n. 2, p. 352-371, 1990.

RICHEY, J.E.; MELACK, J.M.; AUFDENKAMPE, A.K.; BALLESTER, M.V.R.; HESS, L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO2. **Nature,** New York, v. 416, p. 617-620, 2002.

ROSA, M.B.S. **Dinâmica do carbono em pequenas bacias de drenagem sob uso de agricultura familiar na Amazônia Oriental**. 2007. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

RUIVO, M.L.P.; PEREIRA, S.B.; BUSSETI, E.P.C.; COSTA, R.F.; QUANZ, B.; NAGAISHI, T.Y.; OLIVEIRA, P.J.; MEIR, P.; MALHI, Y.; COSTA, A.C.L. Propriedades do solo e fluxo de CO_2 em Caxiuanã, Pará: experimento LBA-Esecaflor. In: KLEIN, E.L.; VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, M.L. (Org.). **Contribuições à geologia da Amazônia.** Belém: SBG-Núcleo Norte, 2002. v. 3, p. 291-299.

SALONEN, K.; KANKAALA, P.; TULONEN, T.; HAMMAR, T.; JAMES, M.; METSÄLÄ, T.R. ;ARVOLA, L. Planktonic food chains of a highly humic lake. A mesocosm experiment in summer during dominance of heterotrophic processes.**Hydrobiologia,** Dordrecht, v. 229, n. 1, p. 143-157, 1992.

SCHLESINGER, W.H. **Biogeochemistry**: an analysis of global change. London: Academic Press, 1991. 443 p.

SIOLI, H. 50 anos de pesquisas em limnologia na Amazônia. **Acta Amazônica,** Manaus,v. 36, n. 3, p. 287-298, 2006.

SIOLI, H.**The Amazon**: limnology and landscape ecology of a mighty river and its basin. Dordrecht: Dr. W. Junk Publishers, 1984. 763 p.

SOARES-FILHO, B.; DIETZSCH, L.; MOUTINHO, P.; FALIERI, A.; RODRIGUES, H.; PINTO, E.; MARETTI, C.C.; SUASSUNA, K.; SCARAMUZZA, C.A.M.; ARAÚJO, F.V. de. **Reduction of carbon emission associated with deforestation in Brazil**: the role of the Amazon region protected areas program (ARPA). 2009. 24 p. Disponível em: <http://www.ipam.org.br/>. Acesso em: 12 out. 2008.

STALLARD, R.F.; EDMOND, J.M. Geochemistry of the Amazon 3.Weathering chemistry and limits to dissolved input**.Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres**.Washington, v. 92, p. 8293-8302, 1983.

STUMM, W.; MORGAN, J.J. **Aquatic chemistry**: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. New York: John Wiley, 1981. 1022 p.

TARDY, Y.; BUSTILLO, V.; ROQUIN, C.; MORTATTI, J.; VICTORIA, R.The Amazon. Bio-geochemistry applied to river basin management. **Applied Geochemistry**, Columbus, v. 20, n. 9, p. 1746-1829, 2005.

WAICHMAN, A. Autotrophic carbon sources for heterotrophic bacterioplankton in a floodplain lake of central Amazon. **Hydrobiologia,** Dordrecht, v. 341, p. 27-36, 1996.

WARD, J.V. The four dimensional nature of lotic eco- systems.**Journal of the North American Benthological Society**.Woods Hole, v. 8, n. 1, p. 2-8, 1989.

WETZEL, R.G.**Limnology**.Philadelphia: Saunders, 1975. 860 p.

WILCZEK, S.; FISCHER, H.; PUSCH, M. T. Regulation and Seasonal dynamics of extracellular enzyme activities in the sediments of a large lowland river.**Microbial Ecology,** Cambridge, v. 50, p. 253-267, 2005.

WILLIAMSON, C.E.; MORRIS, D.P.; PACE, M.L.; OLSON, O.G. Dissolved organic carbon and nutrients as regulators of lake ecosystems, resurrection of a more integrated paradigm.**Limnology and Oceanography,** Galveston, v. 44, n. 3, p. 795-803, 1999.

WISSMAR, R.C.; RICHEY, J.E.; STALLARD, R.F.; EDMOND, J.M. Plankton metabolism and carbon processes in Amazon River, its tributaries, and floodplain waters, Peru-Brazil, May-June, 1977. **Ecology,** Washington, v. 62, p. 1622-1633, 1981.

YAMAMOTO, S.; ALCAUSKAS, J.B.; CROIZER, T.F. Solubility of methane in distilled water and seawater.**Journal of Chemical & Engineering Data**, Washington, v. 21, p. 78-80, 1976.